République Algérienne Démocratique et Populaire
Université Frère Mentouri Constantine 1
Instituts des Sciences et Techniques Appliquées

# Cour du Module Méca 4

# Dynamique et Energétique

**Pour les étudiants 2$^{éme}$ année :**

**Productique Mécanique Industrialisation PMI**

**&**

**Génie Maintenance et Industrielle GIM**

**Sommaire**

# I. La Dynamique

## I.1 Définition de la dynamique

Dans le domaine mécanique la dynamique, il s'agit des lois du mouvement par rapport aux forces qui le produisent; du système des forces ciblées (dirigées à une fin); et du niveau d'intensité d'une activité.

Quand le mot dynamique est employé comme un adjectif et concerne une personne, il désigne sa grande énergie et son activité.

Par ailleurs, la dynamique est la partie de la physique qui décrit l'évolution dans le temps d'un système par rapport aux causes qui provoquent les changements de l'état physique et/ou de l'état de mouvement. Le but est de décrire les facteurs capables de produire des modifications d'un système physique, de les quantifier et de formuler des équations de mouvement ou d'évolution.

Galilée est l'un des premiers scientistes ayant défini la dynamique grâce à ses expériences sur des corps uniformément accélérés qui sont à l'origine des bases pour qu'Isaac Newton formule ses lois fondamentales du mouvement.

Le calcul dynamique, d'autre part, se base sur la formulation d'équations du mouvement et de son intégration.

Puis, en ce qui concerne la dynamique des systèmes mécaniques, il y a lieu de souligner qu'il existe deux grands types de systèmes physiques: les systèmes finis de particules et les champs. L'évolution dans le temps des premiers peut être décrite par un ensemble finit d'équations différentiels ordinaires, alors que l'évolution dans le temps des champs requière un ensemble d'équations complexes.

## I.2 Objectif de la dynamique

La dynamique permet d'analyser les liens existant entre les mouvements déjà décrits par la cinématique et les forces où actions qui leurs ont donné naissance.

Elle permet d'examiner le concept de force et d'une manière globale le concept d'efforts exercés sur un système matériel quelconque. Pour toutes ces raisons, nous sommes amenés à introduire la notion de torseur des efforts extérieurs, nécessaire à l'écriture du principe fondamental de la dynamique.

**I.3 Notions de référentiels**

A partir du principe de l'action et de la réaction et du principe fondamental de la dynamique, nous pouvons établir les théorèmes généraux de la dynamique dans un référentiel Galiléen ou non Galiléen.

En effet, un référentiel est dit Galiléen ou (absolu) si les lois de Newton exprimées dans celui ci sont valables. Tout repère en mouvement de translation uniforme par rapport à un repère Galiléen est lui aussi Galiléen, car les accélérations constatées à partir d'un même point seront les même dans les deux repères.

**I.4 Lois de Newton et Forces**

**I.4.1 Principe d'inertie**

**a) Définitions**

*** Système matériel**

Un système matériel est un ensemble de points matériels. On distingue :

➤ *Le système matériel indéformable* : Tous les points matériels constituant le système restent fixes les uns par rapport aux autres. Ceci correspond à la définition d'un solide en mécanique.

➤ *Le système matériel déformable* : Tout système ne correspondant pas à un solide. Exemple : l'ensemble de deux mobiles autoporteurs indépendants forment un système déformable. Le système matériel peut subir des actions ou pas de la part de l'extérieur. En particulier, on distingue :

➤ *Le système matériel isolé (ou fermé)* : Il n'existe aucune action venant de l'extérieur et s'exerçant sur le système.

➤ *Le système matériel pseudo-isolé* : Les actions extérieures agissant sur le système se compensent (tout se passe comme si il était isolé). Ainsi Sur Terre, un système ne peut pas être rigoureusement isolé puisqu'il subit obligatoirement son poids. Un mobile autoporteur sur un plan horizontal est pseudo isolé : la soufflerie du mobile compense le poids et le mobile se déplace dans le plan horizontal comme si il était isolé (les principales forces de frottement solide-solide sont éliminées).

*** Masse**

La masse d'un système caractérise la quantité de matière qui le constitue. L'unité de masse dans le système international est le kilogramme (symbole : kg).

Très souvent noté $m$, la masse d'un système est invariable dans le cadre de la mécanique Newtonienne. C'est une caractéristique du système.

