



Cours

CHAPITRE 11

Energétique



CHAPITRE 11

Energétique



Introduction	1
Formes d'énergie	2
Stockage de l'énergie	3
Notion de puissance	4
Calcul de puissances mécaniques	5
Calcul de puissances électriques - Formule générale	6
Calcul de puissances électriques – Monophasé	7
Calcul de puissances électriques – Triphasé	8
Calcul de puissances électriques - Effet joule	9
Calcul de puissances hydraulique et pneumatique	10
Récapitulatif des grandeurs « Flux » et « Effort »	11
Principe de conservation de l'énergie	12
Rendement énergétique	13
Travail mécanique	14
Théorème de l'énergie cinétique	15



1 – QU'EST-CE QUE L'ENERGIE...



L'énergie, nous en avons tous entendu parler, mais c'est-on vraiment ce que c'est ?

Pas si sur... Pourtant, on comprend bien qu'en montant les escaliers, on dépense de l'énergie ; de même, si on tire sur un ressort, il faut en dépenser (car allonger un ressort, c'est dur, ça fatigue !). Et que dire du radiateur qu'on allume ou du feu de cheminée, là aussi, il y a de l'énergie qui est mise en jeu.

Au quotidien donc, si on y prête un peu attention, on se rendra compte que l'énergie est dans toutes nos activités (utiliser un téléphone qu'il faut recharger de temps en temps, se déplacer à pied, en vélo ou en voiture, faire du sport, chauffer sa maison, laver son linge, etc.).

2 – L'ENERGIE ELECTRIQUE, UNE PLACE DE CHOIX...

Au quotidien toujours, on peut constater la place remarquable qu'occupe **l'énergie électrique** : tout l'électroménager de la maison, l'éclairage, le téléphone, les ordinateurs, la télé, la voiture (de plus en plus), tous fonctionnent à l'électricité.

Et pourquoi pas avec du charbon, de l'uranium, du propane ou de l'essence ? Tout simplement parce que c'est **plus simple** de faire fonctionner les appareils avec l'électricité.



Tous ces appareils fonctionnent à l'électricité.

3 – LA PRODUCTION D'ENERGIE

Dans les paragraphes précédents, on a systématiquement évoqué la consommation d'énergie, et notamment sous sa forme électrique car c'est la plus simple à mettre en œuvre.

Mais il est clair que cette énergie, avant d'être **consommée**, a du être **produite** (elle ne tombe pas du ciel !) Et c'est là qu'interviennent les différents modes de production de l'énergie, et notamment l'électrique.



Voiture



Chaudière à mazout (chauffage central d'une habitation)



Puits de pétrole

- ⇒ Energie primaire : chimique
- ⇒ Energie utile : mécanique (le mouvement d'une voiture) ou thermique (la chaleur d'une chaudière)



Pétrole



Brûleurs de gazinière



Chaudière à gaz
(chauffage central d'une habitation)



Puits de gaz naturel

- ⇒ Energie primaire : chimique
- ⇒ Energie utile : thermique (essentiellement)



Gaz

Valeurs
indicatives



Centrale nucléaire

- ⇒ Energie primaire : nucléaire
- ⇒ Energie produite : électrique



Minerai d'uranium

1000 à 1400 MW par tranche
Parc nucléaire français (116
tranches sur 19 sites).



Centrale à charbon

- ⇒ Energie primaire : chimique
- ⇒ Energie produite : électrique



Minerai de charbon

1000 MW
Contre quelques dizaines de MW au
début du XXème siècle.



Centrale à hydroélectrique

- ⇒ Energie primaire : hauteur d'eau
- ⇒ Energie produite : électrique



Eau

10 à 500 MW
Filière hydroélectrique en France.



Centrale géothermique

- ⇒ Energie primaire : thermique (chaleur)
- ⇒ Energie produite : électrique



Chaleur de la terre

100 à 200 MW
Filière géothermique des Philippines.



Centrale biomasse

- ⇒ Energie primaire : chimique
- ⇒ Energie produite : électrique



Matière organique
(végétale ou animale)

69 MW
Biganos-Facture en Gironde.



Eolienne

- ⇒ Energie primaire : éolienne (force du vent)
- ⇒ Energie produite : électrique



Vent

500 kW
Rotor de 40 m ; vent de 43 km.h⁻¹



Photovoltaïque

- ⇒ Energie primaire : rayonnement solaire
- ⇒ Energie produite : électrique



Rayonnement solaire

150 W
Pour 1 m² en plein soleil.

Energie électrique





ENERGETIQUE

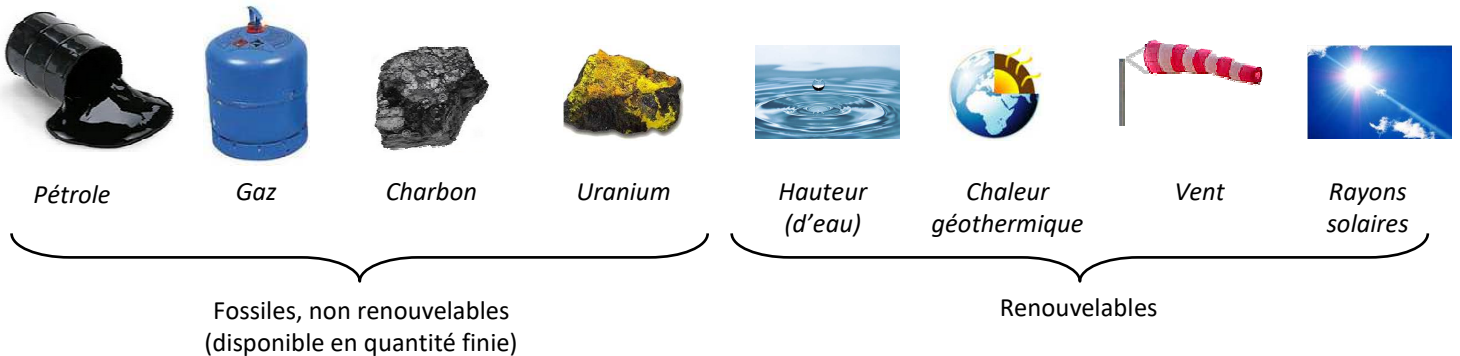
Les différentes formes d'énergie

1 – UNITES

Dans tous les cas, quelle que soit sa forme, l'énergie s'exprime légalement **en Joules (J)**.
Dans la pratique, et notamment en électricité, on utilise fréquemment le **kWh**.

2 – FORMES PRIMAIRES

L'énergie se présente à nous avant tout sous une **forme primaire**.



3 – AUTRES FORMES - FORMULES ASSOCIEES

Pour être expliquée correctement d'un point de vue physique et être manipulée dans des problématiques typées sciences de l'ingénieur, on catégorisera l'énergie sous les formes suivantes :

* Electrique

Fondamentalement, l'énergie électrique E (en Joules, J) résulte de la présence d'une charge électrique q (en Coulomb, C) soumise à une différence de potentiel U (en Volt, V) :



$$E = q \cdot U$$

← Différence de potentiel électrique (V)

↑ Energie (J) ↑ Charge électrique (C)



Charles-Augustin Coulomb
(1736 – 1806)

La charge électrique q est nécessairement un multiple de la charge élémentaire e qui est celle de l'électron. On a donc $q = n \cdot e$ avec n un entier naturel et $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

L'énergie électrique peut être stockée puis restituée dans des composants comme le solénoïde (inductance) ou le condensateur. Voir fiches correspondantes pour plus de détails.

