



Université Badji Mokhtar-Annaba

Faculté des Sciences

Département Des Sciences de la Matière



UE : Découverte

Mode d'évaluation : Examen 100 %

Cours : Systèmes Physiques Simples

Chargé des Cours :

Maitre de Conférence. Assia KHOUALDIA

1^{ère} Année Sciences de la Matière



Systemes Physiques Simples : Préambule

1- Qu'est ce que la physique

La physique est une science de la nature expérimentale qui étudie les phénomènes naturels et leurs évolutions. Elle correspond à l'étude du monde qui nous entoure sous toutes ses formes. Elle établit des théories qui permettent de les modéliser et, de fait, de les prévoir (figure.1).

Les théories établies par la physique s'appliquent dans des cadres bien définis.

A- Physique classique

La physique classique est l'étude du monde des solides, des liquides et des gaz. Elle nous apprend à concevoir des voitures ou à bâtir des immeubles. Elle repose sur des définitions anciennes de temps, d'espace, de matière et d'énergie. Elle peine toutefois à expliquer certains phénomènes observés dans la nature.

B- Physique quantique

La physique quantique prend alors le relais. Son domaine d'application, c'est le monde des particules et des champs de force. La physique quantique a permis des progrès dans la conception des lasers, entre autres. Elle introduit aussi de nouvelles définitions de la matière et de l'énergie.

C- Relativité générale

La relativité générale s'intéresse au monde macroscopique. C'est à la relativité générale que nous faisons appel, par exemple, pour traiter l'information utile au fonctionnement de nos GPS. Elle introduit de nouvelles définitions de l'espace et du temps.

D- Mécanique, optique, magnétisme, astrophysique...

Il existe d'autres façons de classer les disciplines de la physique en fonction des phénomènes qu'elle étudie. Ainsi, par exemple :

- La mécanique s'intéresse au mouvement des corps ;
- L'optique s'intéresse à la lumière et à ses propriétés ;
- Le magnétisme s'intéresse aux champs magnétiques et aux forces qu'ils engendrent ;
- L'astrophysique concerne l'étude des propriétés des objets de l'univers.

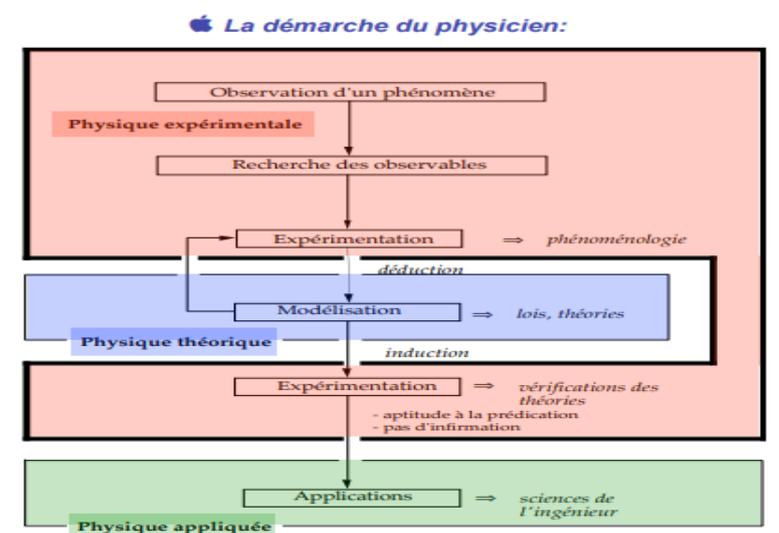


Figure 1 : Démarche des physiciens

2- Physiciens célèbres

Parmi les physiciens célèbres, citons notamment :

- Archimède ;
- Galilée ;
- Evangelista Torricelli ;
- Blaise Pascal ;
- Isaac Newton ;
- Daniel Gabriel Fahrenheit ;
- André-Marie Ampère ;
- Léon Foucault ;
- Max Planck ;
- Pierre et Marie Curie ;
- Albert Einstein ;
- Erwin Schrödinger ;
- Werner Heisenberg ;
- Georges Charpak ;
- Hubert Reeves ;
- Stephen Hawking.

Dans les salles de classe, physique et chimie sont la plupart du temps réunies sous le terme de sciences physiques. Pourtant, il existe bien une différence entre les deux.

3- La chimie : Science de la matière

La chimie ne s'intéresse qu'à la matière. Les expériences de chimie permettent d'identifier les substances qui composent la matière et leurs propriétés. Cette science étudie les transformations de la matière qui font intervenir des modifications sur les couches électroniques externes : réactions chimiques (oxydo-réduction, acido-basique...), ionisation, etc.

4- La physique : Science de la nature

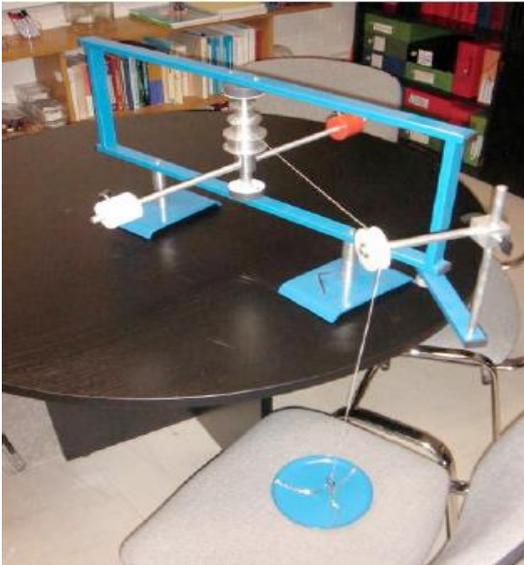
Étymologiquement, le terme de physique, quant à lui, signifie « connaissance de la nature ». La science que l'on appelle ainsi étudie les mécanismes naturels (mouvement, électricité, fission, etc.) et leur évolution. Elle établit des théories comme la théorie des quanta en mécanique quantique, qui permettent de modéliser et de fait, de prévoir les phénomènes naturels.

5- La physico-chimie et la chimie physique

La chimie et la physique restent proches et se rejoignent parfois. Ainsi, la physico-chimie est une sous-discipline de la physique qui s'intéresse à la nature physique de la chimie. Les physico-chimistes étudient, par exemple, la dynamique des molécules ou l'aspect quantique des réactions chimiques.

Le principe de la chimie physique est très légèrement différent - en réalité, les deux sont vraiment semblables - puisqu'elle se penche sur les bases physiques des systèmes chimiques. Elle inclut, entre autres, des disciplines telles que la cinétique chimique, la spectroscopie ou la thermodynamique chimique.

6- Qu'es ce qu'un système physique



En physique, le terme système a une signification technique au sens où il est identifié à une partie de l'univers physique choisi pour l'analyse. Toute chose en dehors du système est appelée environnement et n'est pas prise en compte dans l'analyse excepté pour son influence sur le système. La séparation système/environnement est arbitraire et est généralement faite de façon à simplifier au mieux l'analyse.

Un système est dit isolé, s'il ne peut échanger ni énergie ni matière avec l'extérieur, il est dit fermé s'il peut échanger de l'énergie (et seulement de l'énergie) avec l'extérieur et il est dit ouvert s'il peut échanger de la matière et de l'énergie avec l'extérieur.

Généralement un système physique est choisi pour correspondre au mieux à ce qu'on appelle usuellement système, soit par exemple une machine particulière en thermodynamique macroscopique, ou un milieu réactionnel en thermochimie. Mais les systèmes physiques peuvent être très variés: un atome, l'eau d'un lac ou encore l'eau dans une moitié dudit lac peuvent être étudiés comme des systèmes physiques.



La complexité d'un système physique est égale à sa probabilité d'être décrit par un vecteur d'état particulier, c'est-à-dire d'être décrit par un ensemble de grandeurs physiques caractéristiques.



- Oscillations et Oscillateur Harmonique
- Pendule Simple

I- Oscillations

I-1 Définition de l'oscillation

- Une oscillation est un mouvement ou une fluctuation périodique autour d'une position d'équilibre stable. Les oscillations sont soit à amplitude constante (dites harmoniques), soit amorties, soit forcées, soit amorties forcées (Tableau.1).