*** Centre d'inertie**

Le centre d'inertie d'un système matériel ou centre de gravitation correspond au barycentre des positions des points matériels affectés de leur masse. Il est noté $I$ (comme Inertie) ou plus souvent $G$ (comme Gravitation).

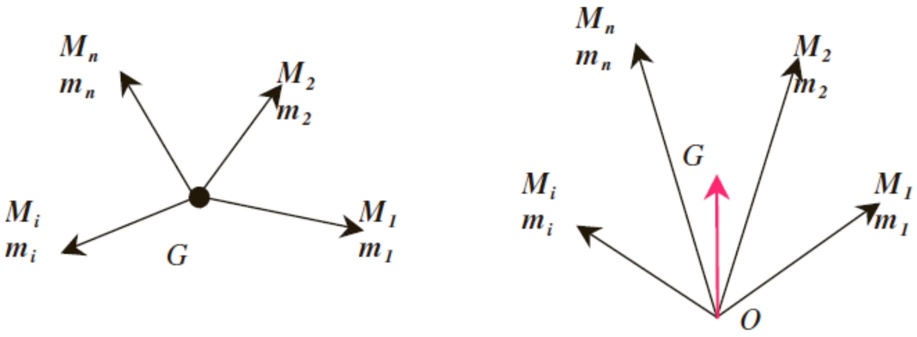



**Figure :** Centre d'inertie et barycentre.

Pour un système matériel comportant $n$ points matériels noté $M1$, $M2$, …$M$i, …$M$n de masse respectivement $m1$, $m2$, …$m$i, …$m$n (voir *figure 2.1*), le barycentre est obtenu par la relation :

$$\sum_{i=1}^{i=n} m_i \overrightarrow{GM_i} = 0 \qquad (1)$$

Ce point $G$ peut être repéré par rapport à une origine $O$ (voir *figure 2.1*). En utilisant la relation de Chasles on obtient l'expression suivante :

$$\sum_{i=1}^{i=n} m_i \overrightarrow{GM_i} = 0 \;\rightarrow\; \sum_{i=1}^{i=n} m_i \left[\overrightarrow{GO} + \overrightarrow{OM_1}\right] = 0 \qquad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{i=n} m_i \overrightarrow{GO} + \sum_{i=1}^{i=n} m_i \overrightarrow{OM_i} = 0 \qquad (3)$$

$$-\left(\sum_{i=1}^{i=n} m_i\right)\overrightarrow{GO} = \sum_{i=1}^{i=n} m_i \overrightarrow{OM_i} \qquad (4)$$

$$\overrightarrow{OG} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} m_i \overrightarrow{OM_i}}{\sum_{i=1}^{i=n} m_i} = m\,\overrightarrow{OG} = \sum_{i=1}^{i=n} m_i\,\overrightarrow{OM_i} \qquad (5)$$

La quantité $m$ correspond à la masse totale du système :

$$m = \sum_{i=1}^{i=n} m_i$$

**b) Vecteur quantité de mouvement**

En physique, il est toujours intéressant de rechercher des grandeurs qui se conservent dans certains cas au cours de l'évolution du système. Cela permet de prévoir comment le système va évoluer. L'énergie en est un exemple et le vecteur quantité de mouvement en est un autre.

Le vecteur quantité de mouvement (noté $\vec{p}$) d'un point matériel de masse $m$ se déplaçant avec une vitesse $\vec{v}$ dans un référentiel donné est défini par :

$$\vec{p} = m\,\vec{v}$$

L'unité de la quantité de mouvement dans le système international est le kg.m.s$^{-1}$.

Le vecteur quantité de mouvement d'un système matériel constitué de $n$ masses $m_i$ situées aux points $M_i$ et se déplaçant à la vitesse $\vec{v_i}$ dans le référentiel donné est obtenu en ajoutant tous les vecteurs quantité de mouvement.