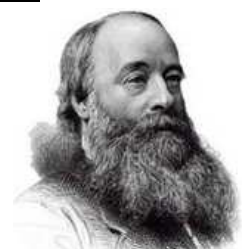
* Thermique

Grâce aux travaux de Joule, on connaît la relation entre la quantité d'énergie reçue (ou cédée) par un corps et sa variation de température sans changement d'état :



$$Q = m \cdot C \cdot \Delta T$$

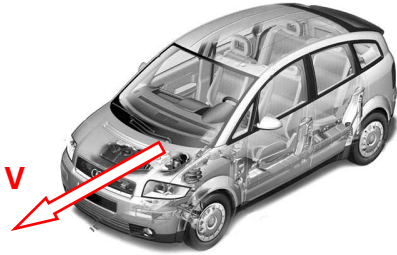
↑ Energie (J) ↑ Variation de température (K ou °C)
↑ Chaleur massique (J.kg⁻¹.K⁻¹)
↑ Masse (kg)



James Prescott Joule
(1818 – 1889)

La chaleur massique, parfois notée c_m , est une caractéristique de la matière recevant (ou cédant) l'énergie. En général, c'est une donnée connue.

* Mécanique – cinétique de translation



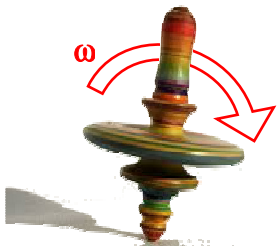
Un solide de masse m (kg) se déplaçant en translation à la vitesse v ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) dispose d'une énergie cinétique de translation E (J) :

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Energie (J) ——— ↑ ——— Vitesse ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
 ——— ↑ ——— Masse (kg)



* Mécanique – cinétique de rotation



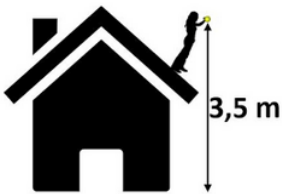
Un solide de moment d'inertie J ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$) se déplaçant en rotation à la vitesse ω ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$) dispose d'une énergie cinétique de rotation E (J) :

$$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$$

Energie (J) ——— ↑ ——— Vitesse angulaire ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)
 ——— ↑ ——— Moment d'inertie ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)



* Mécanique – potentielle de hauteur (ou de gravitation)



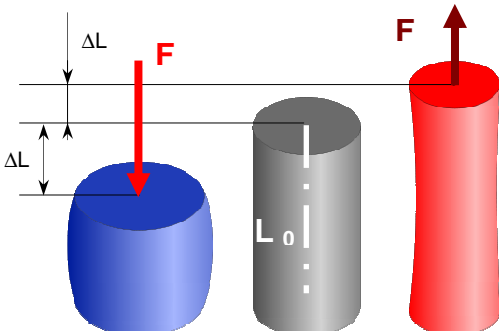
Un solide de masse m situé dans un champ de pesanteur g à l'altitude h dispose d'une énergie potentielle de hauteur E (J) :

$$E = m \cdot g \cdot h$$

Energie (J) ——— ↑ ——— Hauteur (m)
 ——— ↑ ——— Champ de pesanteur ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)



* Mécanique – potentielle de déformation



Les solides disposent tous d'une **élasticité** (voir Matériaux → Essai de traction) ce qui leur confère la possibilité de se déformer sous l'action d'efforts mécaniques.

Il en va de même pour les composants dont la fonction est justement de se déformer, comme les **ressorts**.



$$E = \frac{1}{2} k \cdot \Delta L^2$$

Formule valable pour un ressort de traction ou de compression.

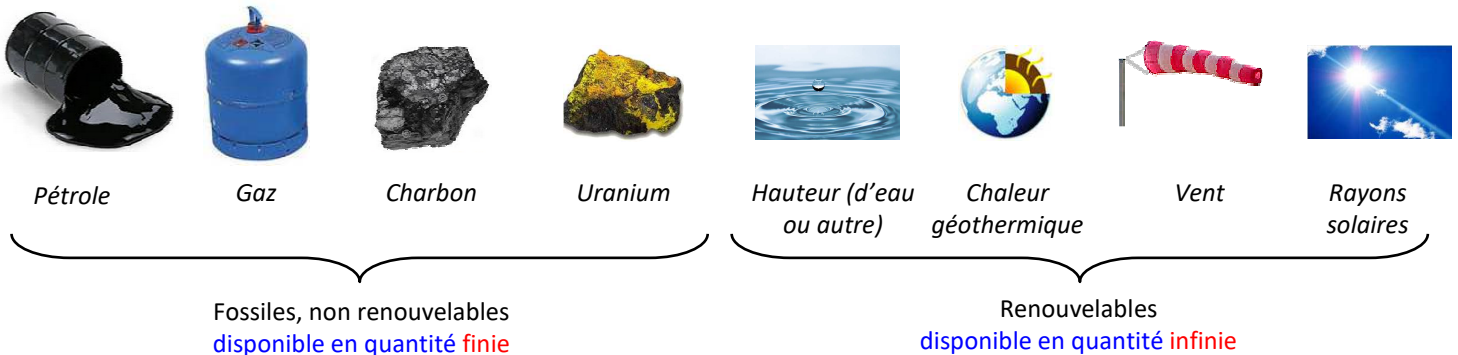
Allongement (m)
 Raideur ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)
 Energie (J)



1 – PREAMBULE

Stocker l'énergie revêt un aspect essentiel pour garantir la continuité de service pour les personnes et les industries en permettant notamment d'ajuster la production en fonction de la demande.

La nature, dans sa constitution et dans son fonctionnement, nous fournit de l'énergie sous différentes formes dites primaires ; ceci constitue donc des stocks, finis ou infinis :



Ces énergies primaires sont ensuite converties en énergies secondaires, comme par exemple l'électricité ou la chaleur. La continuité de service évoquée plus haut est directement concernée par notre capacité à stocker ces formes secondaires d'énergie ; nous allons voir les solutions existantes...

2 – STOCKAGE DE L'ENERGIE THERMIQUE

On joue ici sur deux phénomènes différents : la chaleur latente (non développé) et la chaleur sensible ; il s'agit de chauffer un matériau qui va donc « absorber » la chaleur et, compte tenu de son volume, de sa capacité thermique et du gradient de température, il va la restituer plus ou moins lentement.

Exemples :

- la brique, dans les chauffages domestiques, restitue lentement la chaleur.
- Ballon d'eau chaude isolé

3 – STOCKAGE DE L'ENERGIE MECANIQUE

* Stockage sous forme potentielle de gravitation

Constructions hydrauliques (barrages), masse solide que l'on élève.

* Stockage sous forme potentielle de déformation

Air comprimé, ressorts (de traction, de torsion, à lames, etc.)

* Stockage sous forme cinétique

Volants d'inertie (rotation d'un disque « lourd »)

4 – STOCKAGE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

* Stockage sous forme électromagnétique

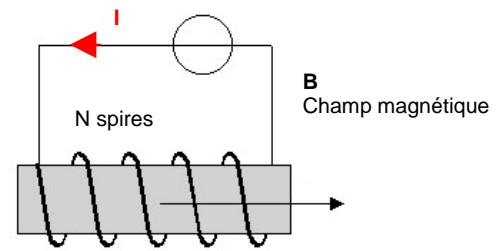
Un **solénoïde** (enroulement cylindrique) parcouru par un courant d'intensité $i(t)$ variable crée un champ magnétique.

Ce processus est réversible et le solénoïde restitue cette énergie magnétique emmagasinée sous forme d'énergie électrique.

$$E(t) = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i(t)^2$$

Energie (J) ↑ ↑ Inductance (H) ↑ Intensité (A)

Figure 1 : Solénoïde parcouru par un courant



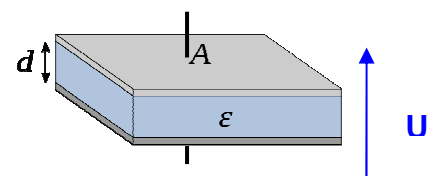
* Stockage sous forme électrostatique

Un **condensateur** alimenté sous une tension U crée un champ électrostatique. C'est un processus réversible et ce condensateur pourra restituer cette énergie électrostatique emmagasinée sous forme électrique.