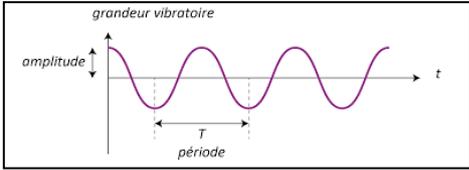
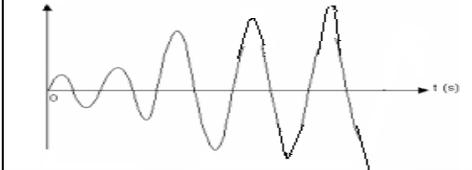
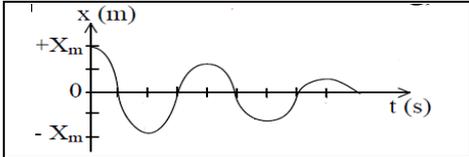
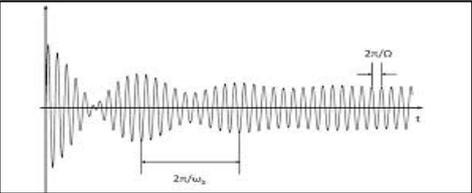
Oscillation	Libre	Forcée
Non amortie	<p><u>Oscillation libre-non amortie</u> ⇒ <u>Harmonique</u></p>  <ul style="list-style-type: none"> - Processus périodique sans dissipation d'énergie ; - Oscillateur idéal ; - Sans frottement ; - Sans excitation externe ; - Énergie constante ; - Amplitude est représentée par une fonction sinusoïdale. 	<p><u>Oscillation forcée-non amortie</u></p>  <ul style="list-style-type: none"> - Sans frottement ; - Excitation extérieure ; - L'oscillateur oscille avec la fréquence de l'excitation ; - Gain d'énergie ; - Phénomène de Résonance à la fréquence propre.
Amortie	<p><u>Oscillation libre-amortie</u></p>  <ul style="list-style-type: none"> - Oscillateur réel ; - Avec frottement ; - Sans excitation externe ; - Perte d'énergie (Dissipation de l'énergie) ; - Les oscillateurs s'amortissent et finissent par s'arrêter. 	<p><u>Oscillation amortie-forcée</u></p>  <ul style="list-style-type: none"> - Avec frottement ; - excitation extérieure ; - gain et perte d'énergie ; - Équilibre.

Tableau.1 : Différents genres d'oscillations

- Elles répondent aux mêmes équations quel que soit le domaine.
- Elles peuvent être à différentes types : mécanique, électrique, physique...etc.

Explication des différents genres d'Oscillations (tableau 1) :

- Il y a 2 familles d'oscillations :

Libres : fonctionnant-idéalement-indéfiniment, sans nouvel apport d'énergie

Forcée : soumises à l'impact d'un appoint périodique externe.

Chacune des 2 familles peut être amortie ou non amortie (donc soumise à un freinage, ou non).

- La fréquence propre d'un oscillateur ne dépend que de ses paramètres. C'est la fréquence à laquelle oscillerait un système libre (idéal) sans frottement.
- La problématique se pose toujours sur l'équation du mouvement des systèmes à un degré de liberté ou plusieurs degrés de liberté.

I-2 Types d'oscillations

A- Oscillation mécanique

Une oscillation mécanique est un mouvement répétitif d'une pièce mobile autour d'un point fixe d'équilibre.

Par exemple:

- Un balancier de pendule oscille de droite à gauche autour de son point d'équilibre qui est la verticale.
- Une suspension de véhicule a tendance à osciller autour de son point de repos, lors de son fonctionnement sans amortisseur ou lorsque celui-ci est défectueux.

Pour créer volontairement une oscillation mécanique, ou l'entretenir, on peut:

- Utiliser un système à excentrique ;
- Utiliser un électroaimant alimenté par un courant alternatif ;
- Pour les faibles amplitudes, utiliser un cristal piézoélectrique alimenté par un courant alternatif ;
- Créer des turbulences dans un fluide.

B- Oscillation électrique

L'oscillation dans un circuit électrique peut être voulue, comme dans le cas des oscillateurs, ou être due à un défaut. Elle consiste en une variation cyclique de l'intensité de la tension électrique dans ce circuit.

C- Oscillation Physique

La matière est en perpétuelle agitation ou oscillation au niveau moléculaire. Ces ondes peuvent être:

- Matérielles, comme le son qui est une vibration des molécules composant l'air
- Immatérielles, comme la lumière qui résulte de la vibration d'un champ électrique et d'un champ magnétique dans le vide.
- Il s'agit également d'une propriété des neutrinos.

Mouvement d'un corps qui repasse régulièrement par les mêmes positions avec les mêmes vitesses.

I-3 Phénomènes périodiques

Un phénomène périodique qui se reproduit à intervalles réguliers. Si l'évènement se répète à l'intervalle de temps fixes, on dit qu'il est périodique en temps.

Exp : *La rotation de la Terre est un mouvement périodique dans le temps, elle occupe la même position à des intervalles de temps égaux à un jour.*

I-4 Périodes

La période, T , c'est un intervalle de temps au bout duquel un mouvement périodique se reproduit avec la même phase (figure 2). L'unité SI de la période est la seconde (s).

La fréquence, f , mesure le nombre de fois qu'un mouvement périodique se reproduit par unité de temps. La fréquence s'exprime par l'inverse d'un temps (s^{-1}). Le Hertz (Hz), est l'unité SI de fréquence : $1\text{Hz}=1/\text{s}$ (une fréquence de 1Hz signifie qu'un mouvement périodique se reproduit une fois toutes les secondes).

Exp : *La fréquence du courant électrique alternatif distribué est de 50Hz, son intensité dans un sens donné passe par un maximum tous les $1/50^{\text{ième}}$ de seconde, mais il change de sens 100 fois par seconde.*

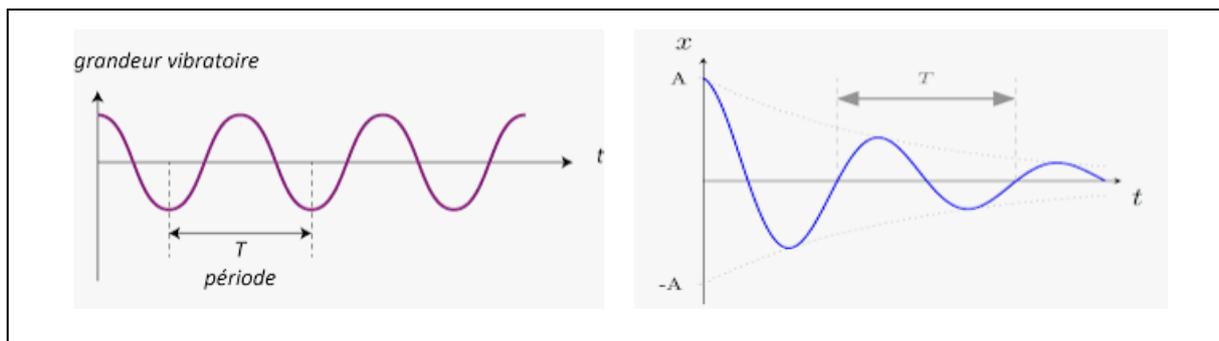


Figure.2 : Période des oscillations.

I-5 Oscillateur

Un oscillateur (ou vibreur) est un système qui peut être le siège d'oscillations.

Exp : 1) *Un pendule est un oscillateur mécanique, de même qu'un système constitué d'une masse suspendue au bout d'un ressort.*

2) *Un circuit électrique constitué d'une capacité et d'une inductance est un exemple d'oscillateur électrique.*

I-6 Position de repos

C'est l'état d'un système oscillant avant d'être mis en mouvement par une sollicitation extérieure, soit l'état d'équilibre mécanique, électrique ou thermodynamique du système considéré.

II- Oscillateur harmonique

II-1 Définition

Un oscillateur harmonique ou oscillateur libre est un oscillateur idéal dont l'évolution au cours du temps (processus périodique) sans dissipation de l'énergie (exp : sans frottement), dont l'amplitude est constante et représentée par une fonction sinusoïdale du temps (figure 3), et dont la fréquence ne dépend que des caractéristiques du système. Les fonctions sinus et cosinus ne diffèrent que par un déphasage de $\pi/2$, par conséquent on dira fonction sinusoïdale même si elle est représentée par un cosinus.

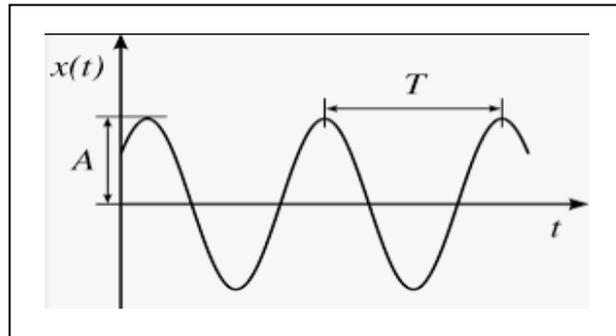


Figure.3 : Oscillateur Harmonique.