C'est une addition de vecteurs et non de normes. On a donc :

$$\vec{p} = \sum_{n=1}^{n=i} m_i \vec{v_i} = \sum_{i=1}^{i=n} \vec{p}_i$$

Cette relation peut encore s'écrire, en considérant que les masses sont des constantes dans le temps :

$$\vec{p} = \sum_{n=1}^{n=i} m_i \frac{d\overrightarrow{OM_i}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\sum_{i=1}^{i=n} m_i \overrightarrow{OM}_i\right)$$

$$\vec{p} = \frac{d}{dt}\left(m\,\overrightarrow{OG}\right) = m\frac{d\overrightarrow{OG}}{dt} = m\,\vec{v}\,G$$

Le vecteur quantité de mouvement d'un système matériel est égal au vecteur quantité de mouvement d'un point matériel fictif confondu avec le centre d'inertie du système où serait concentrée la masse totale du système.

**c) Principe d'inertie : 1re loi de Newton**

C'est à partir de l'observation d'un grand nombre d'expériences que le physicien est amené à énoncer une loi qui restera valide tant qu'une autre expérience ne la remettra pas en question. La mécanique classique se construit à partir des trois lois que Newton a énoncées.

**Expérience**

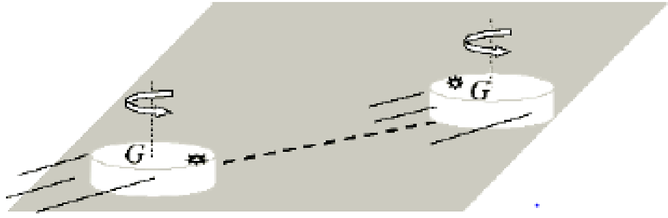



**Figure :** Mouvement du centre d'inertie d'un mobile autoporteur sur une table horizontale.

L'utilisation d'une table soufflante ou d'un mobile autoporteur permet d'étudier le mouvement d'un solide pseudo isolé. Le poids est compensé par la soufflerie et le corps peut se déplacer sans frottement avec le support. La table étant parfaitement horizontale et fixe par rapport à la Terre, un expérimentateur lance de façon quelconque le mobile autoporteur. On constate alors qu'il existe toujours un et un seul point présentant à chaque fois le même type de mouvement rectiligne uniforme. Ce point appelé centre d'inertie coïncide avec le centre de gravitation $G$. Les autres points du solide ont un mouvement plus complexe combinant une rotation autour de $G$ et une translation avec $G$. Si le mobile est simplement posé sur la table il reste immobile. Ce résultat est valable dans le référentiel terrestre dans lequel la table est fixe. Mais nous savons que la notion de mouvement ou de repos dépend du choix du référentiel. Ce résultat n'est donc pas valable dans tout référentiel. Le référentiel dans lequel centre d'inertie d'un système pseudo isolé a un mouvement rectiligne uniforme ou est au repos est qualifié de *galiléen*. Ce résultat est vérifié pour tout système déformable ou non.

**Principe d'inertie ou 1re loi de Newton**

Dans un référentiel ($R$) galiléen, le centre d'inertie de tout système matériel mécaniquement isolé (ou pseudo isolé), est soit au repos soit en mouvement rectiligne uniforme.

Référentiel (***R***) galiléen Système isolé (ou pseudo isolé)

$$\overrightarrow{V_G} = \overrightarrow{cste} \gg \vec{p} = m\overrightarrow{V_G} = \overrightarrow{cste} \gg \frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{0}$$

Ce principe conduit à la loi de conservation de la quantité de mouvement totale d'un système isolé ou pseudo isolé.

Le principe d'inertie ne renseigne que sur le mouvement du centre d'inertie du système mais pas sur le mouvement des autres points constituants le système.

**d) Référentiels galiléens**

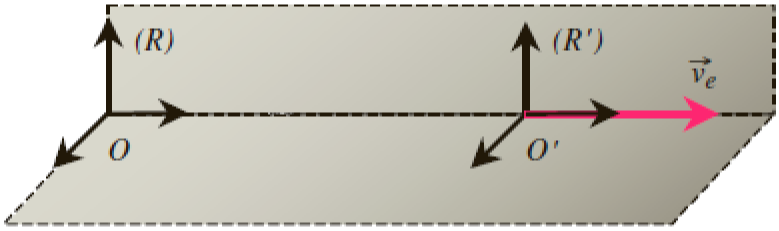
La définition de référentiel galiléen est liée au principe d'inertie et donc à l'expérience. On peut retenir la définition suivante :

Dans l'expérience décrite dans la partie précédente avec les mobiles autoporteurs, on peut considérer que le référentiel terrestre est galiléen.