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

Energie (J) ↑ ↑ Capacité (F) ↑ Tension (V)

Figure 2 : Condensateur alimenté par une tension



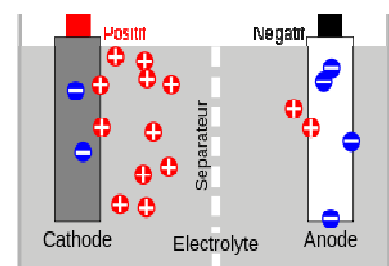
5 – STOCKAGE DE L'ENERGIE CHIMIQUE

Les **accumulateurs** électrochimiques stockent une charge électrique Q . Ils fonctionnent grâce aux réactions électrochimiques de leurs électrodes (oxydo-réduction), qui assurent la conversion de l'énergie électrique en un processus chimique réversible.

$$E = Q \cdot U$$

Energie (J) ↑ ↑ Capacité (A.s) ↑ Tension (V)

Figure 3 : Accumulateur



Les piles *ne sont pas* des accumulateurs électrochimiques, car elles ne sont pas rechargeables.

Souvent on parle de capacité de l'accumulateur Q en $A \cdot h$: $1 A \cdot h = 3600 A \cdot s$.

On rappelle que $1 A \cdot s = 1 C$.



ENERGETIQUE

Notion de puissance

4

1 – PREAMBULE

L'énergie, quelle que soit sa forme, peut être reçue ou cédée par un système. Si elle est reçue, le système voit sa quantité d'énergie augmenter et si elle est cédée, le système voit sa quantité d'énergie diminuée.

De plus, un système peut avoir comme fonction de *convertir* l'énergie d'une forme à une autre. Par exemple, un radiateur électrique va convertir l'énergie électrique qu'il reçoit en énergie thermique (chaleur) ; un moteur thermique va convertir l'énergie chimique (contenue dans le carburant comme l'essence) en énergie cinétique (mouvement de rotation).


Dans tous les cas, *qu'elle soit convertie ou pas*, **l'énergie circule** d'un système à un autre ou au sein d'un système. On peut alors se demander à quelle « vitesse » ou plutôt quel « débit » elle circule. Par exemple, monter 10 marches d'escalier nécessite une certaine quantité d'énergie ; mais faire cette dépense d'énergie en 30 secondes ou en 10 secondes, ce n'est pas la même chose. Ainsi arrive la notion de puissance...

2 – DEFINITION

La puissance est la quantité d'énergie par unité de temps fournie par un système à un autre :

$$\text{Puissance (W)} \rightarrow \boxed{P = \frac{E}{t}} \leftarrow \begin{array}{l} \text{Energie (J)} \\ \text{Temps (s)} \end{array}$$



 On peut considérer que la puissance correspond à un « débit d'énergie ».

3 – DIFFERENTES FORMES

La puissance est qualifiée de la même manière que l'énergie : si l'énergie est électrique, on parle de puissance électrique ; si l'énergie est mécanique, on parle de puissance mécanique, etc.

4 – UNITES

Telle que définie, la puissance est le rapport (la division) d'une quantité d'énergie par une durée.

Ce faisant, l'unité légale de la puissance est le joule par seconde : **J.s⁻¹**.

Cela dit, on utilise le **watt (W)** sachant qu'on a : **1 W = 1 J.s⁻¹**.

Dans la pratique, on peut rencontrer le « cheval vapeur », noté **Cv** : **1 Cv = 736 W**.



James Watt
(1736 – 1819)

Remarque : attention à ne pas confondre une **énergie** exprimée en $W \cdot h$ (ou $kW \cdot h$ ou $MW \cdot h$) avec une **puissance**, exprimée en W (ou kW ou MW).

Quand on lit « $W \cdot h$ » par exemple (dire « watt heure), on a une puissance en W multipliée par une durée en h ; or, une puissance multipliée par un temps, ça donne bien une énergie (et pas une puissance).

5 – PUISSANCE MOYENNE ET INSTANTANÉE

Puisque la puissance correspond de façon imagée à un **débit d'énergie**, on peut établir le parallèle avec un débit d'eau fourni à l'aide d'un robinet.

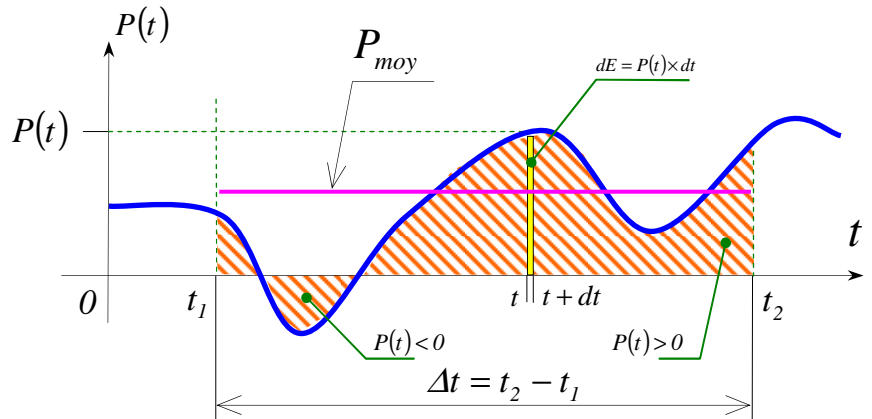


⇒ Voir la fiche correspondant au débit dans la section « mécanique des fluides » si cela est nécessaire.

Ce faisant, on a :

Conformément à la « convention récepteur », l'aire hachurée correspond à l'énergie :

- ☞ fournie par système pour $P(t) > 0$,
- ☞ absorbée par le système pour $P(t) < 0$



* Puissance instantanée :

$$dE(t) = P(t) \times dt \Leftrightarrow \boxed{P(t) = \frac{dE(t)}{dt}} \Leftrightarrow \boxed{E(t) = \int_{t_1}^{t_2} P(t) \cdot dt}$$



* Puissance moyenne :



$$\boxed{P_{moy} = \frac{\Delta E}{\Delta t}}$$

Dans le cas où le système absorbe (ou cède) une quantité d'énergie ΔE connue en une durée Δt connue, le calcul ci contre donne la **puissance moyenne** (elle ne préjuge pas des variations de la puissance sur la durée Δt).

Si la puissance est connue à l'aide d'une fonction continue et dérivable sur l'intervalle $[t_1, t_2]$, la **puissance moyenne** peut être calculée comme ceci :

$$\boxed{P_{moy} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} P(t) \cdot dt}$$

6 – ORDRES DE GRANDEUR

Les valeurs ci-dessous sont données à titre indicatif.



Bouilloire électrique domestique
1 à 2 kW



Machine à laver
3 kW



Ordinateur
300 à 400 W dont 80 W pour le processeur.
Serveur de Google : 50 MW



Corps humain
100 W au repos
500 W travail dur
(dont 30 W pour le cerveau)



TGV duplex
9,1 MW (mécanique)



ENERGETIQUE

Calcul de puissances mécaniques

1 – RAPPELS

La puissance est la quantité d'énergie par unité de temps fournie par un système à un autre.

Unité légale : le **watt (W)** avec : **1 W = 1 J.s⁻¹**.

Autres unités : le cheval vapeur **Cv** : **1 Cv = 736 W**.

$$\begin{array}{c}
 \text{Puissance (W)} \longrightarrow \\
 \boxed{P = \frac{E}{t}} \\
 \longleftarrow \text{Energie (J)} \\
 \longleftarrow \text{Temps (s)}
 \end{array}$$

2 – FORMULES PRATIQUES

Selon sa nature, l'énergie mécanique s'exprime mathématiquement d'une façon ou d'une autre : $E = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ pour l'énergie cinétique de translation, $E = m \cdot g \cdot h$ pour une énergie potentielle de hauteur, etc. Couplées avec $P = \frac{dE}{dt}$, elles aboutissent à des formules de puissances **extrêmement pratiques et très utilisées**.