A : est l'amplitude : valeur maximale de l'élongation

Une oscillation harmonique se met alors sous la forme :

$$U(t) = A \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad \text{ou bien} \quad U(t) = A \cdot \cos(\omega t + \phi)$$

Ou, $\omega = 2\pi f$ est la pulsation et elle se mesure en $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$.

Et $T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$, T est la période

U(t) décrit l'état du système à l'instant « t », son expression dépend du système considéré :

- Pour un pendule, u(t) représente généralement l'angle par rapport à la verticale.
- Pour une masse attachée au bout d'un ressort à boudin, U(t) représente l'élongation linéaire (déplacement par rapport à la position de repos).
- Dans un circuit électrique, U(t) représente par exemple la tension électrique aux bornes d'un des éléments

L'intérêt d'un tel modèle est qu'il décrit l'évolution de n'importe quel système physique au voisinage d'une position d'équilibre stable, ce qui en fait un outil transversal utilisé dans de nombreux domaines : mécanique, électrique, électronique et optique.

Dans la pratique, de tels oscillateurs ne sont approchés que dans des cas rares pour lesquels les forces dissipatives (frottement par exemple) sont négligées. Pour que leur amplitude reste constante, il est nécessaire d'entretenir les oscillations en fournissant de l'énergie.

II-2 Oscillation harmonique libre unidimensionnel

Un oscillateur harmonique libre unidimensionnel c'est-à-dire à un degré de liberté x (x, θ, \dots) est un système physique dont l'évolution au cours du temps en l'absence d'amortissement et d'excitation, est régie par l'équation différentielle linéaire :

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}(t) + w_0^2 \cdot x(t) &= 0 \\ \frac{d^2x}{dt^2} + w_0^2 \cdot x(t) &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Cas de translation (exemple} \\ \text{système masse-ressort)} \end{array} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\theta}(t) + w_0^2 \cdot \theta(t) &= 0 \\ \frac{d^2\theta}{dt^2} + w_0^2 \theta(t) &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Cas de Rotation (exemple} \\ \text{pendule simple)} \end{array} \quad (1)$$

Où w_0 est la pulsation propre du système (constante réelle) qui ne dépend que des caractéristiques propres du système.

La solution générale de l'équation (1) pour les deux cas s'écrit :

- Pour le cas de translation : $x(t) = A \cdot \cos(w_0 t + \phi_0) = A \cdot \sin(w_0 t + \phi_0)$
- Pour le cas de rotation : $\theta(t) = A \cdot \cos(w_0 t + \phi_0) = A \cdot \sin(w_0 t + \phi_0)$

Avec $A = \text{Cte}$: Amplitude des oscillations

$\phi_0 = \text{Cte}$: Phase à l'origine.

Ces deux constantes étant déterminées par les conditions initiales sur $x(t)$ ou $\theta(t)$ et sa dérivée première.

- ❖ Cette équation différentielle est très importante en physique parce qu'elle revient tous le temps. Pourquoi elle revient tous le temps, parce que dès que vous avez un système qui oscille : comme le système (masse-ressort) c'est le cas de translation, le ressort fait revenir la masse à sa position d'équilibre, où un pendule simple (c'est le cas de rotation) qui veut revenir à la position d'angle nul ($\theta=0$), où n'importe autre système oscillant, par exemple les charges dans un circuit électrique ou un pont soumis à l'action du vent.

II-3 Pendule simple

Galilée (1564-1642) a longuement étudié ce dispositif extrêmement simple mais d'une importance scientifique considérable.

On considère un pendule simple de longueur « l » et de masse négligeable en équilibre et en mouvement (figure.4).

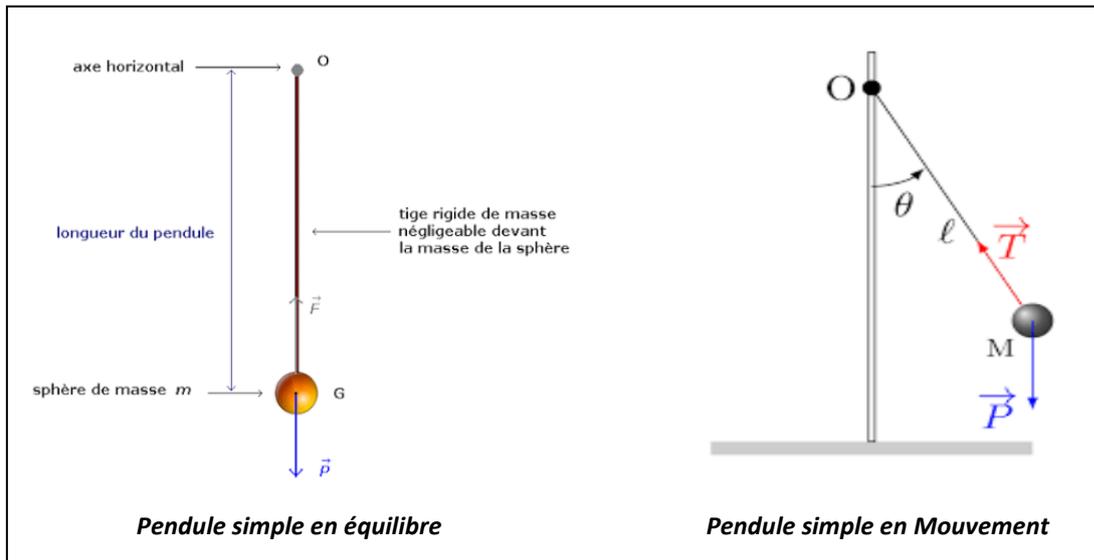


Figure.4 : Pendule simple.

La position instantanée du pendule est caractérisée par l'angle de rotation θ . Pour trouver l'équation différentielle du mouvement on utilise le théorème du moment cinétique (TMC), parce que le système est en rotation, et on obtient la relation suivante :

$$\ddot{\theta} + \omega_0^2 \cdot \theta = 0$$

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{l} \cdot \theta = 0$$

C'est l'équation du mouvement d'un pendule simple pour les faibles élongations (petites oscillations). On voit que c'est une équation différentielle du deuxième ordre, admet une solution sinusoïdale :

$$\theta(t) = \theta_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \phi_0) = \theta_0 \cdot \sin(\omega_0 t + \phi_0)$$

Cette solution est vraie à tout instant pour connaître le mouvement du pendule.

- La pulsation propre est : $\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{g}{l}}$
- La période est :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

IV- Résonance

IV-1 Définition

Pour comprendre un peu mieux qu'est-ce que c'est un oscillateur harmonique, on va voir ce que c'est la résonance d'un oscillateur harmonique, c'est vraiment un phénomène qu'il faut le connaître pour avoir un sens physique aux lois physiques utilisées aux exercices que vous allez voir.

La résonance est un phénomène selon lequel certains systèmes physiques (électrique, mécanique...) sont sensibles à certaines fréquences. Un système résonant peut accumuler une énergie, si celle-ci est appliquée sous forme périodique et proche d'une fréquence dite (fréquence de résonance).

Un système susceptible d'entrer en résonance, c'est un système qui a la particularité de pouvoir emmagasiner temporairement de l'énergie sous deux formes : potentielle ou cinétique.

⇒ L'oscillateur est le phénomène par lequel l'énergie du système passe d'une forme à l'autre, de façon périodique.

IV-2 Oscillateur forcé – Système (masse-ressort)

Pour que le système (masse-ressort) (figure.5) soit forcé, on va ajouter à la masse une force $F(t)$ qui va être sinusoïdale :

-Force d'excitation : $F(t) = F_0 \cos wt$

- Alors, l'équation du mouvement du système forcé devient:

$$m \ddot{x} + kx = F(t)$$

$$m \ddot{x} + kx = F_0 \cos wt$$

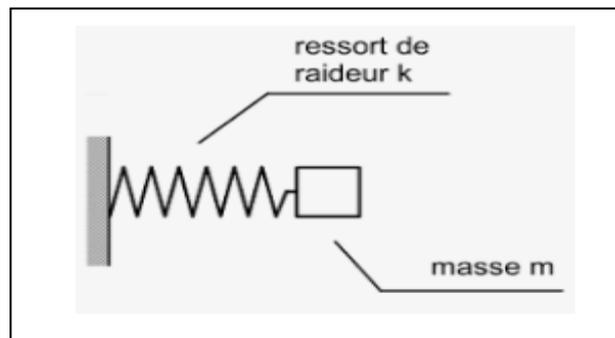


Figure.5 : Système – (masse-ressort).

