**CHAPITRE 14**

# Énergétique du point matériel

La **dynamique** permet d'étudier le mouvement d'un point matériel.

Comme toutes les branches de la physique, la mécanique se prête également à une **approche énergétique**.

Cette démarche alternative et complémentaire a deux avantages :

▷ elle permet d'enrichir la compréhension des phénomènes ;

▷ elle s'avère parfois plus simple à mettre en œuvre que la dynamique, notamment dans les cas de conservation de l'énergie mécanique au cours du mouvement.

Notre point de départ pour présenter l'étude énergétique du mouvement sera le suivant : dans le référentiel choisi pour étudier le mouvement d'un point matériel $M$, un système se déplace d'un point $A$ à un point $B$ sous l'effet d'une force $\vec{F}$.

On se demande si cette force :

— aide à effectuer ce mouvement : on la qualifie alors de **force motrice** ;

— gêne le mouvement : on la qualifie alors de **force résistante**.

En vue de répondre à cette question, on introduit deux grandeurs de nature énergétique : le **travail** et la **puissance** de cette force.

## 1 Puissance et travail d'une force

### 1.1 Travail d'une force constante

Si la force $\vec{F}$ reste constante au cours du déplacement, on définit le **travail** de cette force entre les points $A$ et $B$ par la relation :

$$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB},$$

où la notation $\cdot$ désigne le **produit scalaire**. Le travail est une **grandeur algébrique** : elle peut prendre des valeurs positives ou négatives.

Nous justifierons plus bas que :

▷ Si $W_{AB}(\vec{F}) > 0$, alors la force a, globalement sur l'ensemble de la trajectoire, un caractère **moteur**.

▷ Si $W_{AB}(\vec{F}) < 0$, alors la force a, globalement sur l'ensemble de la trajectoire, un caractère **résistant**.

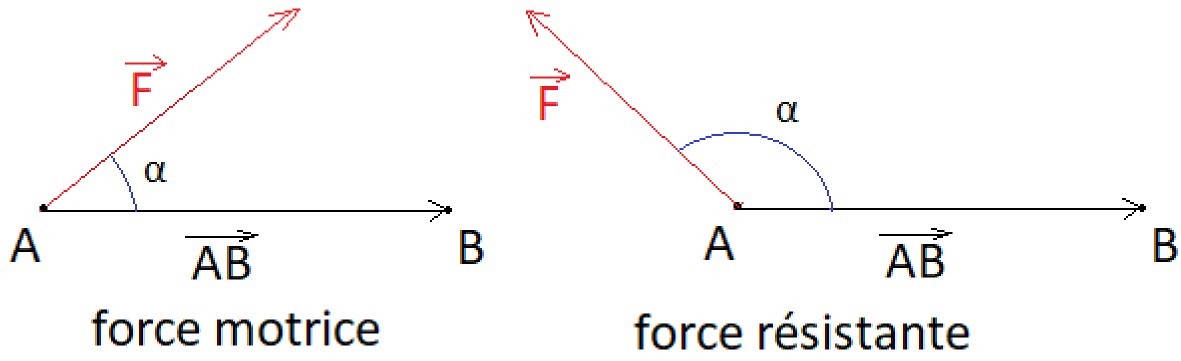
▷ Si $W_{AB}(\vec{F}) = 0$, alors la force ne travaille pas.

En se rappelant des propriétés du produit scalaire, on constate que

$$W_{AB}(\vec{F}) = ||\vec{F}|| \times ||\overrightarrow{AB}|| \times \cos(\alpha) = F \times AB \times \cos(\alpha),$$

où $\alpha$ désigne l'angle formé entre le vecteur déplacement et le vecteur force et $\cos$ la fonction mathématique cosinus.

Comme $\cos(\alpha) > 0$ pour un angle aigu et $\cos(\alpha) < 0$ pour un angle obtus, on conclut que dans le premier cas le travail est moteur, dans l'autre résistant. Si $\alpha = 90°$, le travail est nul car alors $\cos(\alpha) = 0$.