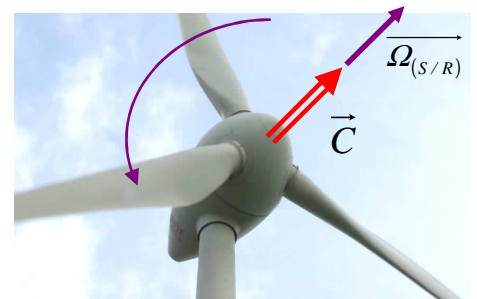
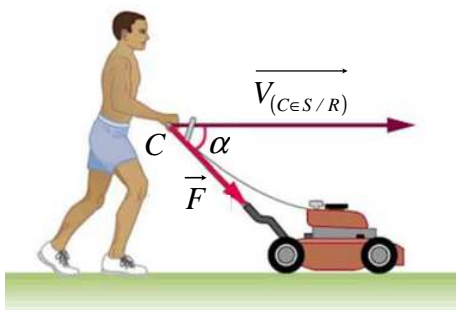
* Cas général (d'un effort composé d'une force et d'un couple)

Soit $\{F\}_C = \begin{Bmatrix} \vec{F} \\ \vec{M}_C \end{Bmatrix}_{\mathfrak{R}}$ un torseur d'effort mécanique subit par un corps matériel S et $\{V_C\}_C = \begin{Bmatrix} \vec{\Omega}_{(S/R)} \\ \vec{V}_{(C \in S/R)} \end{Bmatrix}_{\mathfrak{R}}$ le torseur cinématique du point d'application C dans le repère \mathfrak{R} . On montre que la puissance de l'effort mécanique $\{F\}$ est le scalaire (i.e. le nombre) P donné par le comoment des torseurs $\{F\}$ et $\{V_C\}$:

$$P = \begin{Bmatrix} \vec{F} \\ \vec{M}_C \end{Bmatrix}_C \otimes \begin{Bmatrix} \vec{\Omega}_{(S/R)} \\ \vec{V}_{(C \in S/R)} \end{Bmatrix}_C = \vec{F} \cdot \vec{V}_{(C \in S/R)} + \vec{M}_C \cdot \vec{\Omega}_{(S/R)}$$

* Cas particulier : force pure

* Cas particulier : couple pur



$$\begin{array}{c}
 \boxed{P = \vec{F} \cdot \vec{V}_{(C \in S/R)}} \quad \boxed{P = \vec{C} \cdot \vec{\Omega}_{(S/R)}} \\
 \text{Produit scalaire}
 \end{array}$$

Force (N) Vitesse (m.s⁻¹)

Puissance (W)

$$\boxed{P = F \cdot V \cdot \cos \alpha}$$

Angle entre les vecteurs (° ou rad)

Couple (N.m) Vitesse (rad.s⁻¹)

Puissance (W)

$$\boxed{P = C \cdot \omega_{(S/R)}}$$

⇒ Cas **très fréquent** où F, V et α sont connus

⇒ Cas **très fréquent** où C et ω sont connus et colinéaires
Attention toutefois au signe...



1 – RAPPELS

La puissance est la quantité d'énergie par unité de temps fournie par un système à un autre.

Unité légale : le **watt (W)** avec : $1\text{ W} = 1\text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$.

$$P = \frac{E}{t}$$

Puissance (W) →

← Energie (J)

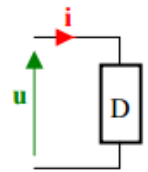
← Temps (s)

2 – EXPRESSION GENERALE DE LA PUISSANCE ELECTRIQUE

Soit un dipôle D traversé par un courant d'intensité i et soumis à la tension u .

Avec la convention « récepteur » (voir figure ci-contre).

On montre que la **puissance instantanée** reçue par D est donnée par la relation :

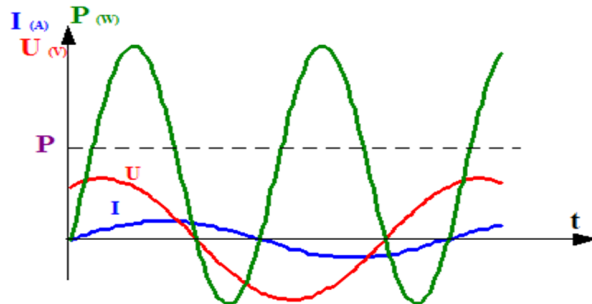
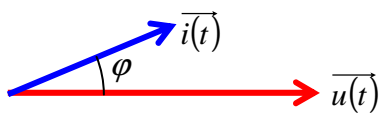


Puissance (W)

Tension (V)

Intensité (A)

$$P(t) = \overline{u(t)} \cdot \overline{i(t)}$$



La puissance est une grandeur algébrique dont le signe dépend de la convention choisie. Avec la convention « récepteur », le comportement du dipôle est le suivant :

- si $P = \overline{u(t)} \cdot \overline{i(t)} > 0$, alors le dipôle **reçoit** la puissance (récepteur)
- si $P = \overline{u(t)} \cdot \overline{i(t)} < 0$, alors le dipôle **fournit** la puissance (générateur).

La puissance se mesure avec un Wattmètre. Cet appareil mesure en fait à la fois la tension et le courant pour en déduire la puissance.

3 – VALEUR MOYENNE

Lorsque la puissance est fluctuante, on considère la valeur moyenne de $P(t)$ notée $P = \langle P(t) \rangle$.

* Régime continu

Si la tension et le courant sont continus alors $u(t) = U$, $i(t) = I$ et donc :

$$P = U \cdot I$$

Puissance (W) ↑

↑ ↑ Intensité (A)

Tension (V)

* Régime variable

Voir fiches suivantes.



1 – RAPPELS

La puissance est la quantité d'énergie par unité de temps fournie par un système à un autre.

Unité légale : le **watt (W)** avec : $1 \text{ W} = 1 \text{ J.s}^{-1}$.

$$P = \frac{E}{t}$$

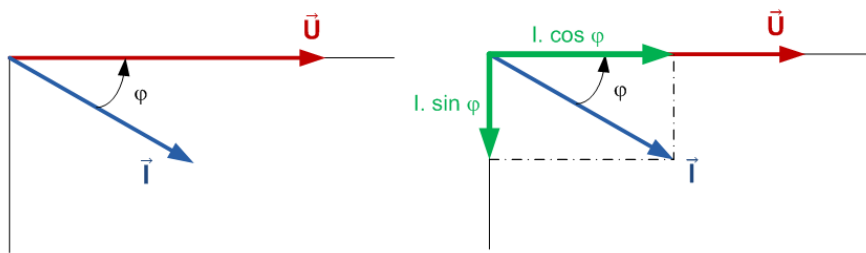
Puissance (W) → ← Energie (J)
← Temps (s)

2 – PUISSANCE EN COURANT ALTERNATIF MONOPHASE

A cause de l'éventuel déphasage entre la tension U aux bornes d'un dipôle et l'intensité I du courant le traversant, on identifie plusieurs notions de puissance :

- la puissance active P ,
- la puissance réactive Q ,
- la puissance apparente S .

En prenant la **tension comme référence** et en positionnant le courant par rapport à celle-ci, le graphe de Fresnel de la situation donne :



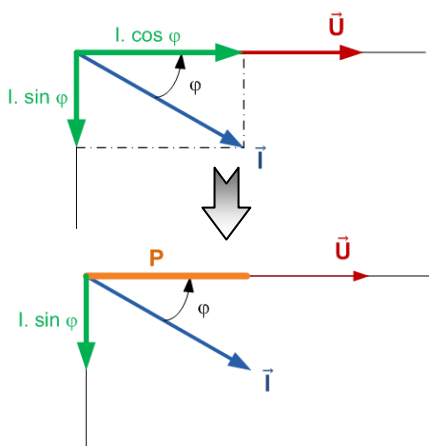
Dans toute la suite, on note U et I les **valeurs efficaces** de la tension et de l'intensité d'un courant sinusoïdal $u(t) = U_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$ et $i(t) = I_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$.