Cette équation du mouvement accepte une solution particulière sous la forme :

$$x_{part} = C \cdot \cos wt$$

- Par un détail mathématique, on va trouver que : $C = \frac{F_0}{m(w_0^2 - w^2)}$

Par conséquent,

$$x_{part} = \frac{F_0}{m(w_0^2 - w^2)} \cdot \cos wt$$

Energie mécanique est donnée par :

$$E_m = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} k x^2$$

On va avoir une contribution la solution particulière à l'énergie.

Avec une contribution proportionnelle à C^2 est donc :

$$C^2 = \frac{F_0^2}{m^2(w_0^2 - w^2)^2}$$

Ce qu'on remarque ici, lorsqu'on chatouille notre oscillateur harmonique juste comme il faut avec w_0^2 (la pulsation propre) et lorsqu'on approche notre forçage (w) de la fréquence propre de l'oscillateur (w_0), on va avoir ce terme C^2 qui va diverger à l'infini ($+\infty$), donc l'oscillateur va accumuler de l'énergie que lui donne lorsque on applique cette force d'excitation jusqu'à avoir une énergie qui va exploser qui va devenir infinie .

Alors, lorsque $w \mapsto w_0 \Rightarrow E_m \mapsto \infty$

Mais, qu'est-ce-que ca veut dire :

- Ce terme est très physique où l'énergie mécanique ne peut pas t'envers l'infinie ($E_m \mapsto \infty$), sinon le système va exploser, c'est le cas des ponts notamment.
- Vous savez pourquoi les militaires ne marchent pas sur les ponts, c'est justement pour ne pas exciter le pont en marchant tous ces pas à sa pulsation propre et que le pont ne tombe pas sous l'effet d'une énergie forte qui devrez libérer dans le milieu, mais il ne sait pas comment de c'est effondré.
- Où alors, le 2^{ème} cas possible ce que les frottements du système vont dissiper cette énergie qu'on accumule assez vite pour que ne pas aller à la distribution ou explosion de notre système.

V- Applications

V-1 Utilisations de la résonance

La résonance permet de trier certaines fréquences, mais ne produit pas d'énergie. Le résonateur accumule de l'énergie.

a- Moteur deux temps.

Le pot d'échappement d'un moteur à deux temps (figure 6) a une forme bien particulière, calculée pour créer un phénomène de résonance qui améliore les performances du moteur en diminuant la consommation et la pollution. Cette résonance réduit partiellement les gaz imbrûlés et augmente la compression dans le cylindre.

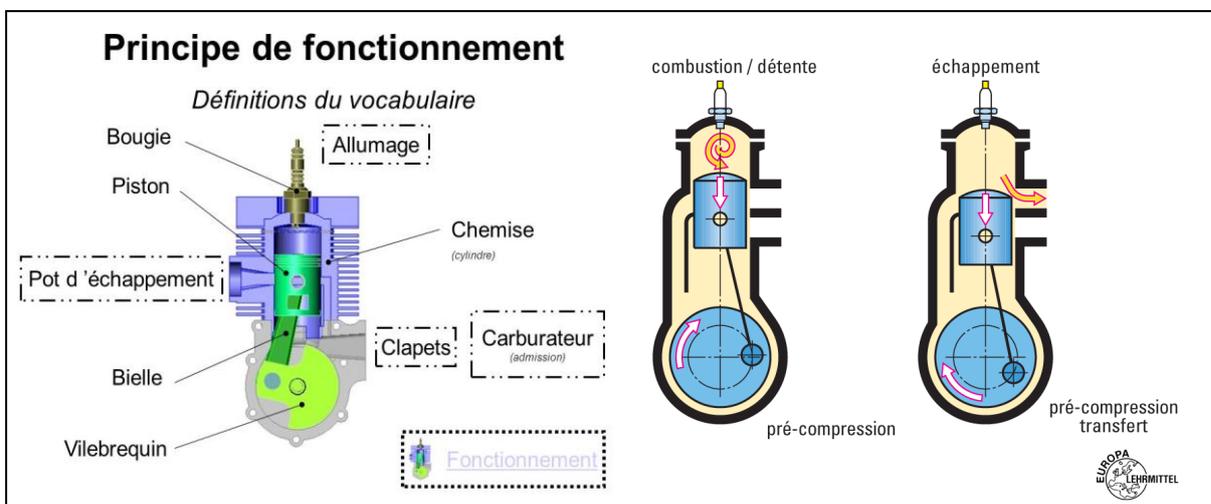


Figure 6 : Moteur à deux temps

b- Instruments de musique

Pour ce qui est des instruments à cordes frottées et à vent (figure 7), la production du son consiste la plupart du temps en l'excitation d'un système oscillant (corde, colonne d'air) jusqu'à l'apparition d'un phénomène de résonance.



Figure 7 : Instruments de musique (Guitare, Mandoline...)

c- Récepteurs radio

Chaque station de radio émet une onde électromagnétique avec une fréquence bien déterminée. Pour la capter, le circuit RLC (résistance, inductance, capacité) est mis en vibration forcée, par l'intermédiaire de l'antenne qui capte toutes les ondes électromagnétiques arrivant jusqu'à elle. Pour écouter une seule station, on doit accorder la fréquence propre du circuit RLC avec la fréquence de l'émetteur désiré, en faisant varier la capacité d'un condensateur variable (opération effectuée en agissant sur le bouton de recherche des stations).

D'une façon générale, tous les systèmes de radiocommunications, qu'ils soient émetteur ou récepteur, utilisent des résonateurs pour « filtrer » les fréquences des signaux qu'ils traitent : circuit RLC, résonateurs à quartz, résonateurs céramique, etc.

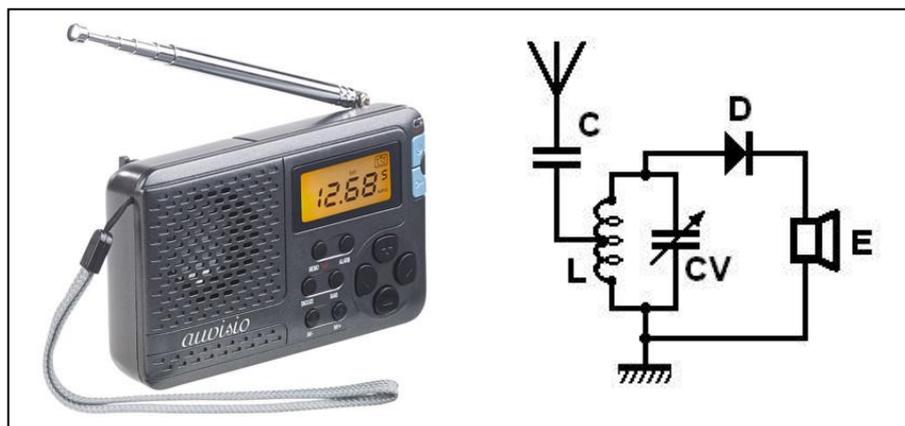


Figure 8 : Récepteur radio

d- Imagerie par résonance magnétique (IRM)

En 1946, les deux américains **Félix Bloch** et **Edward Mills Purcell** découvrent indépendamment le phénomène de Résonance Magnétique Nucléaire également appelé RMN (ce qui leur valut un **prix Nobel** de Physique). En plaçant un objet ou un tissu organique quelconque dans un champ magnétique, on peut connaître, grâce à un signal qu'émet cet objet, sa constitution.

En 1971, **Raymond Damadian** se rend compte que le signal émis par un tissu organique **cancéreux** est différent de celui qu'émet un tissu sain du même organe. Deux ans plus tard, **Paul Lauterbur** traduit le signal en images à deux dimensions. Apparaît alors l'**Imagerie par Résonance Magnétique (IRM)** (figure 9), proprement dite, créée à partir de séquences pondérées T1 et T2 émettant respectivement un signal noir ou blanc.

L'IRM subira encore quelques évolutions : le britannique **Peter Mansfield** applique la RMN des objets à structure interne complexe. Il deviendra, grâce à ses expériences poussées, l'un des pionniers de l'Imagerie par Résonance Magnétique dans des applications médicales. Par la suite, en 1971, **Richard Ernst** sera primé pour son travail **Spectroscopie à haute résolution par l'IRM** suivi du suisse **Kurt Wüthrich** en 2002 pour sa présentation Imagerie en 3D des macromolécules en solution.