## 1.2 Puissance d'une force

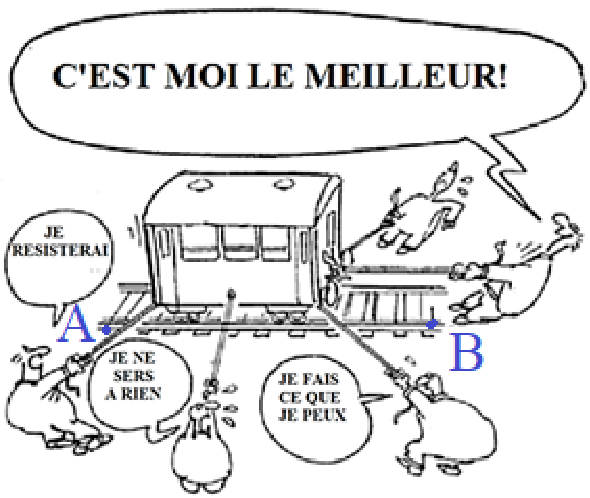
Si on note $\vec{v}$ le **vecteur vitesse** à un instant quelconque, on définit la **puissance** à cet instant par la relation :

$$P = \overrightarrow{F} \cdot \vec{v}.$$

La puissance est une grandeur algébrique.
Nous justifierons plus bas que :
▷ Si $P > 0$, alors la force a, localement à cet instant précis, un caractère moteur.
▷ Si $P < 0$, alors la force a, localement à cet instant précis, un caractère résistant.

Ainsi, un calcul de travail apporte une réponse globale, tandis qu'un calcul de puissance apporte une réponse locale à la question posée en début de chapitre.

**Exercice d'application 1 :**
CAPACITÉ TRAVAILLÉE :
*Reconnaître le caractère moteur ou résistant d'une force.*




Pour faire avancer un wagon d'un point A (à gauche sur le dessin) vers un point B (plus à droite sur le dessin), plusieurs personnages exercent, via une corde, une force constante sur ce dernier, de même valeur mais dans des directions et des sens différents.

Le personnage $P_1$ est le plus efficace ; $P_2$ et $P_3$ arrivent en deuxième position. $P_4$ a bien raison : il ne sert à rien pour faire avancer le wagon de $A$ vers $B$ ; quant à $P_5$, il n'a rien compris ! S'il était seul, il aurait tendance à le faire reculer...

1. Attribuer à chaque personnage un numéro (de 1 à 5) en accord avec le texte ci-dessus.

2. Représenter sur un même schéma la force exercée sur le wagonnet par chaque personnage, en vue de dessus. Pour simplifier, on fera comme si ces forces avaient toutes le même point d'application : le point $A$. Ajouter sur ce schéma le vecteur déplacement $\overrightarrow{AB}$ et le vecteur vitesse $\vec{v}$ du wagon.

3. En vous appuyant sur le schéma de la question 2 et sur la définition du travail d'une force, répondre aux questions suivantes :

3.a. Quel(s) personnage(s) fourni(ssen)t un travail moteur ?

3.b. Quel(s) personnage(s) fourni(ssen)t un travail résistant ?

3.c. Quel(s) personnage(s) fourni(ssen)t un travail nul ?

4. Reprendre la question 3 en vous appuyant sur la notion de puissance. Commenter.

Dans l'exercice ci-dessus :

▹ On fait le lien entre les propriétés du travail et de la puissance affirmées plus haut et ce que nous dicte notre sens physique ; reste à démontrer ces propriétés par un raisonnement rigoureux.

▹ On devine que les deux approches (en termes de travail et de puissance) sont liées, et qu'il doit donc exister une relation entre travail et puissance, à déterminer par la suite.

▹ Les forces étaient supposées constantes au cours du mouvement, ce qui est assez restrictif. On aimerait pouvoir définir le travail d'une force variable au cours du mouvement.

## 1.3 Travail élémentaire d'une force, lien entre travail et puissance

L'inconvénient de la définition du travail proposée plus haut est que, contrairement à celle de la puissance (qui est définie à chaque instant), elle ne peut pas s'appliquer si la force varie au cours du mouvement. Néanmoins, sur une durée infinitésimale ("infiniment courte, tout en étant non nulle") on peut définir un **travail élémentaire** :

$$\delta W(\vec{F}) = \vec{F} \cdot d\overrightarrow{OM},$$

où $d\overrightarrow{OM}$ désigne le **déplacement élémentaire** du système. Le travail élémentaire représente le travail lors d'un déplacement élémentaire.