* Puissance active

La **puissance active est la valeur moyenne de la puissance instantanée.**

Notée P elle s'exprime en **WATTS (W)**. Elle dépend des valeurs efficaces de $u(t)$ et de $i(t)$ et du déphasage φ entre les deux grandeurs.

La puissance active reçue par un dipôle se calcule par la relation :

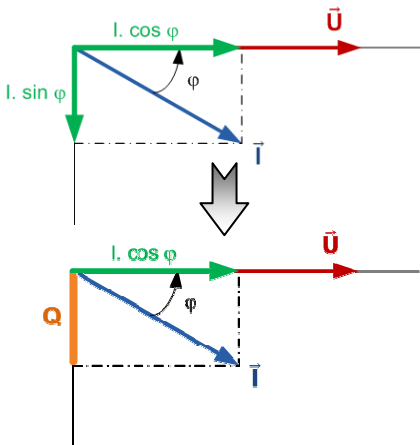


$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

↑ Puissance active (W) ↑ Tension efficace (V) ↑ Intensité efficace (A) ↑ Déphasage (rad)

La puissance active absorbée par un récepteur est toujours positive ou négative si elle est fournie.

* Puissance réactive



Par analogie avec la puissance active, la puissance réactive reçue par un dipôle se calcule par la relation :

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

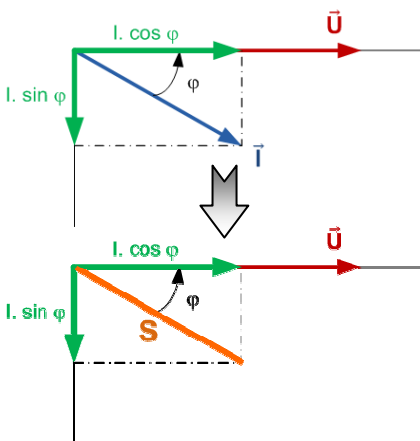
↑ Puissance réactive (var) ↑ Tension efficace (V) ↑ Intensité efficace (A) ↑ Déphasage (rad)

Notée Q elle s'exprime en **voltampère réactif (var)**.

Le signe de la puissance réactive est fonction de l'angle de déphasage produit par le récepteur considéré :

- ⇒ pour un récepteur **inductif** ($\varphi > 0$) la puissance réactive est positive,
- ⇒ pour un récepteur **capacitif** ($\varphi < 0$) elle est négative.

* Puissance apparente



La puissance apparente est une caractéristique de construction des machines électriques.

La puissance apparente nominale est :

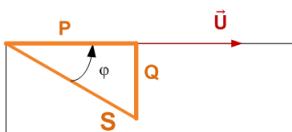
$$S = U \cdot I$$

↑ Puissance apparente (VA) ↑ Tension efficace (V) ↑ Intensité efficace (A)

Notée S , elle s'exprime en **voltampère (VA)**.

P est la seule puissance transformée : *Q* est une puissance purement mathématique et *S* permet de dimensionner l'alimentation du dipôle.

3 – FACTEUR DE PUISSANCE



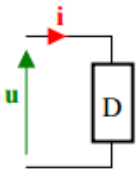
Le facteur de puissance est **le rapport entre les puissances active et apparente**. Il est égal au cosinus de l'angle de déphasage φ :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Le facteur de puissance est égal à 1 pour une résistance pure.



1 – RAPPELS



La **puissance instantanée** reçue par un dipôle D est donnée par la relation :

Puissance (W) Tension (V) Intensité (A)

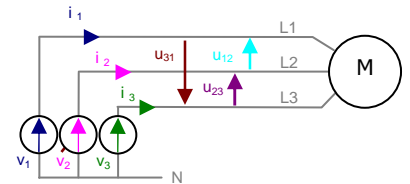
$$P(t) = \overline{u(t)} \cdot \overline{i(t)}$$

2 – PUISSANCE EN COURANT ALTERNATIF TRIPHASE

Dans toute la suite, on se place en **régime sinusoïdal triphasé équilibré**.

On note :

- ⇒ U la **tension efficace entre phases (tension composée)**
- ⇒ I l'**intensité efficace en ligne**.



* Puissance active

$$P = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi$$

↑ ↑ ↑ ↑

Puissance active (W) Tension (V) Intensité (A) Déphasage (rad)

La puissance active absorbée par un récepteur est toujours positive.

* Puissance réactive

$$Q = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \varphi$$

↑ ↑ ↑ ↑

Puissance réactive (var) Tension (V) Intensité (A) Déphasage (rad)

Le signe de la puissance réactive dépend du déphasage produit par le récepteur considéré : pour un récepteur **inductif** ($\varphi > 0$) la puissance réactive est positive, pour un récepteur **capacitif** ($\varphi < 0$) elle est négative.

* Puissance apparente

$$S = U \cdot I \cdot \sqrt{3}$$

↑ ↑ ↑

Puissance apparente (VA) Tension (V) Intensité (A)

4 – FACTEUR DE PUISSANCE

Le facteur de puissance est le **rapport entre les puissances active et apparente**. Il est égal au cosinus de l'angle de déphasage φ :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$



1 – RAPPELS

La puissance est la quantité d'énergie par unité de temps fournie par un système à un autre.

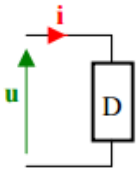
Unité légale : le **watt (W)** avec : $1 \text{ W} = 1 \text{ J.s}^{-1}$.

$$P = \frac{E}{t}$$

Puissance (W) → P ← Énergie (J)
← Temps (s)

$$P(t) = \vec{u}(t) \cdot \vec{i}(t)$$

Puissance (W) → $P(t)$ ← Tension (V)
← Intensité (A)

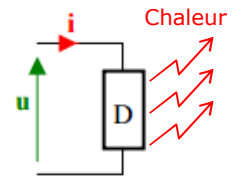


La **puissance instantanée** reçue par un dipôle D est donnée par la relation :

2 – EFFET JOULE

L'effet joule est dû à la transformation de l'énergie électrique en énergie thermique (chaleur). Cet effet se produit dans tous les conducteurs.

C'est cet effet qui explique que les composants électriques ou électroniques chauffent et parfois « grillent ».



3 – LOI DE JOULE DANS LES DIPOLES OHMIQUES

Un dipôle ohmique répondant par définition à la loi d'ohm ($u = R \cdot i$) et la puissance étant $P = u \cdot i$, on a :

$$P = R \cdot I^2$$

Puissance dissipée (W) ↑ P ← Intensité (A) ↑
Résistance (Ω) ↑

Si le courant est en régime sinusoïdal, il faut prendre l'intensité efficace.

Les câbles électriques, comme tout conducteur, possèdent eux aussi une résistance R .

Soit R (Ω) la résistance d'un fil de section S (m^2) et de longueur l (m), fabriqué dans un matériau de résistivité: ρ (Ω.m)

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

Résistance (Ω) ↑ R ← longueur (m) ↑
Résistivité (Ω.m) ↑ ← Section (m^2) ↑

Matériau	Résistivité $\rho \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$
Argent	16
cuivre	17
aluminium	28
tungstène	56
fer	97



1 – RAPPELS

La puissance est la quantité d'énergie par unité de temps fournie par un système à un autre.

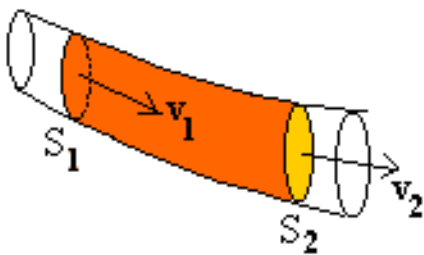
Unité légale : le **watt (W)** avec : **1 W = 1 J.s⁻¹**.

$$P = \frac{E}{t}$$

Puissance (W) →
← Energie (J)

← Temps (s)

2 – PUISSANCE HYDRAULIQUE



On considère une masse fluide circulant dans une conduite forcée (sous pression), délimitée par les sections S_1 , S_2 et la paroi intérieure de la conduite.