L'IRM telle qu'on la connaît aujourd'hui après 60 ans d'histoire n'a pas fini son évolution et de nombreux progrès viendront encore. C'est grâce à une physique complexe et développée que l'IRM a su apporter aux sciences (en particulier en médecine) un nouveau moyen de progresser.



Figure 9 : Appareil de l'Imagerie par Résonance Magnétique, IRM.

- Fonctionnement simplifié de l'IRM

L'IRM utilise la résonance des protons d'un organisme pour fabriquer des images (figure 10). Les protons des molécules d'eau réagissent de façon spécifique au champ magnétique ; le corps humain est composé en majorité d'eau. Placé dans un intense champ magnétique, on excite les protons des molécules d'eau à l'aide d'une émission électromagnétique (radio-fréquence) jusqu'à les mettre en résonance. Avec une antenne, on mesure l'énergie rendue par les protons lors de l'arrêt de l'excitation. Un puissant ordinateur analyse et interprète les informations captées par l'antenne, en créant une image en trois dimensions.



Figure 10 : Imagerie par résonance magnétique IRM.

V-2. Inconvénients de la résonance

A- Automobiles

Les automobilistes sont souvent irrités par les bruits parasites qui apparaissent à une certaine vitesse du véhicule ou de rotation du moteur (figure 11). Certaines pièces mal amorties du moteur, ou de la carrosserie, entrent en résonance et émettent des vibrations sonores. L'automobile elle-même, avec son système de suspension, constitue un oscillateur muni d'amortisseurs efficaces qui évitent que le véhicule n'entre en résonance aiguë.

Le dessin des pneumatiques est parfois périodique. De ce fait le roulement produit un bourdonnement. Sur certains pneumatiques le dessin peut être légèrement déphasé pour atténuer ce phénomène.

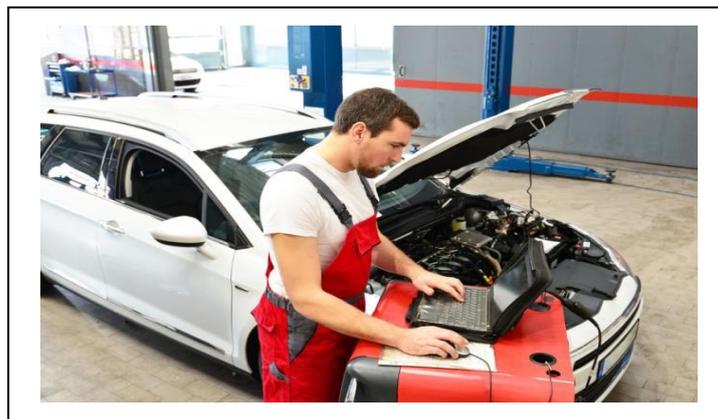


Figure 11 : Scanner Automobile

b- Navires

Les vagues engendrent des mouvements oscillatoires des navires (figure 12). Sur un navire libre, faute de raideur, les mouvements dans le plan horizontal (cavalement, embardée et lacet) ne peuvent être soumis à la résonance. Restent le roulis, le tangage et le pilonnement, ces deux derniers étant généralement assez amortis pour ne pas être critiques. Malheureusement la période propre de roulis tombe en général dans les périodes de vagues, le mouvement étant par ailleurs assez peu amorti. La meilleure solution pour lutter

contre ce phénomène consiste à éviter de prendre les vagues par le travers. Il est également possible d'augmenter l'amortissement en ajoutant à la coque des appendices nommés quilles de roulis.



Figure 12 : Mouvements oscillatoires des navires.

Sur les navires amarrés au large apparaît un autre phénomène, plus subtil, la dérive lente. En général, le système navire-amarrage a une période propre qui s'exprime en minutes. Elle ne peut donc être excitée par les vagues qui contiennent des périodes allant de quelques secondes à quelques dizaines de secondes mais l'excitation provient de termes non-linéaires. Ceux-ci créent de nouvelles fréquences sommes et différences de celles que contiennent les vagues, conformément à la formule de trigonométrie sur le produit de cosinus. Les forces correspondantes sont très petites mais, l'amortissement étant lui-même très faible, la résonance induit des mouvements qui peuvent déplacer d'une ou deux dizaines de mètres un navire de quelques centaines de milliers de tonnes.

C- Génie Civil

C-1. Ponts

- La Maine à Angers

Un pont peut effectuer des oscillations verticales, transversales ou de torsion. À chacun de ces types d'oscillations correspond une période propre ; si le tablier est suspendu (maintenu par des câbles accrochés aux piliers), le système a une fréquence de résonance bien différente.

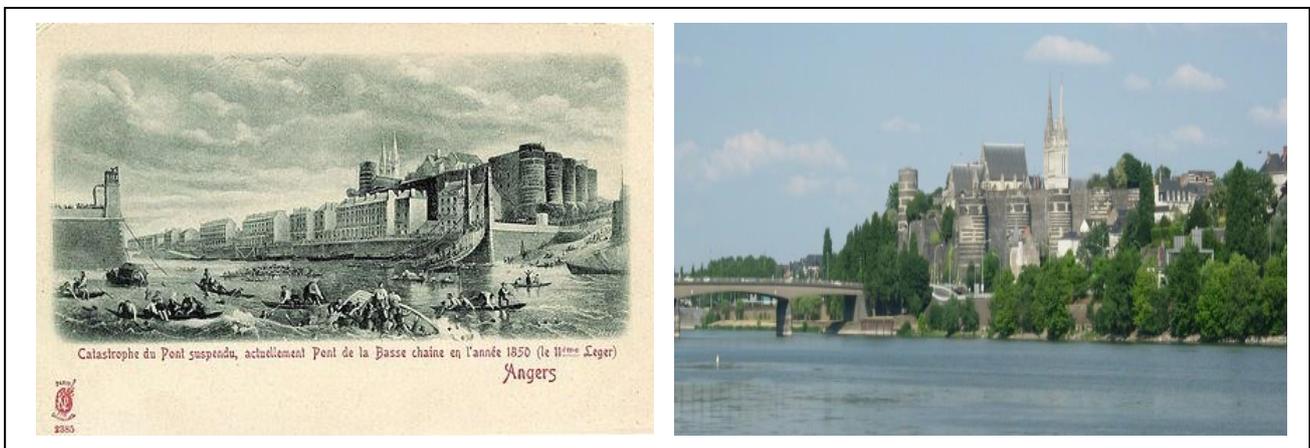


Figure 13 : Pont de la Basse-Chaine suspendu sur la Maine à Angers.

En 1850, une troupe traversant en ordre serré le pont de la Basse-Chaîne (figure 13), pont suspendu sur la Maine à Angers, provoqua la rupture du pont par résonance et la mort de 226 soldats. Pourtant, le règlement militaire interdisait déjà de marcher au pas sur un pont, ce qui laisse à penser que ce phénomène était connu auparavant.

- Le pont de Tacoma à Etats-Unis Washington

Le pont du détroit de Tacoma ou pont de Tacoma, est un pont suspendu des États-Unis situé dans l'État de Washington et permettant de franchir le détroit de Tacoma (figure 14).

En **1940**, de forts vents (de 65 à 80 km/h) provoquèrent la chute du **pont du détroit de Tacoma (États-Unis)**. Des vibrations de flexion transversale amenèrent la rupture d'un câble, puis du reste de l'œuvre. La première explication fournie s'appuyait sur l'excitation d'une résonance par le détachement périodique de tourbillons. En fait, la fréquence observée des vibrations était très inférieure à la fréquence de détachement qu'il est possible de calculer. Il sembla donc qu'il fallut abandonner, dans ce cas, l'explication par une *résonance* pour la remplacer par celle qui fait appel à la notion d'instabilité aéroélastique. Le mode de torsion devient instable, ce qui correspond à des oscillations d'amplitude croissante. La rupture peut alors survenir. L'instabilité se produit toujours au voisinage d'un mode propre et donc d'une fréquence propre dans le couplage fluide léger-structure, cas des problèmes d'aéroélasticité que l'on rencontre aussi sur les avions, sur les moteurs d'avion...

Le pont fut reconstruit en 2007 (figure 15), en tenant compte de ce problème et est toujours en place. Il double un ancien pont suspendu pour faire face à l'accroissement du trafic routier dans la région.