En raisonnant sur une échelle de temps infinitésimale, on a mis en évidence le lien entre travail et puissance d'une force :

$$\delta W(\vec{F}) = \vec{F} \cdot d\overrightarrow{OM} = \vec{F} \cdot \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} dt = \vec{F} \cdot \vec{v} dt = P dt.$$

Le travail a la dimension du produit d'une puissance et d'un temps, il s'agit donc d'une énergie et $1J = 1N{\cdot}m = 1W{\cdot}s$.

**Exercice d'application 2 :**

CAPACITÉ TRAVAILLÉE :
*Déterminer le travail d'une force au cours d'un déplacement élémentaire.*

1. Rappeler l'expression du déplacement élémentaire en coordonnées cartésiennes.
2. Rappeler l'expression de la force de pesanteur dans le référentiel terrestre et en déduire celle du travail de cette force lors d'un déplacement élémentaire.
3. Rappeler la loi de Hooke, qui donne l'expression de la force de rappel d'un ressort dans le régime linéaire. On suppose ce ressort horizontal, orienté suivant un axe (Ox). On note $u = x - l_0$, où $l_0$ est la longueur à vide du ressort. Exprimer le travail de la force de rappel en fonction de $u$ et de la raideur $k$ du ressort lors d'un déplacement élémentaire.
4. Rappeler l'expression du déplacement élémentaire en coordonnées polaires.
5. Représenter sur un schéma un pendule simple et les trois principales forces qui s'exercent sur la masse accrochée au fil tendu : la force de pesanteur $\vec{P}$, la force de tension du fil $\vec{T}$ et la force de frottement fluide $\vec{f} = -\lambda \vec{v}$. Exprimer le travail de chacune de ces forces lors d'un déplacement élémentaire.

### 1.4 Travail d'une force quelconque

Par construction, on obtient le travail entre deux points A et B d'une force variable en additionnant tous les travaux infinitésimaux le long de la trajectoire entre A et B. Une sommation de contributions élémentaires est par définition une intégrale, d'où la définition générale du travail d'une force :

$$W_{AB}(\vec{F}) = \int_A^B \delta W(\vec{F}) = \int_A^B \vec{F} \cdot d\overrightarrow{OM}.$$

## 2 Effet d'un travail ou d'une puissance sur le mouvement : théorèmes énergétiques

Pour être utiles, les notions de puissance et de travail doivent apporter des informations quantitatives sur le mouvement, notamment sur la valeur de la vitesse.

Intuitivement, une puissance motrice ou un travail moteur aura tendance à augmenter la valeur de la vitesse du point M, tandis qu'une puissance résistante ou un travail résistant aura tendance à diminuer la valeur de la vitesse du point M.

Dans le cadre d'une approche énergétique, on introduit une grandeur énergétique associée à la vitesse dans le référentiel choisi.

### 2.1 Énergie cinétique d'un point matériel

L'**énergie cinétique** est la grandeur énergétique que possède un système du fait de son mouvement. Il faut la lui retirer pour qu'il soit au repos, ce qui se fait par une transformation en une autre forme d'énergie.

L'**énergie cinétique d'un point matériel** M est définie par la relation :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2,$$

où $m$ désigne la masse du point matériel. Si cette masse est exprimée en kilogramme (kg) et la vitesse en mètre par seconde ($m \cdot s^{-1}$), alors cette énergie est exprimée en joule (J).

Sa valeur est d'autant plus grande que :

▷ le système est lourd ;

▷ le système se déplace rapidement. L'énergie cinétique augmente rapidement avec la valeur de la vitesse (de façon quadratique).

On souhaite à présent faire le lien entre les grandeurs puissance et travail et leur effet attendu, à savoir une variation de l'énergie cinétique du système. Cela va se faire par le biais de deux **théorèmes énergétiques**, valables dans un référentiel galiléen.

## 2.2 Théorème de la puissance cinétique

▷ Le **théorème de la puissance cinétique** indique que la variation instantanée de l'énergie cinétique d'un point matériel est égale à la puissance cinétique des forces exercées sur ce système :

$$\frac{d\mathrm{E}_c}{dt} = \mathrm{P} = \Sigma \overrightarrow{\mathrm{F}} \cdot \vec{v}.$$

Il se démontre en partant de la deuxième loi de Newton et en utilisant les définitions de l'énergie cinétique et de la puissance.