La même expérience faite dans un véhicule en mouvement par rapport à la Terre montre que le référentiel lié au véhicule n'est plus galiléen sauf s'il se déplace d'un mouvement de translation rectiligne uniforme.

Par rapport à un référentiel ($R$), un référentiel ($R'$) est en translation rectiligne uniforme si les axes du repère qui le caractérise gardent toujours la même direction par rapport à ($R$) et que tous les points de ($R'$) se déplacent avec la même vitesse $\vec{V_e}$ appelée vitesse d'entraînement. Dans ces conditions, le vecteur vitesse d'un point $G$, centre d'inertie d'un système, par rapport au référentiel ($R$) est égal à la somme du vecteur vitesse de ce même point $G$ par rapport au référentiel ($R'$) et du vecteur vitesse caractérisant la translation rectiligne uniforme. C'est la loi de composition des vitesses. On a donc :

$$\vec{V_R}(G) = \vec{V_{R'}}(G) + \vec{V_e}$$




Le référentiel ($R'$) est en translation rectiligne uniforme par rapport au référentiel ($R$). Exemple : le tapis roulant. La vitesse, par rapport à la Terre, d'un point se déplaçant sur le tapis roulant est égale à la vitesse de ce point par rapport au tapis roulant plus la vitesse d'entraînement du tapis roulant.

Ainsi, si le référentiel ($R$) est galiléen et que le système étudié est isolé alors $\vec{V_R}(G)$ est un vecteur constant. Si le référentiel ($R'$) est en translation rectiligne uniforme on a $\vec{V_e}$ constant et donc également. Le référentiel ($R'$) est lui aussi galiléen.

NB : Tout référentiel en translation rectiligne uniforme par rapport à un référentiel galiléen est lui-même galiléen.

## I.5 PRINCIPE FONDAMENTAL DE LA DYNAMIQUE (2E LOI DE NEWTON)

### 1.5.1 Notion de force

Un point matériel $G$ est rarement mécaniquement isolé mais subit des actions. Ces actions sont appelées forces**.** Lorsqu'on parle de force, il est important de voir que cela suppose l'existence d'un « acteur » (celui qui exerce la force) et un « receveur » (celui qui subit la force). « Un corps $A$ exerce une force sur un corps $B$ ».

Une force s'exerce dans une certaine direction appelée « ligne d'action de la force », dans un certain sens et avec une certaine intensité. De plus, une force s'applique en un point particulier du système. Une ***force*** sera donc matérialisée par ***un vecteur associé à un point d'application***. Son intensité est mesurée au moyen d'un dynamomètre et s'expriment en Newton (symbole N) dans le système international d'unités.

➤ *Représentation d'une action mécanique* : $(\vec{F}, A)$avec $\vec{F}$ une vecteur ayant comme direction et sens la direction et le sens de l'action et comme norme l'intensité de l'action. Ce vecteur sera représenté au point d'application $A$.

### 1.5.2 Principe fondamental de la dynamique (ou 2e loi de Newton)

Dès qu'un système subit des actions provenant de l'extérieur il n'est plus isolé. Les conséquences en sont une possible déformation ou bien une modification de mouvement qui se manifeste par une variation du vecteur quantité de mouvement qui ne se conserve plus. La deuxième loi de Newton précise comment se fait cette modification du mouvement.

**Énoncé du principe**

Dans un référentiel galiléen, la somme vectorielle des forces extérieures appliquées à un système est égale à la dérivée par rapport au temps du vecteur quantité de mouvement du système.

$$\sum \overrightarrow{f_{ext}} = \frac{d\vec{P}}{dt}$$

Le vecteur quantité de mouvement du système correspond au vecteur vitesse du centre d'inertie du système multiplié par la masse totale (voir 2.1a). La masse étant un invariant il est possible de donner une autre forme à ce principe

Référentiel ($\boldsymbol{R}$) galiléen
Système non isolé $\sum \overrightarrow{f_{ext}} \neq \vec{0}$