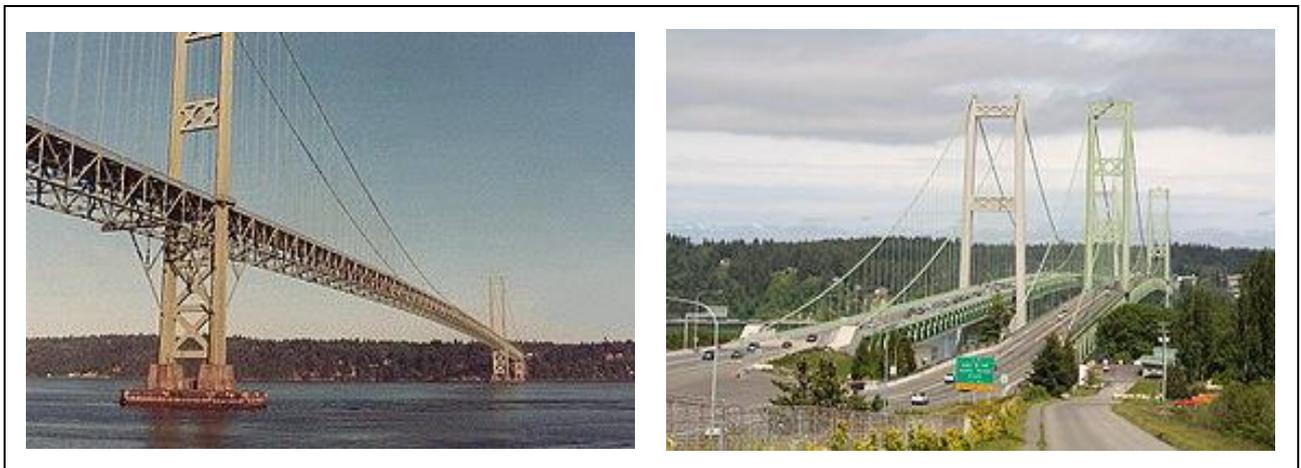


Figure 14 : Pont du détroit de Tacoma en 1950

Figure 15 : Les ponts de 1950 (à droite) et de 2007 (à gauche)

- Le pont du Millenium à Londres

Le pont du Millenium a été construit à Londres pour l'an 2000. Il dut être modifié à la suite d'un problème d'instabilité latérale engendré par le couplage de la marche des piétons avec le premier mode latéral. Un phénomène analogue fut rencontré à Paris à la même époque avec la passerelle Léopold-Sédar-Senghor.

- Le pont du Viaduc Morandi en Italie

C'est un pont de 1182 mètres construit en 1967, il a été conçu par Riccardo Morandi (figure 16). Sa hauteur est de 45m et 3 pylônes en béton armé culminent à 90m. Il a été inauguré en 1967. Sa construction a commencé en 1963 avec une structure mixte, en ciment armé précontraint et en ciment armé ordinaire. Il permet à l'autoroute A10 de traverser le torrent Polcevera à Gênes. Sa structure a par le passé été critiquée. Des travaux de maintenance de grande ampleur avaient été menés au début des années 1980, puis 1990. Le 14 août 2018, le pont s'est effondré vers 11h30 alors qu'un violent orage s'abattait sur la région de Gênes. D'après l'organisme météorologique ARPAL, la région de Ligurie était en vigilance orange pour les orages jusqu'à 15 heures.



Figure 16 : Pont du Viaduc Morandi en Italie.

C-2. Chemins de fer

La construction ferroviaire rencontre aussi des problèmes liés à la résonance. Les fils suspendus aux caténares constituent des oscillateurs liés entre eux. Afin d'éviter qu'ils se transmettent l'onde due au contact avec les trains, les caténares ne sont pas disposées à égales distances. Il en est de même pour les rails posés sur les traverses, mais le phénomène est observable pour des fréquences plus élevées.

Caténares : سلسال

Rail (traverse) : سكة حديدية

C-3. Bâtiments

Les grands buildings sont sensibles aux tremblements de terre. Certains dispositifs passifs permettent de les protéger: il s'agit d'oscillateurs (gros pendule suspendu en haut de l'immeuble) dont la fréquence propre est voisine de celle du bâtiment lui-même. Ainsi l'énergie est totalement absorbée par le pendule empêchant l'immeuble de se briser.

C-4. Résonances marines

Les ports sont le lieu d'ondes stationnaires de périodes bien définies appelées **seiches**. Dans certains sites, ces ondes peuvent être excitées par les trains de vagues, créant ainsi des oscillations horizontales qui peuvent être dommageables pour les bateaux amarrés.

Un phénomène analogue, à plus grande échelle, s'observe dans les golfes, l'excitation étant fournie par les ondes de marée. Il ne présente pas d'inconvénients particuliers et peut même être utilisé par des usines **marémotrices**.

Ondes de marée موجات المد

Marémotrices المد والجزر

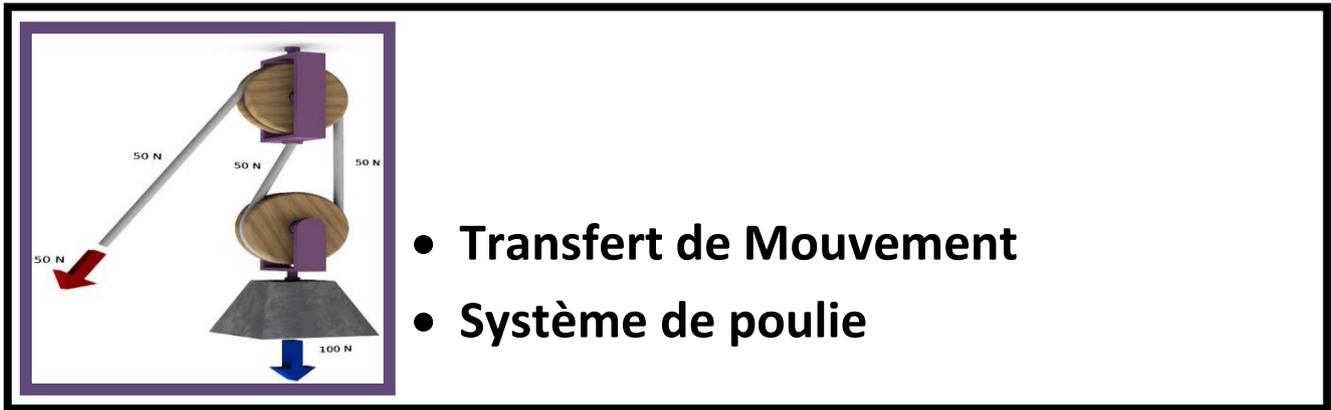
C-5. Résonances en aéronautique

Un hélicoptère peut, lorsqu'il est posé, produire un phénomène de résonance en rapport avec la rotation du rotor principal, il est souvent conseillé aux pilotes de décoller lorsque ce phénomène se manifeste pour éviter la dislocation de l'appareil.

Dans la propulsion des fusées à ergols liquides, il peut aussi se produire un phénomène oscillatoire longitudinal, provoqué par des fluctuations de poussée du moteur, qui engendrent des vibrations de structure et des colonnes du carburant liquide, qui à leur tour se répercutent sur l'alimentation du moteur. Lorsque ce cycle de perturbations entre en résonance, les oscillations augmentent et peuvent détruire les structures. On appelle ce type de résonance l'**effet pogo**.

V-3. Autres applications des oscillateurs harmoniques

- a/ Appareil de lavage de Cuve à rotation oscillation type Fury 402 ,
- b/ Sculpture en mouvement,
- c/ Casser un verre avec du son - fréquence de résonance,
- d/ Ondes pendulaires,
- e/ Morphose métallique (Metal Morphosis-Giant Métal),
- f/ Gande lumière,



I- Poulie

Une poulie est une machine simple c'est-à-dire un dispositif de mécanique élémentaire. Elle est constituée d'une pièce en forme de roue servant à la transmission du mouvement. La poulie est utilisée avec une courroie, une corde, une chaîne ou un câble et la forme de la jante étant adaptée aux cas d'utilisation.

Courroie: حزام

II- Transmission mécanique

Une transmission est un dispositif mécanique permettant de transmettre un mouvement d'une pièce à une autre. Cet élément de la chaîne d'énergie a pour fonction l'adaptation de la puissance au besoin.

La transmission du mouvement est l'une des fonctions les plus courantes des éléments de la mécanique générale, c'est-à-dire des dispositifs mécaniques destinés à remplacer la main de l'homme.