## 2.3 Théorème de l'énergie cinétique

▷ Le **théorème de l'énergie cinétique** indique que la variation de l'énergie cinétique d'un point matériel lors de son déplacement entre deux points $\mathrm{A}$ et $\mathrm{B}$ est égale au travail des forces exercées sur ce système :

$$\Delta \mathrm{E}_c = \mathrm{E}_c(\mathrm{B}) - \mathrm{E}_c(\mathrm{A}) = \mathrm{W}_{\mathrm{AB}}(\Sigma \overrightarrow{\mathrm{F}}) = \Sigma \mathrm{W}_{\mathrm{AB}}(\overrightarrow{\mathrm{F}}).$$

Il se démontre par intégration, à partir du théorème de la puissance cinétique.

Dans chaque situation, on choisit le théorème le plus adapté :

▷ Le théorème de la puissance cinétique donne des informations à un instant quelconque ; il permet de suivre l'évolution temporelle de la vitesse ;

▷ Le théorème de l'énergie cinétique donne des informations sur une variation de vitesse entre deux instants, mais ne dit rien sur ce qui se passe entre ces deux instants. Il permet de faire un bilan entre une situation initiale et une situation finale.

**Exercice d'application 3 :**

CAPACITÉ TRAVAILLÉE :

*Utiliser le théorème approprié en fonction du contexte.*

On modélise par un point matériel $\mathrm{M}$ un satellite en mouvement circulaire dans le référentiel géocentrique, supposé galiléen.

1. Nommer la principale force à laquelle le système est soumis et donner son expression mathématique. Vous expliciterez les notations introduites.

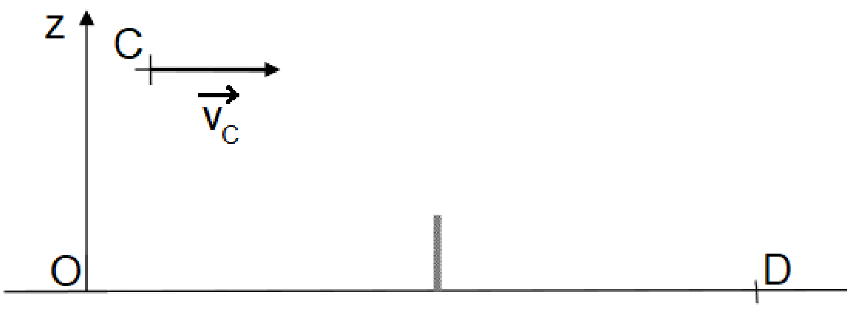
2. En utilisant un théorème énergétique, montrer que ce satellite a un mouvement uniforme dans le référentiel géocentrique.

3. Rappeler une autre méthode permettant d'aboutir au même résultat. Commenter.

**Exercice d'application 4 :**

On s'intéresse au mouvement de la balle lors d'un service au tennis, c'est-à-dire une fois qu'elle a quitté la raquette, venant d'être frappée par le joueur qui engage. Toutes les forces sont négligées, sauf le poids.

La position initiale de la balle est notée C, lieu où le contact est rompu avec la raquette. Son altitude est notée $z_C$. La vitesse de la balle en C, supposée horizontale, est notée $\vec{v}_C$. Le schéma de la situation est représenté ci-dessous sans souci d'échelle. La balle atteint le sol au point D, à la vitesse de norme $v_D$ et à la même altitude que l'origine du repère choisi.




1. Compléter la figure ci-dessus en représentant l'allure de la trajectoire de la balle lors du service.

2. Montrer à l'aide d'un théorème énergétique que la vitesse au point d'impact s'écrit : $v_D = \sqrt{v_C^2 + 2gz_C}$. Commenter.

3. Déterminer la valeur de $v_D$ pour $z_C = 2,80$ m et $v_C = 200$ km·h$^{-1}$. Commenter.

## 2.4 Force conservative et énergie potentielle

Le travail de la force de pesanteur entre deux points A et B vaut

$$W_{AB}(\vec{P}) = -mg(z_B - z_A) = -mg\Delta z,$$

où $z$ désigne l'altitude du point M par rapport à une altitude de référence.

On constate que le travail de la force de pesanteur a une propriété intéressante : il ne dépend que de la différence d'altitude entre les points A et B. Ces altitudes sont des caractéristiques des points de départ et d'arrivée, le travail du poids ne dépend donc pas de la trajectoire empruntée pour aller de A à B.