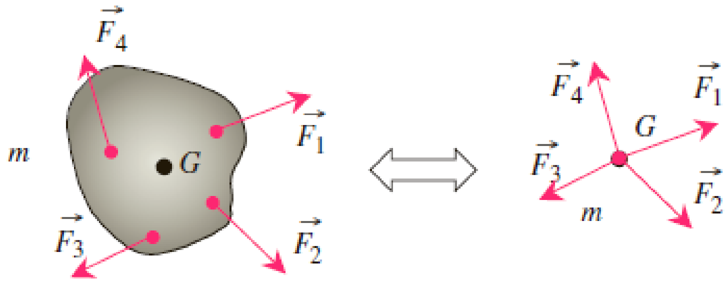
$$\boxed{\sum \vec{f}_{ext} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{V}_G)}{dt} = m\frac{d(\vec{V}_G)}{dt} = m\vec{a}_G}$$

### 1.5.3 Théorème du centre d'inertie

Dans un référentiel galiléen, le mouvement du centre d'inertie d'un système matériel est le même que celui d'un point matériel coïncidant avec ce centre, point qui aurait comme masse la masse totale du système et auquel on appliquerait la somme des forces agissant sur le système.

$$\sum \overrightarrow{f_{ext}} = m\vec{a}_G$$

Quelque soit le système considéré, on est ramené à l'étude du mouvement d'un point matériel qui correspond au centre d'inertie.



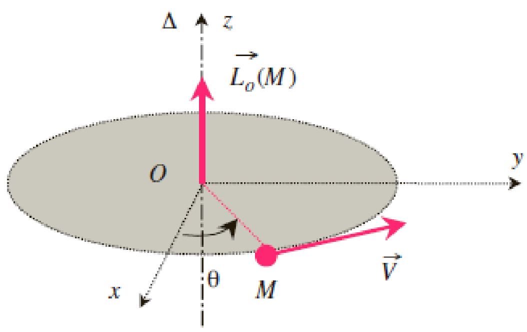

Il est possible de donner une autre forme à ce théorème en introduisant une nouvelle grandeur cinématique intéressante lorsqu'un point tourne autour d'un axe. Cette grandeur est le moment cinétique.

### 1.5.4 Moment cinétique et théorème du moment cinétique

*Définition du moment cinétique* Considérons un point matériel $M$ en rotation autour d'un point fixe dans le référentiel galiléen $R$ ( $O,x,y,z$ ). Sa vitesse, dans ce référentiel, est notée $\vec{V}$. On appelle moment cinétique du point $M$ par rapport à un point fixe $O$, le moment par rapport à $O$ de sa quantité de mouvement c'est-à dire :

$$\vec{L}_0(M) = \overrightarrow{OM} \wedge m\vec{V}$$

Le moment cinétique $\vec{L}_0$ , produit vectoriel (voir encart 1.5) du vecteur position avec le vecteur quantité de mouvement, est un vecteur perpendiculaire à $OM$ et à la vitesse du point : c'est une grandeur perpendiculaire à la trajectoire du point $M$.




Moment cinétique par rapport au point $O$ d'un point $M$ en mouvement autour de $O$.

# II. Energétique

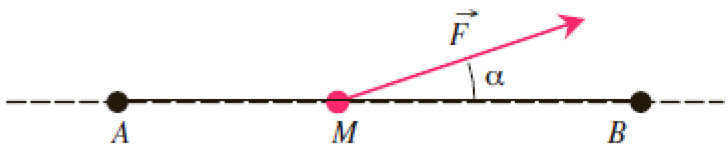
## II.1 TRAVAIL D'UNE FORCE

### a) Définition

Lorsqu'on applique une force pour déplacer un objet l'effort qu'il faut fournir est d'autant plus important que la longueur du déplacement est grande et que la force appliquée est intense. Le travail de la force est une grandeur qui va rendre compte de cet effort.

**Notion de travail : cas d'une force constante sur un déplacement rectiligne**

Considérons une force $\vec{F}$ constante (en norme, sens et direction) appliquée sur un point matériel $M$ se déplaçant sur un segment de droite $AB$.




Déplacement du point d'application $M$ d'une force constante sur un déplacement rectiligne.

Dans le cas où la force de norme $F$ à même direction et sens que le déplacement $l = AB$, la force contribue au déplacement du point d'application. Le travail correspond alors au produit de la force $F$ par la longueur du déplacement $l = AB$.

Si la force est perpendiculaire au déplacement, elle ne contribue pas au déplacement du point $M$. Cela sous-entend qu'il existe d'autres forces permettant le déplacement du point. Le travail de la force sur ce déplacement est donc nul.