Selon les mécanismes, la transmission est dimensionnée suivant des considérations concernant :

- la position d'une partie du mécanisme ;
- le mouvement souhaité ;
- la force, ou le couple recherché ;
- la puissance.

III- Efficacité mécanique d'une poulie

Une poulie (ou un système de poulies) peut avoir différents usages. Une application immédiate consiste à pouvoir déplacer une charge dans une direction différente de celle d'application de la force. Cependant, il est également possible de démultiplier la force de levage en jouant sur le déplacement différentiel des éléments qui composent le système. Le principe, très simple, s'explique par la conservation du travail au sein du système (en l'absence de frottements).

Lorsque la charge F_0 est déplacée d'une distance u_0 , le travail fourni pour la déplacer égale à :

$$W = F_0 \cdot u_0 \quad (\text{eq.1})$$

Il est nécessairement égal au travail de la force appliquée à l'autre extrémité de la corde.

Ansî, si l'autre extrémité a été déplacée de u_1 (différents de u_0), la force appliqué F_1 vérifie :

$$F_0 \cdot u_0 = F_1 \cdot u_1 \quad (\text{eq.2})$$

Le rapport :

$$\frac{u_1}{u_0} = \frac{F_0}{F_1} \quad (\text{eq.3})$$

L'équation 3 est appelé **rapport de démultiplication**. La conception d'un système de poulies vise simplement à augmenter le plus possible ce rapport, en multipliant la longueur de corde nécessaire pour déplacer le point d'application de la charge.

Une autre explication utilise la mécanique statique pour observer que la charge appliquée sur une moufle est distribuée entre les différents brins traversant la moufle.

IV- Différents types de Poulies

a. Poulies Simples fixes

Il existe beaucoup de manières d'utiliser les poulies. Quand on emploie une seule poulie pour faire un travail, on dit qu'on a une configuration de poulie simple.

Le déplacement d'une charge est le cas d'utilisation le plus courant d'une poulie : une charge est accrochée à une extrémité d'une corde passant par une poulie fixée à un support, en exerçant une force suffisante à l'autre extrémité, on déplace la charge. Cette configuration est appelée **poulie simple fixe** (figure 17).

Une poulie simple fixe n'a l'avantage mécanique que de pouvoir exercer la force dans une direction différente à celle du déplacement, la force qui doit être appliquée est la même que celle qui est requise pour déplacer l'objet sans la poulie.

Le point d'ancrage doit supporter la force nécessaire au déplacement de l'objet plus la force de traction, soit environ deux fois cette force. En cas de levage, point d'ancrage au-dessus de la charge, cette force correspond au poids de l'objet (selon la direction de traction, on appelle cela l'effet poulie).

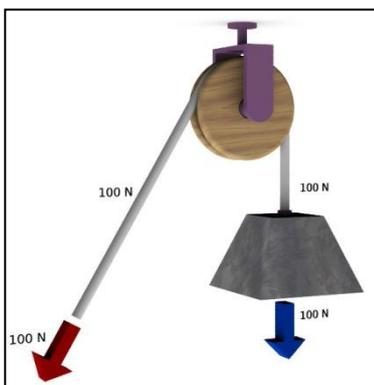


Figure 17 : Poulie simple fixe

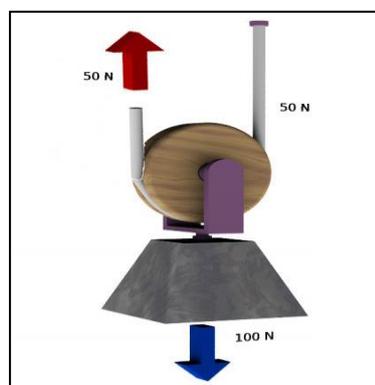


Figure 18 : Poulie simple mobile

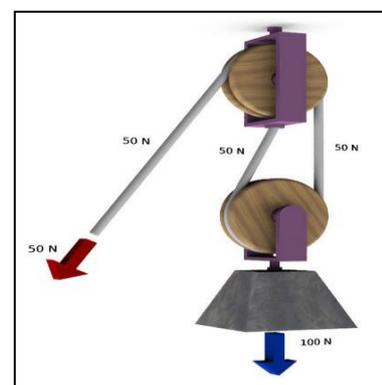


Figure 19 : Poulie composée

b. Poulies Simples mobiles

Une autre façon d'utiliser une poulie est de la fixer à la charge, de fixer une extrémité de la corde au support et de tirer avec l'autre extrémité, pour déplacer à la fois la poulie et la charge. Cette configuration est appelée **poulie simple mobile** (figure.18) ou **poulie inversée**.

La poulie simple mobile permet de réduire la force nécessaire au déplacement de moitié (le point d'ancrage supportant l'autre moitié), mais nécessite un déplacement de l'extrémité de corde tirée du double de la distance du déplacement de la charge.

c. Poulies composées

Quand on utilise des systèmes de plusieurs poulies qui travaillent ensemble, on dit qu'on a une configuration de poulies composées.

La configuration de poulies la plus commune est le palan (figure.19): les poulies sont distribuées en deux groupes (moufle), l'un fixe, l'autre mobile. Dans chaque groupe on installe un nombre arbitraire de poulies. La charge est unie au groupe mobile.

d. Palan

Un palan, c'est un jeu de poulies avec une corde (figure 20). Une des poulies est fixe et l'autre est solidaire d'un objet à déplacer. De ce fait, si l'on n'a qu'un seul fil à tirer, c'est comme si l'objet était retenu par deux fils.

Quand on tire sur le fil, alors l'objet monte, mais la poulie qui lui est attachée également. Le truc intéressant est le fil : si l'on tire de 1 mètre le fil vers nous, alors 0,50 mètres proviennent de chacun des « deux fils » par lequel l'objet est retenu:

Du coup, en tirant le fil d'un mètre vers vous, l'objet monte de 0,50 mètres.

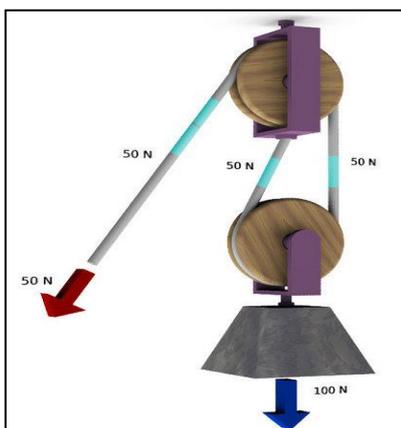


Figure 20 : Palan

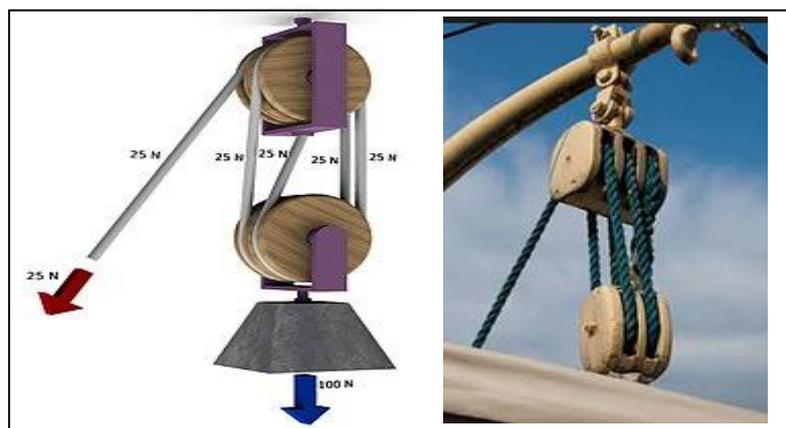


Figure 21 : Palan composé de deux moufles.

V- Avantage du palan pour réduire la force de traction

Maintenant comprenez ce qui se passe d'un point de vu physique.

Sans le palan, juste avec les mains, pour soulever le poids de 100 N (environ 10 kg) d'une hauteur de 1 mètre, il faut produire une force de 100 N vers le haut et produire un travail de 100 J.

Avec le palan, quand je tire 1 mètre sur le fil, le poids monte de seulement 0,50 mètre : la force à vaincre (la pesanteur) est toujours la même, mais la hauteur a été divisée par deux. Le travail fourni également : 50 J.

Maintenant raisonnons inversement : si tirer sur 1 mètre de fil produit un travail de 50 J, c'est comme si on avait soulevé un objet de 5 kg sans le palan. Autrement dit, l'usage du palan a permis de réduire la force nécessaire pour soulever l'objet (mais pas le travail).