La masse fluide est en mouvement à la vitesse v_1 dans la section S_1 dans laquelle règne la pression p_1 .

Soit F_1 La force de poussée que subit la masse fluide de la part du fluide en amont. On a : $F_1 = p_1 \times S_1$.

Comme la force F_1 se déplace à la vitesse v_1 ; elle développe une puissance $P_1 = F_1 \times v_1 = p_1 \times S_1 \times v_1$.

Par ailleurs, le débit volumique passant par la section 1 vaut $Q_V = S_1 \times v_1$

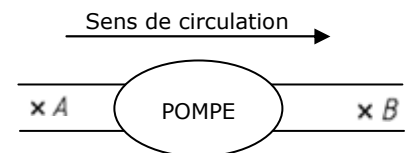
La puissance disponible dans la section 1 est donc :

$$P_1 = p_1 \cdot Q_V$$

Puissance (W) ↓
Pression (Pa) ↓
Débit volumique (m³.s⁻¹) ↓

3 – APPLICATION AUX POMPES

La fonction d'une pompe est d'augmenter la pression. Ainsi, la pression au refoulement (en B sur la figure) est supérieure à celle à l'aspiration (en A).



On note $\Delta p = p_B - p_A$ le gradient de pression entre le refoulement et l'aspiration.

La pompe doit alors **apporter de la puissance** P au fluide en circulation :

$$P = \Delta p \cdot Q_V$$

Puissance (W) ↓
Gradient de pression (Pa) ↓
Débit volumique (m³.s⁻¹) ↓



ENERGETIQUE

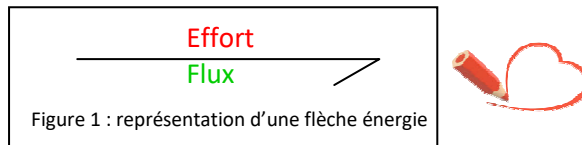
Récapitulatif des grandeurs "flux / effort"

1 – REPRESENTATION DANS UNE CHAINE D'ENERGIE

Il existe toujours 2 grandeurs représentatives des énergies qui, lorsque l'on les multiplie, donne la puissance. Ces deux grandeurs représentent :

- un flux (déplacement de quelque chose (électron, en électricité - objet en mécanique - ...)) ;
- un effort (grandeur qui cause le déplacement).

Leur représentation normalisée dans les chaînes d'énergies, est une demi-flèche dont la partie supérieure représente l'effort et la partie inférieure le flux (cf. figure 1).



2 – RECAPITULATIF DES GRANDEURS "EFFORTS" ET "FLUX" EN FONCTION DU TYPE D'ENERGIE

Forme d'énergie	Effort (unité)	Flux (unité)	"Schématisation"		Formule de puissance (W)
			Source	Consommateur	
Electrique continue					$P = U \times I$
Electrique monophasée	Tension U (V)	Intensité I (A)			$P = U \times I \times \cos \varphi$
Electrique triphasée					$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi$
Mécanique translation	Force F (N)	Vitesse linéaire v (m.s ⁻¹)			$P = F \times v$ <i>Si \vec{F} et \vec{v} sont colinéaires</i>
Mécanique rotation	Couple C (N.m)	Fréquence de rotation ω (rad.s ⁻¹)			$P = C \times \omega$
Hydraulique Pneumatique	Pression p (Pa)	Débit q (m ³ .s ⁻¹)			$P = p \times q$



ENERGETIQUE

Principe de conservation de l'énergie

1 – NOTION DE SYSTEME ISOLE

On appelle système un objet, un ensemble d'objet ou une partie d'objet auquel sera attribuée une énergie ou différentes formes d'énergie.

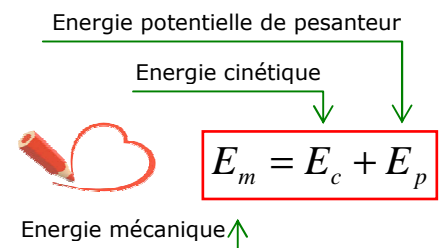
Un système sans interaction avec son environnement est appelé système isolé.

Dans la réalité, un système isolé n'existe pas car il va toujours exister des interactions avec son environnement. On travaillera souvent avec des systèmes « pseudo-isolés », où les interactions entre l'environnement et ce système se compensent.

2 – ENERGIE MECANIQUE

Dans un référentiel donné, un corps possède une certaine énergie potentielle de pesanteur E_p , et une certaine énergie cinétique E_c .

Par définition, l'énergie mécanique E_m est la somme de ces deux énergies :



3 – PRINCIPE DE CONSERVATION DE L'ENERGIE TOTALE

Rappel : en physique, un principe est une loi qui ne se démontre pas (contrairement à un théorème).

Lavoisier, chimiste français disait : « Rien ne perd, rien ne se crée, tout se transforme. ».



Antoine Lavoisier
(1743 – 1794)

Lors d'un processus physique ou chimique, l'énergie peut :

- changer de forme,
- se transférer d'un système à un autre.

Ceci est vrai pour l'énergie mécanique mais aussi pour toutes les autres formes d'énergie interne (thermique, potentielle élastique, électromagnétique, chimique, etc.)

**L'énergie d'un système isolé ne peut être ni créée, ni détruite : elle se conserve.
Elle peut changer de forme au sein du système, mais sa valeur totale reste constante.**

Ainsi, pour un système dont l'énergie mécanique E_m et l'énergie interne U peuvent varier (ΔE_m et ΔU), nous postulons la conservation de l'énergie, à savoir :

Sans échange d'énergie avec l'extérieur

$$\Delta E = \Delta E_m + \Delta U = 0$$

Variation d'énergie totale ↑
↑ Variation d'énergie mécanique
↑ Variation d'énergie thermique

Avec échange d'énergie avec l'extérieur

$$\Delta E = \Delta E_m + \Delta U = W + Q$$

Travail des forces ↑
↑ Quantité de chaleur

4 – APPLICATION A L'ENERGIE MECANIQUE

* Sans frottement

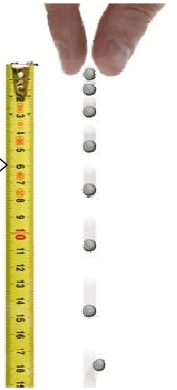
Lorsqu'un système en mécanique évolue **sans subir de frottement**, son énergie mécanique $E_m = E_c + E_p$ se conserve : (l'énergie mécanique ne subit pas de variation)

$$\Delta E_m = 0$$

Variation d'énergie mécanique \rightarrow \uparrow

Exemple : chute libre
L'énergie potentielle de hauteur se transforme en énergie cinétique.

Système isolé : la bille



* Avec frottement

Lorsqu'un système mécanique est soumis à des **forces de frottements**, son énergie mécanique $E_m = E_c + E_p$ diminue : il y a dissipation d'énergie, essentiellement par transfert thermique.

$$\Delta E_m \neq 0$$

5 – APPLICATION A L'ENERGIE THERMIQUE

Lorsque deux corps de températures différentes entrent en contact, il se produit entre eux un échange d'énergie, appelé transfert thermique.

Ce transfert thermique peut entraîner :

- Une variation de la température des corps (le corps froid se réchauffe, et le corps chaud se refroidit),
- Un changement d'état physique pour l'un et/ou l'autre corps.