Une telle force, dont le travail entre deux points ne dépend pas de la trajectoire empruntée, est qualifiée de **conservative**. Par opposition, une force dont le travail entre deux points dépend de la trajectoire empruntée est qualifiée de **non conservative**. C'est le cas des forces de frottement.

On définit alors la **variation d'énergie potentielle** $\Delta E_p$ entre deux points A et B sous l'effet d'une force conservative $\vec{F}_c$ par la relation :

$$\Delta E_p = E_p(B) - E_p(A) = -W_{AB}(\vec{F}_c).$$

Pour un travail infinitésimal, cette expression devient :

$$dE_p = -\delta W(\vec{F}_c) = -\vec{F}_c \cdot d\overrightarrow{OM}.$$

Cette expression permet de calculer l'énergie potentielle par un calcul de primitive.

En tant que primitive, l'énergie potentielle possède la propriété suivante : elle n'est définie qu'à une constante d'intégration additive près, qui correspond à un choix arbitraire d'origine de l'énergie potentielle.

**Exercice d'application 5 :**

CAPACITÉ TRAVAILLÉE :

*Établir et citer les expressions de l'énergie potentielle de pesanteur (champ uniforme) et de l'énergie potentielle élastique.*

1. Rappeler l'expression du travail élémentaire de la force de pesanteur en coordonnées cartésiennes (vous préciserez l'orientation choisie pour l'axe des cotes (Oz)).
2. Par un calcul de primitive, établir l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur dans le référentiel terrestre. Proposer un choix de valeur pour la constante d'intégration.
3. Rappeler l'expression du travail élémentaire de la force de rappel d'un ressort en coordonnées cartésiennes pour un ressort horizontal suivant l'axe (Ox).
4. Par un calcul de primitive, établir l'expression de l'énergie potentielle élastique. Proposer un choix de valeur pour la constante d'intégration.

Le poids $\overrightarrow{P} = m\vec{g}$, avec $\vec{g}$ uniforme, dérive de l'**énergie potentielle de pesanteur** :

$$E_{pp} = mgz + C$$

si (Oz) est un axe vertical ascendant, ou

$$E_{pp} = -mgz + C$$

si (Oz) est un axe vertical descendant, avec $C$ une constante d'intégration qu'on fixe arbitrairement. En général, on la choisit nulle, de sorte que l'énergie potentielle est nulle au niveau du sol.

La signification physique de l'énergie potentielle de pesanteur est la suivante : il s'agit de l'énergie associée à la position du système, qu'il emmagasine en gagnant de l'altitude. Elle est qualifiée de potentielle, car elle peut être exploitée pour produire du mouvement si elle est convertie en énergie cinétique.

La force de rappel d'un ressort $\overrightarrow{F}_R = -k(l - l_0)\vec{u}$ dérive de l'**énergie potentielle élastique** :

$$E_{pe} = \frac{1}{2}k(l - l_0)^2 + C$$

où la constante d'intégration $C$ peut être fixée arbitrairement. En général, on la choisit nulle, de sorte que l'énergie potentielle est nulle lorsque le ressort est au repos.

La signification physique de l'énergie potentielle élastique est la suivante : il s'agit de l'énergie associée à la position du système, qu'il emmagasine quand on étire ou qu'on comprime le ressort. Elle est qualifiée de potentielle, car elle peut être exploitée pour produire du mouvement si elle est convertie en énergie cinétique. Quand on lâche un ressort comprimé ou étendu, des oscillations ont lieu, donnant lieu à des conversions entre énergie potentielle et cinétique.

## 2.5 Énergie mécanique

L'énergie que possède un système du fait de sa position et de son mouvement dans un référentiel donné est appelée **énergie mécanique**, et notée $E_m$. Par définition, elle est égale à la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle totale :

$$E_m = E_c + E_p.$$

Les variations de cette grandeur sont décrites par deux théorèmes énergétiques.