Du coup, plutôt que de nécessiter de gros bras pour soulever 10 kg sur un mètre, il suffit de plus petits bras et soulever 5 kg sur deux mètres !

C'est comme si vous deviez porter un pack d'eau (12 kg) au premier étage : est-il plus facile de transporter le pack d'eau en une seule fois, ou de transporter les bouteilles une par une, quitte à faire 6 fois le trajet ? Faire les bouteilles une par une est ici plus simple, même si on marche davantage.

Le principe du palan fonctionne exactement pareil : certes, on tire le double de longueur de corde, mais la force requise s'en trouve diminuée. Ceci n'est pas un problème : la force de vos bras est limitée, mais pas la longueur de la corde !

Maintenant il existe aussi des palans multiples à 3, 4 ou plus de poulies (moufle), alors on divisera la force par 3, 4 ou plus. Une personne peut alors soulever des poids très importants. Ceci est utilisé un peu partout : sur les bateaux à voiles, par exemple, où tout ça est traditionnellement manuel, mais aussi dans les ascenseurs ou sur les grues : on voit les palans sur la photo d'en-tête, où 4 câbles (donc un palan à double poulie) tirent la charge vers le haut.

Le même principe, de division des forces en jouant sur les longueurs est utilisé dans les manivelles, les boites de vitesse, un cric,...

VI- Utilisation

a. Domaine de construction

On a fait longtemps usages de cordes et de poulies dans la construction, dans des machines simples ou complexes. L'usage des cordes dans la construction tend à disparaître au profit des Câbles de tractions en acier utilisés dans les treuils mécaniques et grues à tour (figure 22). Les cordes et poulies sont utilisées dans le bardage des pierres, dans les « machines » et « engins » de levage: (grues, gruaux).

D'une autre manière, la figure 23 montre une porte Coulissante Tringle Rail Acier Inoxydable Coulissant (Système de Voie Roue de Poulie de Rail de Porte Suspendu).



Figure 22 : Grue avec ses poulies et ses



*Figure 23 : Porte Coulissante Tringle Rail
Acier Inoxydable Coulissant.*

b. Domaine automobile et motocycliste

Les premières motos des années 1910 ont souvent utilisé une courroie de transmission secondaire entre la boîte de vitesses et la roue arrière, portant une poulie de faible diamètre, ou la transmission directe entre le moteur et la roue, avec une immense poulie sur jante toutefois la courroie était sujette à diverses faiblesses: rupture, patinage par projection d'huile ou temps de pluie, perte de puissance par échauffement, limitation de la puissance transmissible par rupture, qui a finalement fait préférer la chaîne à rouleaux (dite chaîne Galle).



Figure 24 : Vélo.

c. Domaine industriel

Les usines de la fin XIX^e siècle et du début XX^e (première Révolution Industrielle) présentaient un aspect caractéristique, qui survit encore sur les icônes cartographiques et les panneaux signalétiques : ligne de toiture en dents de crocodile, immense cheminée en brique à l'extrémité, qui s'explique par le mode d'entraînement des machines -outils.

Cette architecture s'explique par la présence à une extrémité d'une unique machine à vapeur, très lourde, très encombrante, avec sa chaudière à charbon et sa cheminée, dont le volant moteur porte une poulie menante, qui transmet, via de longues courroies plates sa puissance à une cascade d'arbres transversaux portant des poulies, logées en hauteur, au niveau des dents de crocodile de la toiture. De là d'autres poulies et courroies, descendant du plafond, entraînaient les machines outils à chaque poste de travail. Ces dizaines de courroies et de poulies constituaient autant de risques d'accident du travail, en happant vêtements, bras ou main. Indirectement ces poulies et courroies sont responsables de la mode de la coiffure "à la garçonne" des années 1920 plus adapté au monde du travail.

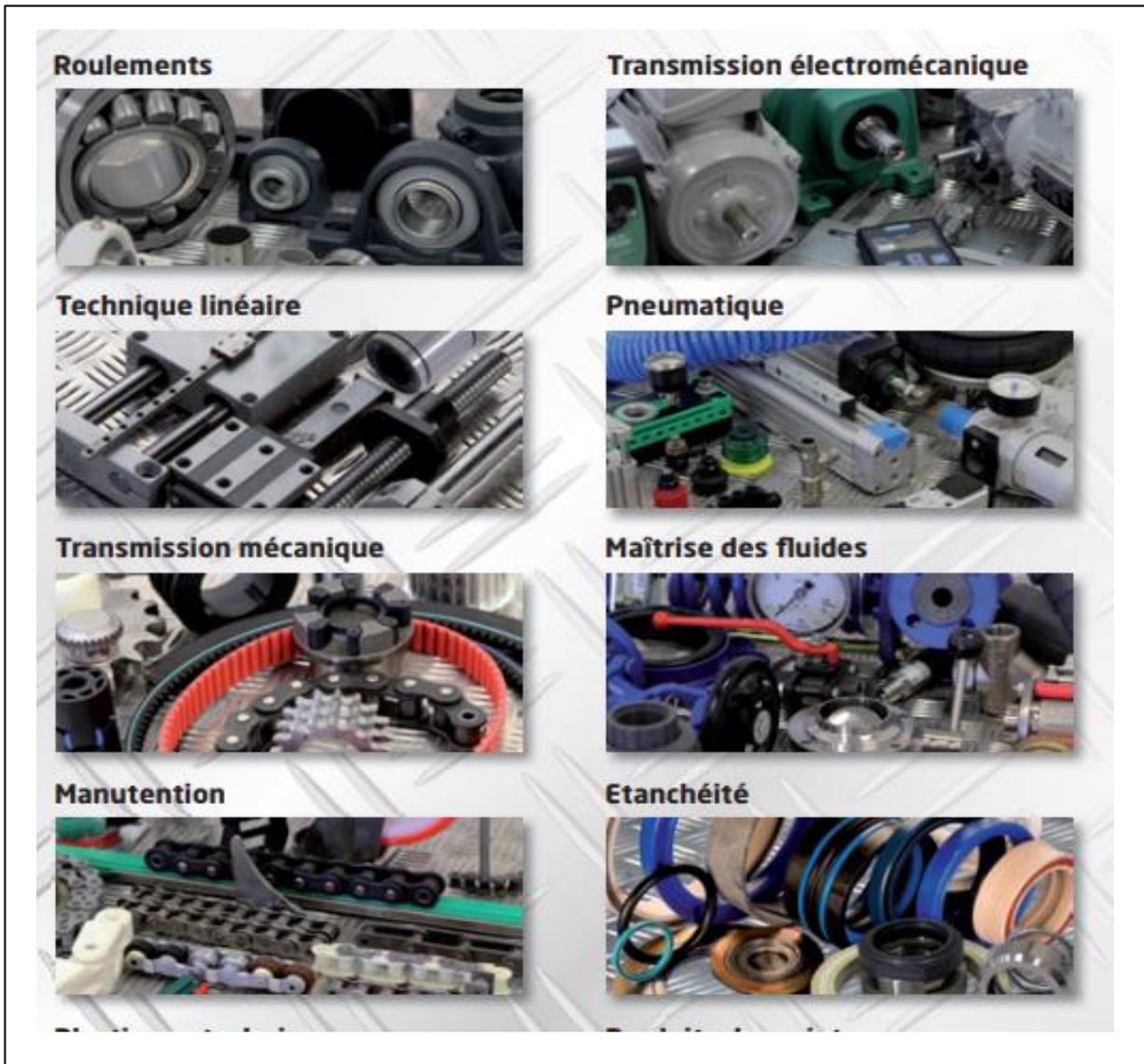


Figure 25 : Différents domaines.

Le même genre de systèmes d'entraînement (avec les mêmes risques) a existé au début du machinisme agricole pour entraîner une batteuse ou un autre ustensile par la poulie motrice d'une locomobile.

d. Domaine marine

Dans la marine, les poulies sont utilisées pour des usages multiples mais surtout pour gérer la voilure du navire : hisser les voiles, border les écoutes, régler les parties du gréement tels que hale-hauts, hale-bas, etc. Les poulies peuvent permettre de ramener l'ensemble des manœuvres courantes vers un point central, le cockpit, élément indispensable pour pratiquer la voile en solitaire.

Le choix d'une poulie pour un usage déterminé obéit à des règles précises: diamètre du filin, matériau (textile ou métallique) diamètre minima de courbure, effort maximal en charge, usage en gréement courant ou dormant, etc.



Figure 26 : Poulie de bateau / guide pour système de direction.