Par convention, on appelle Q l'énergie échangée, ou transfert thermique et :

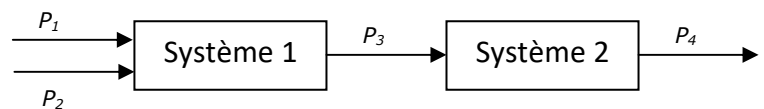
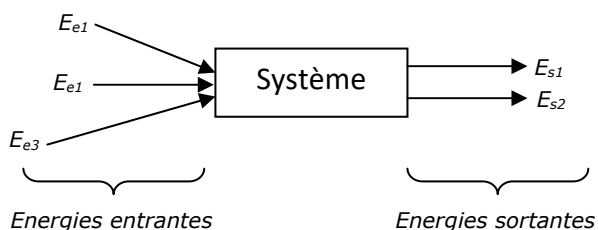
- $Q > 0$ si le système étudié reçoit/absorbe de l'énergie,
- $Q < 0$ si le système fournit/perd de l'énergie.

Le transfert thermique cesse lorsque les deux corps sont à la même température ; c'est **l'équilibre thermique**.

La mesure des transferts d'énergie thermique s'appelle « calorimétrie ».

6 – REPRESENTATION DES FLUX D'ENERGIE (DE PUISSANCE) EN SCHEMA-BLOC

Un système pouvant recevoir de l'énergie et aussi en céder, on peut représenter le flux d'énergie qui circule au sein du système et qui est échangé à l'aide de schéma-bloc :



P_1, P_2, P_3, P_4 peuvent être des puissances électriques ou mécaniques ou autres.

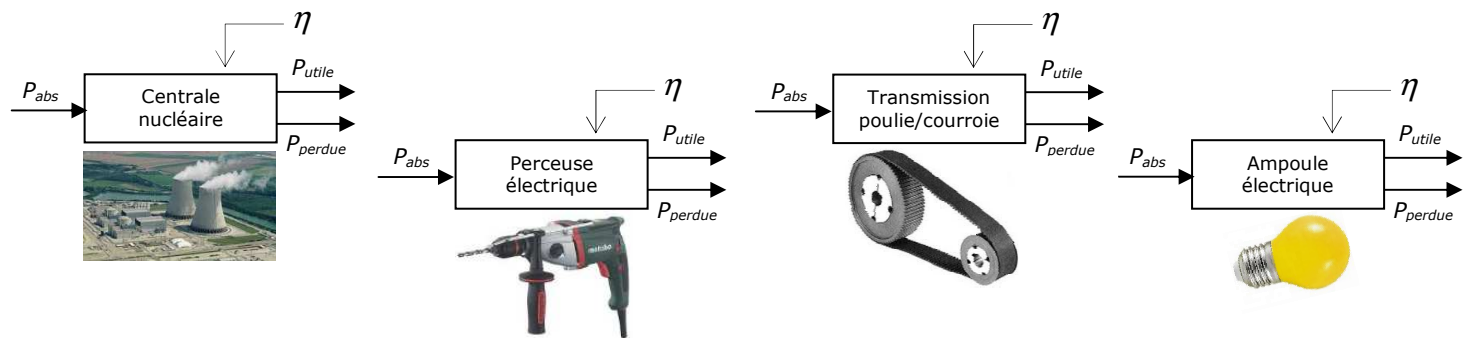
Les quantités d'énergie reçues/cédées, peuvent être remplacée par des puissances (car $P = E/t$).



1 – ENERGIE UTILE – ENERGIE PERDUE

Lorsque l'énergie est « manipulée » par un système, c'est-à-dire convertie, transportée, transformée ou adaptée, on constate qu'il y a systématiquement des **pertes**.

Les pertes sont dues à des **phénomènes physiques dits dissipatifs**, comme l'effet joule ou encore le frottement. Les pertes se manifestent essentiellement par un **dégagement de chaleur** qui correspond à une forme d'énergie dite « dégradée », en ce sens qu'on ne peut pas (ou très difficilement) l'exploiter pour en faire quelque chose **d'utile**. Cette énergie est donc **perdue**.



2 – RENDEMENT ENERGETIQUE

Le rendement caractérise l'efficacité du système, c'est-à-dire sa capacité à minimiser ces pertes.

Définition : le rendement est égal au rapport de l'énergie utile disponible à la sortie du système par celle qu'il a fallu injecter en entrée.

Rendement (-)

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{absorbée}}}$$

← (W)
← (W)

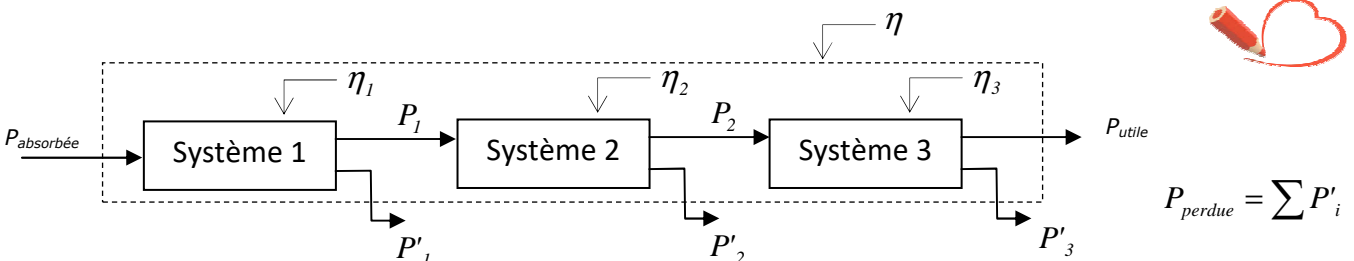
Valeur extrême du rendement : la puissance utile en sortie ne peut jamais être plus grande que celle injectée en entrée (voir principe de conservation). On a donc :

$$0 \leq \eta \leq 1$$

Si le système est considéré comme parfait, on a : $\eta = 1$.

Rendement global : le rendement global η d'un système composé de i sous-systèmes est égal au produit (et non la somme) de leur rendement individuel η_1, \dots, η_i ; on a :

$$\eta = \prod \eta_i$$



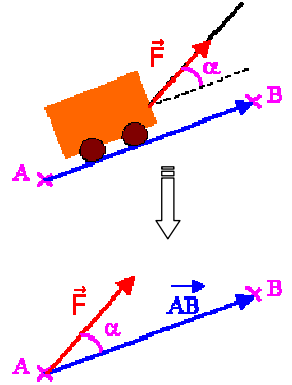


1 – Travail d'une force constante sur un trajet rectiligne

On dit qu'une force travaille lorsque son point d'application se déplace. Soit \vec{F} une **force constante** et $\vec{L} = \overrightarrow{AB}$ un **déplacement rectiligne** ; par définition, on a :

$$W = \vec{F} \cdot \vec{L} = F \times L \times \cos \alpha$$

$\begin{matrix} \uparrow & \uparrow & \uparrow \\ J & N & m \\ \text{Travail} & \text{Force} & \text{Distance} \end{matrix}$



Unité : le travail étant le produit d'une force avec une longueur, il est homogène a une énergie et on l'exprime en Joule (J).

Si la force est variable au cours du temps (en intensité et/ou en direction) ou si le trajet n'est pas rectiligne, le calcul du travail nécessite un calcul intégral.

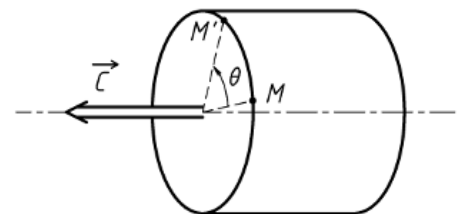
Si la direction de la force \vec{F} est perpendiculaire au trajet \vec{L} ($\alpha = +/ - \pi/2$), alors le travail est nul : $W = 0$.

2 – Travail d'un couple

Considérons un solide en rotation autour d'un axe fixe.

Soit \vec{C} un couple porté par l'axe de rotation et agissant sur le solide.