## 2.6 Théorème de la puissance mécanique

▹ Le **théorème de la puissance mécanique** précise que dans un référentiel galiléen, la variation instantanée d'énergie mécanique est égale à la puissance des forces non conservatives :

$$\frac{dE_m}{dt} = P(\Sigma \overrightarrow{F}_{nc}) = \Sigma P(\overrightarrow{F}_{nc}).$$

## 2.7 Théorème de l'énergie mécanique

▹ Le **théorème de l'énergie mécanique** précise que dans un référentiel galiléen, la variation de l'énergie mécanique lors du mouvement d'un système entre deux points $A$ et $B$ est égale au travail entre ces deux points des forces conservatives :

$$\Delta E_m = E_m(B) - E_m(A) = W_{AB}(\Sigma \overrightarrow{F}_{nc}) = \Sigma W_{AB}(\overrightarrow{F}_{nc}).$$

Ce théorème peut être mis à profit de différentes manières :

▹ on peut se servir de la variation de l'énergie mécanique pour calculer le travail des forces non conservatives, typiquement les frottements, et éventuellement remonter à leur expression ;

▹ on peut se servir de l'expression des forces non conservatives pour calculer la variation d'énergie mécanique, et éventuellement en déduire une variation de vitesse ou de position au cours du mouvement ;

▹ en l'absence de forces non conservatives, ou si les forces non conservatives ne travaillent pas, la **conservation de l'énergie mécanique** permet de lier variation de position et variation de vitesse. En particulier, l'expression $E_m =$ constante est qualifiée d'**intégrale première du mouvement**, et le mouvement est qualifié de **conservatif**.

**Exercice d'application 6 :**

CAPACITÉS TRAVAILLÉES :

*Identifier les cas de conservation de l'énergie mécanique.*

*Utiliser les conditions initiales.*

*Réaliser le bilan énergétique d'un oscillateur mécanique en absence de frottement en régime libre.*

1. On lance une balle avec une vitesse initiale $\overrightarrow{v_0}$ vers le haut depuis l'altitude $z = 0$. Déterminer la hauteur maximale atteinte par la balle en négligeant tout frottement.

2. On considère un pendule simple (masse $m$ ponctuelle, longueur $l$, frottements négligés). On fait partir ce pendule d'un angle $\theta = 0$ en lui communiquant une vitesse initiale $v_0$. Déterminer l'expression de l'amplitude $\theta_m$ du mouvement.

3. On considère un point matériel $M$ de masse $m$ accroché horizontalement à un ressort de raideur $k$. Il est écarté de sa position d'équilibre d'une distance $u_0$ puis lâché sans vitesse initiale. Il se met à osciller sans frottement le long d'un axe (Ox).

3.a. Écrire son énergie mécanique en fonction de l'écart à la position d'équilibre $u$, de sa dérivée par rapport au temps $\dot{u}$, de $m$ et de $k$.

3.b. Justifier que l'énergie mécanique se conserve au cours du mouvement, et en déduire l'équation du mouvement. Commenter.

3.c. Résoudre cette équation différentielle en tenant compte des conditions initiales, puis représenter graphiquement l'allure de $u(t)$.

# 3 Mouvement conservatif à un degré de liberté

Un point matériel est dit **à un degré de liberté** si son repérage dans l'espace ne nécessite qu'un seul paramètre (abscisse $x$, angle $\theta$, etc...). Dans ce qui suit, on considérera pour fixer les idées qu'il s'agit d'une abscisse $x$.

Ce point matériel est **en mouvement conservatif** s'il n'est soumis qu'à des forces conservatives et des forces qui ne travaillent pas, donc de puissance nulle. Son énergie mécanique est alors constante.

L'énergie potentielle peut être représentée graphiquement en fonction de l'abscisse du point $\mathrm{M}$, le graphe de $\mathrm{E}_p(x)$ permet de caractériser qualitativement le mouvement, en gardant en tête la propriété suivante :

$$d\mathrm{E}_p = -\delta \mathrm{W}(\overrightarrow{\mathrm{F}}_c) = -\overrightarrow{\mathrm{F}}_c \cdot d\overrightarrow{\mathrm{OM}} = -\mathrm{F}_x dx$$

soit

$$\mathrm{F}_x = -\frac{d\mathrm{E}_p}{dx}.$$

▹ Une **position d'équilibre** est une abscisse $x_{eq}$ où le point $\mathrm{M}$ peut rester immobile. Cela implique qu'il n'accélère pas. La deuxième loi de Newton indique que la résultante des forces dans la direction du mouvement est nulle, et comme ces dernières dérivent d'une énergie potentielle pour un mouvement conservatif, cela se traduit par :