Enfin si la force a même direction mais est de sens contraire au déplacement $l = AB$, la force s'oppose au déplacement du point d'application.

Pour tenir compte de ces différents cas le travail de la force sur le déplacement $AB$ se définit comme le produit scalaire du vecteur force par le vecteur déplacement. On a donc :

$$\vec{F} = \overrightarrow{cste} \; sur \; \overrightarrow{AB} \Rightarrow \begin{cases} W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F}.\overrightarrow{AB} \\ W_{AB}(\vec{F}) = F.l\cos\alpha \end{cases}$$

L'angle α est l'angle que fait le vecteur force avec le vecteur $\vec{F}$ déplacement $\overrightarrow{AB}$

On peut faire les remarques importantes suivantes :

➤ Parler du travail d'une force n'a de sens que si on précise le déplacement. La notation usuelle est la lettre $W$ (initiale du mot anglais Work signifiant travail) en précisant en indice le déplacement et entre parenthèses la force.

➤Le travail s'exprime en N·m c'est-à-dire en Joule (J). 1J correspond au travail d'une force de 1 N sur une distance de 1 m.

➤ Il y a un travail non nul lorsque la force agissant sur l'objet a une composante dans la direction du mouvement.

➤ Le travail est soit positif, nul ou négatif selon la direction de la force par rapport au déplacement.

➤ Lorsque la force s'oppose au déplacement la force est résistante et le travail est négatif.

➤ Lorsque la force est motrice le travail est positif.

➤ Une force peut s'appliquer à un objet sans pour autant effectué un travail. Ainsi, il n'y a pas de travail lorsqu'il n'y a pas de déplacement de l'objet ($l$ = 0) où lorsque la force est perpendiculaire à la direction du mouvement. La force ne contribue pas alors au déplacement de l'objet.

**b) Puissance d'une force**

Un même travail peut être réalisé plus ou moins rapidement. La puissance $P$ d'une force correspond au travail effectué par cette force par unité de temps et renseigne sur la rapidité avec laquelle le travail (transfert d'énergie) est effectué.

Si $W$ est le travail effectué pendant la durée $\Delta t$, la puissance moyenne $P_m$ de la force est définie par :

$$P_m = \frac{W}{\Delta t}$$

L'unité de puissance est le Watt (symbole W) correspondant à un travail de 1J effectué en 1 s.

Remarque : Un avion de chasse n'a pas obligatoirement plus d'énergie dans son réservoir à carburant qu'un petit avion de tourisme, il est juste capable de transférer cette énergie plus rapidement. Car sa puissance est plus importante.

Soit $\delta W$ le travail effectué par une force $\vec{F}$ pendant la durée élémentaire (infiniment petite) d$t$. La puissance de cette force à l'instant $t$ correspond à la puissance instantanée et s'écrit :

$$P(t) = \frac{\delta W}{dt} = \frac{\vec{F}.d\vec{l}}{dt} = \vec{F}.\frac{d\vec{l}}{dt} = \vec{F}.\vec{v}$$

On a donc aussi :

$$\delta W = P(t).dt = \vec{F}.\vec{v}.dt \Rightarrow W_{AB} = \int_A^B \delta W = \int_{t_A}^{t_b} \vec{F}.\vec{v}.dt$$

## II.2 L'énergie en mécanique

Deux types d'énergie seront introduites ici : l'énergie cinétique ($Ec$) liée au mouvement de l'objet et l'énergie potentielle ($Ep$) liée à sa position. L'énergie mécanique ($E$) d'un système est alors définie par la somme des énergies cinétique et potentielle.