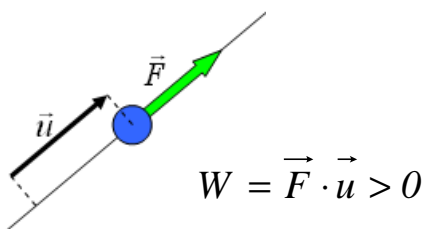
Lorsque le solide tourne de l'angle **orienté** θ , le couple travaille ; on a :



$$W = C \times \theta$$

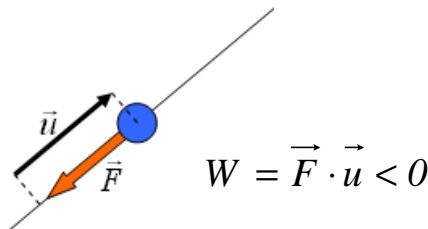
$\begin{matrix} \uparrow & \uparrow & \uparrow \\ J & N \cdot m & \text{rad Angle} \\ \text{Travail} & \text{Couple} & \end{matrix}$

3 – Travail moteur – Travail résistant – Travail nul



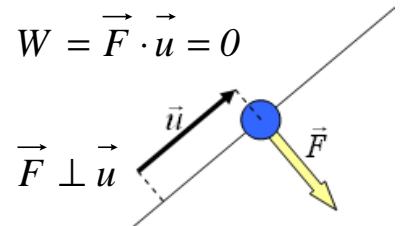
La force \vec{F} « aide » à la réalisation du trajet \vec{u} .

Son travail est **moteur**



La force \vec{F} « n'aide pas » à la réalisation du trajet \vec{u} .

Son travail est **résistant**



La force \vec{F} est « sans effet » sur la réalisation du trajet \vec{u} .

Son travail est **nul**



1 – PREAMBULE

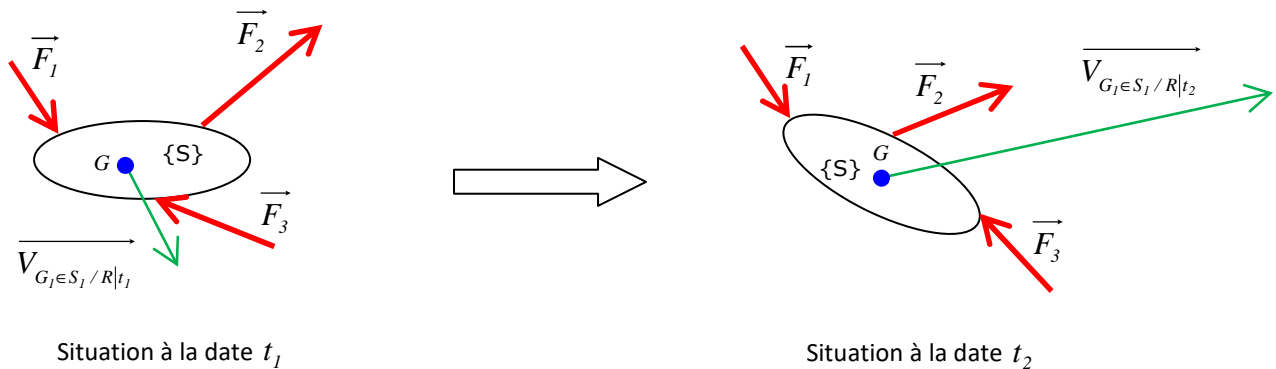
Résoudre un problème de mécanique nécessite de déterminer les équations qui régissent la dynamique du système étudié. Pour se faire, on dispose bien entendu du PFD et des relations cinématiques entre accélération, vitesse et position.

Une autre approche, équivalente, est possible par l'énergétique au travers du théorème de l'énergie cinétique (TEC) présenté ici.

2 – TEC POUR UN SOLIDE {S}

Soit un solide {S} soumis à un système d'efforts $\{F_1\}$, $\{F_2\}$, $\{F_3\}$, ...

Soit G le centre de gravité du solide, $\vec{V}_{G \in S / R|t_1}$ la vitesse de son centre de gravité dans un repère galiléen à la date t_1 et $\vec{V}_{G \in S / R|t_2}$ celle à la date t_2 .



On montre que pour un solide {S} en mouvement dans un repère galiléen R_g , la dérivée par rapport au temps de l'énergie cinétique de ce solide est égale à la puissance des efforts extérieurs :

$$\frac{d}{dt} E_{CS/R} = \sum P_{ext S/R}$$

En multipliant les membres de gauche et de droite par dt , on obtient une relation avec les travaux des efforts (et non plus leurs puissances) :

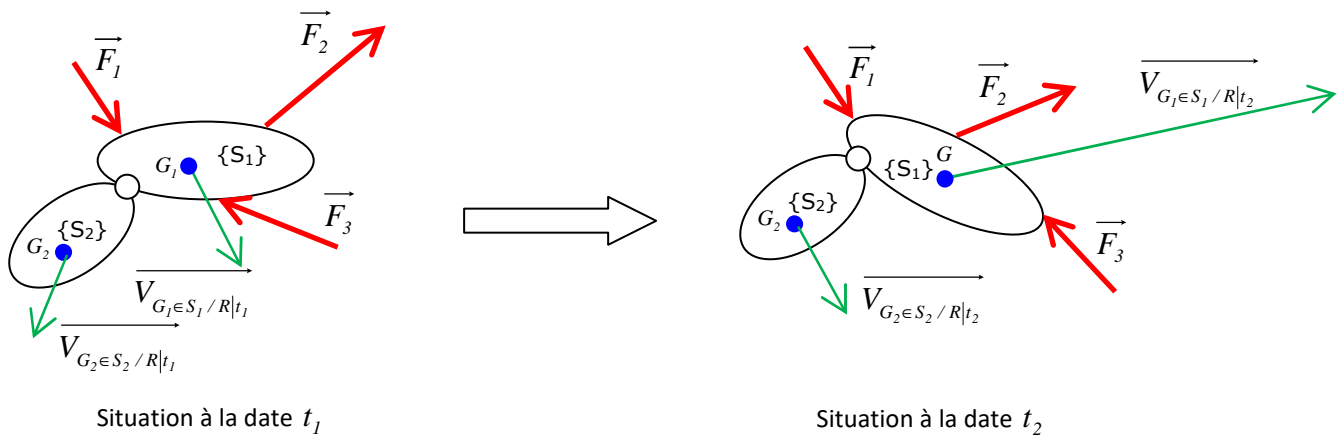
$$\Delta E_{CS/R} = \sum W_{ext}$$

Variation d'énergie cinétique \uparrow

\uparrow Somme des travaux des effort extérieurs

3 – TEC POUR UN SYSTEME DE SOLIDES {S}

Soit $\{\Sigma\}$ un ensemble de i solides $\{S_i\}$.



On montre que dans ce cas, le TEC appliqué au système $\{\Sigma\}$ donne :

$$\Delta E_{C \Sigma / R} = \sum W_{ext} + \sum W_{int}$$

↑
↑
↑
 Variation d'énergie cinétique Somme des travaux des efforts extérieurs Somme des travaux des efforts intérieurs

Les efforts intérieurs, si il y en a, doivent donc être considérés. Ils peuvent résulter par exemple de forces de frottement dans les liaisons, d'efforts de ressort...

4 – METHODE DE MISE EN ŒUVRE DU TEC

1. Définir le système sur lequel on va appliquer le TEC.
2. Faire le bilan des actions mécaniques $\{F_1\}$, $\{F_2\}$, $\{F_3\}$, ... (extérieures et intérieures).

Pour un système de solides, les efforts intérieurs peuvent contribuer de façon non nulle. Ils doivent donc être pris en compte au même titre que les efforts extérieurs lors du bilan.

3. Exprimer le travail W_{F1} , W_{F2} , ... de toutes les AM sur leur trajet respectif entre les instants t_1 et t_2 .
4. Sommer les travaux $\sum W_i = W_{F1} + W_{F2} + \dots$
5. Exprimer la variation d'énergie cinétique $\Delta E_C = E_{C \text{ finale}} - E_{C \text{ initiale}}$.
6. Appliquer le théorème pour mettre en relation toutes les grandeurs.