$$\frac{d\mathrm{E}_p}{dx}(x_{eq}) = 0.$$

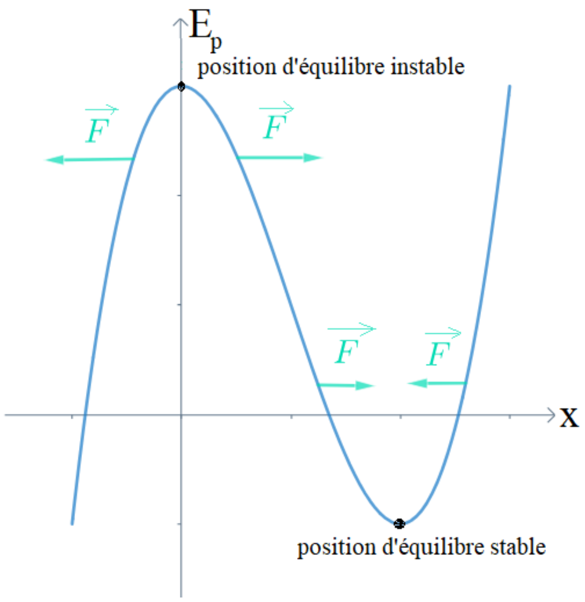
Ainsi, une position d'équilibre se traduit par un **extremum (maximum ou minimum) local d'énergie potentielle**.

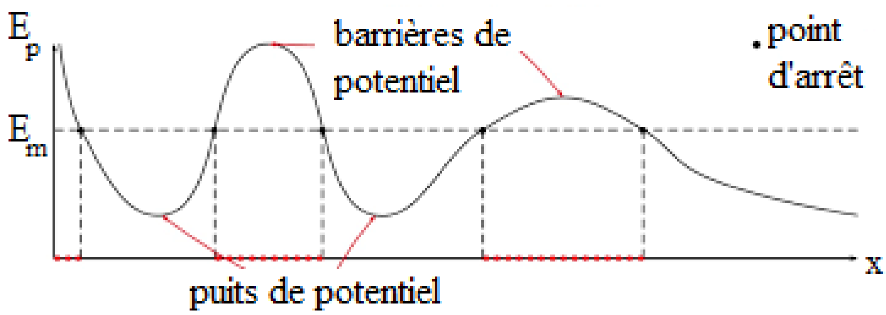
▹ Une position d'équilibre est **stable** si, lorsque $\mathrm{M}$ est écarté légèrement de cette position, il a tendance à y revenir. Elle est **instable** si, lorsque $\mathrm{M}$ est écarté légèrement de cette position, il continue de s'en éloigner. Le lien entre force et dérivée de l'énergie potentielle permet de justifier qu'une **position d'équilibre stable** correspond à un minimum local d'énergie potentielle :

$$\frac{d^2\mathrm{E}_p}{dx^2}(x_{eq}) > 0$$

tandis qu'une **position d'équilibre instable** correspond à un maximum local d'énergie potentielle :

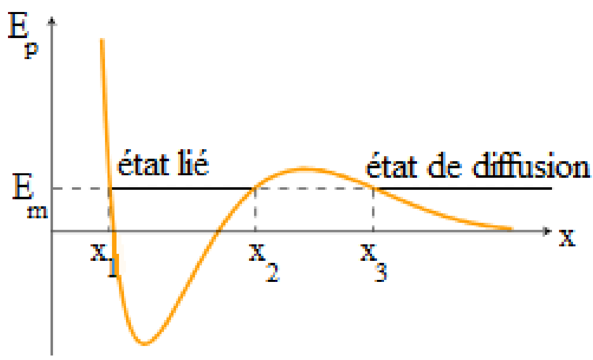
$$\frac{d^2\mathrm{E}_p}{dx^2}(x_{eq}) < 0.$$




▹ Dans un profil d'énergie potentiel, un **puits de potentiel** se traduit graphiquement par un creux et une **barrière de potentiel** se traduit graphiquement par une bosse.

▹ Par ailleurs, l'énergie cinétique étant positive par définition, la conservation de l'énergie mécanique entraîne nécessairement $E_p(x) \leq E_m$, ce qui limite potentiellement l'intervalle de valeurs de $x$ auquel le système a accès si la valeur de l'énergie mécanique est insuffisante. Aux lieux où $E_m = E_p$, l'énergie cinétique, et donc la vitesse, s'annule : cette condition permet de localiser les **points d'arrêt**.




▹ Si la condition $E_m \leq E_p$ limite les valeurs possibles de $x$, le point matériel M est dans un **état lié** et il a une **trajectoire bornée**. Si elle n'empêche pas $x$ de tendre vers l'infini, M est dans un **état libre** (aussi appelé **état de diffusion**), et sa trajectoire n'est pas bornée.

**Exercice d'application 7 :**
CAPACITÉS TRAVAILLÉES :
*Identifier sur un graphe d'énergie potentielle une barrière et un puits de potentiel.*
*Déduire d'un graphe d'énergie potentielle le comportement qualitatif d'un système : trajectoire bornée ou non, mouvement périodique, positions de vitesse nulle.*
*Déduire d'un graphe d'énergie potentielle l'existence de positions d'équilibre, et le caractère stable ou instable de ces positions.*

La molécule d'ammoniac ($NH_3$) est constituée d'un atome d'azote et de trois atomes d'hydrogène.
1. Donner son schéma de Lewis.
2. En déduire sa géométrie.

Il existe deux états (ou conformations) possibles de la molécule liés à la position relative du plan constitué par les trois atomes d'hydrogène par rapport à l'atome d'azote, qui correspondent à $x > 0$ et $x < 0$ respectivement.

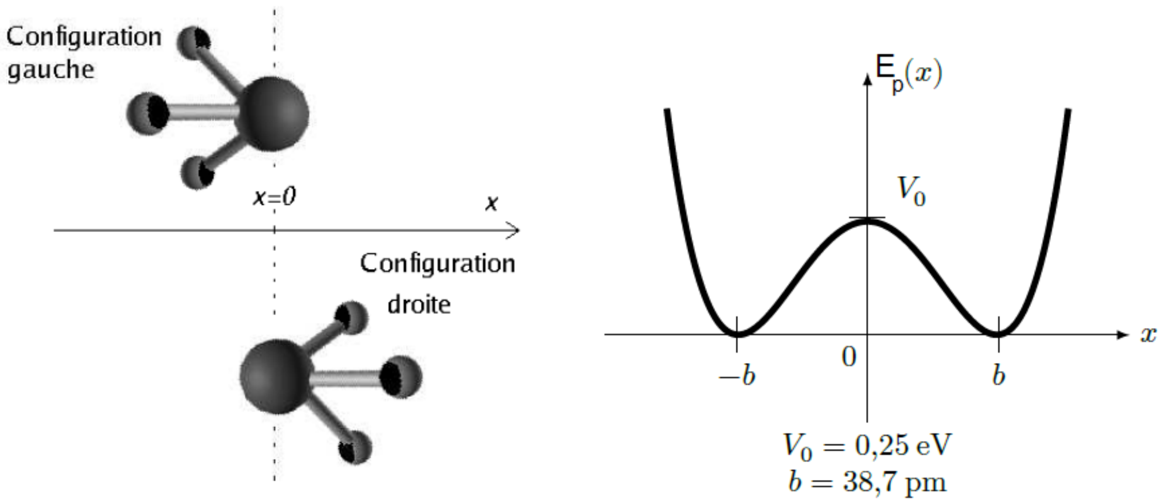



FIGURE 1 – Gauche : les deux conformations de la molécule d'ammoniac (l'atome d'azote est représenté en gris) ; droite : profil d'énergie potentielle

3. Décrire qualitativement le profil d'énergie potentielle.
4. Repérer graphiquement les positions d'équilibre. Indiquer si chacune d'elle est stable ou instable.
5. Sous l'hypothèse que l'énergie mécanique est strictement positive mais inférieure à $V_0$, décrire le mouvement de la molécule.

On appelle inversion le passage d'une conformation à l'autre, lorsque l'atome d'azote traverse la barrière d'énergie due aux trois atomes d'hydrogène. La thermodynamique montre que l'énergie totale est de l'ordre de $k_B T$, où $k_B = 1{,}38\ J \cdot K^{-1}$ est la constante de Boltzmann et $T$ la température absolue.
6. La physique classique prédit-elle que l'énergie totale est suffisante pour que la molécule puisse s'inverser à température ambiante ? On rappelle que $1 eV = 1{,}6 \times 10^{-19} J$.

On observe en fait le phénomène d'inversion à température ambiante. Il est rendu possible par un phénomène quantique appelé effet tunnel, qui permet de traverser des barrières de potentiel sans avoir l'énergie suffisante pour le faire classiquement.