### II.2.1 L'énergie cinétique : une énergie liée au mouvement

**a) Introduction**

Considérons un point matériel $G$, de masse $m$, se déplaçant, dans un référentiel galiléen ($R$), sous l'action d'un ensemble de forces extérieures. L'application du principe fondamental de la dynamique donne :

$$\sum \vec{f}_{ext} = m\,\vec{a}_G = m\frac{d\vec{V}_G}{dt}$$

Au cours d'un déplacement élémentaire $d\vec{l}$, la somme des travaux élémentaires des forces extérieures est donnée par :

$$\sum \delta W = \sum (\vec{f}_{ext}.d\vec{l}) = \left(\sum \vec{f}_{ext}\right).d\vec{l}$$

En utilisant les deux relations

$$\sum \delta W = m\frac{d\vec{V}_G}{dt}.d\vec{l} = m.d\vec{V}_G.\frac{d\vec{l}}{dt} = m.\vec{V}_G.d\vec{V}_G$$

Considérons maintenant un trajet $AB$ effectué par le point $G$. En notant $\vec{V}_A$ , $\vec{V}_B$ et les vecteurs vitesse de $G$ respectivement au point $A$ et au point $B$, l'intégration du deuxième membre de la relation précédente donne :

$$\frac{1}{2}mV_B{}^2 - \frac{1}{2}mV_A{}^2 = \sum W_{A\to B}(\vec{f}_{ext})$$

Ainsi le travail total de toutes les forces appliquées au point $G$ entre deux positions $A$ et $B$ peut s'exprimer uniquement en fonction de la masse et des vitesses au point de départ $A$ et d'arrivée $B$. Il apparaît donc intéressant de définir une fonction d'état ne dépendant que de la masse et de la vitesse du point. Cette nouvelle grandeur homogène à un travail est appelée énergie cinétique.

#### b) Définition de l'énergie cinétique

On définit l'énergie cinétique $Ec$ pour un point matériel de masse $m$ se déplaçant à la vitesse $\vec{V}$ dans un référentiel galiléen, par :

$$E_c = \frac{1}{2}mV^2$$

#### c) Théorème de l'énergie cinétique

Dans un référentiel galiléen, la variation d'énergie cinétique d'un point matériel, soumis à un ensemble de forces extérieures, entre une position $A$ et une position $B$, est égale à la somme des travaux de ces forces entre ces deux points :

$$\frac{1}{2}mV_B{}^2 - \frac{1}{2}mV_A{}^2 = E_c(B) - E_c(A) = \Delta E_c = \sum W_{A\to B}(\vec{f}_{ext})$$

Ce théorème est très utile pour déterminer la vitesse d'une masse ponctuelle $m$ en un point particulier ($B$) connaissant sa vitesse en un autre point ($A$) ceci sans passer par les équations horaires du mouvement.

### II.2.2 L'énergie potentielle : une énergie liée à la position

L'énergie potentielle est une forme d'énergie liée à la position du système. En changeant de position, cette énergie peut augmenter (le système emmagasine de l'énergie) ou diminuer (le système restitue de l'énergie à l'extérieur).

On peut donner l'exemple simple d'une masse qu'on lâche d'une certaine altitude : celle-ci en tombant (diminution de l'altitude) voit sa vitesse augmenter. La masse avait donc potentiellement de l'énergie qui a été restituée sous forme d'énergie cinétique au cours de la chute. La seule force exercée alors sur la masse est son poids qui fournit un travail positif indépendant du chemin suivi et lié uniquement à la diminution d'altitude.

Tout comme pour l'énergie cinétique définie à partir de sa variation liée au travail de toutes les forces, l'énergie potentielle va être définie à partir de sa diminution liée au travail de certaines forces : celles dont le travail ne dépend pas du chemin suivi.

#### a) Forces conservatives

Ce sont les forces (notée $\vec{F}_{ext}{}^{C}$) dont le travail ne dépend pas du chemin suivi mais uniquement des positions initiale (point de départ) et finale (point d'arrivée).

On peut citer comme exemples rencontrés au début de ce chapitre :

- Travail du poids
- Travail de la tension du ressort
- Travail d'une force constante (en norme et en direction)

### b) Forces non conservatives

Ce sont toutes les autres forces (notée $\vec{F}_{ext}{}^{NC}$) dont le travail dépend du chemin suivi. On peut citer comme exemple les forces de frottement. Le travail de ces forces est toujours résistant (travail négatif $W < 0$).

Prenons le cas d'une force de frottement $\vec{F}$ de type solide. Cette force s'oppose continuellement au déplacement (voir le chapitre 2 sur les forces) et sa norme $F$ est constante. Le vecteur force sera un vecteur de même direction mais de sens opposé au vecteur déplacement élémentaire.

Le calcul du travail de la force de frottement solide donne :

$$\delta W = \vec{F}.\Delta\vec{l} = -Fdl \Rightarrow W_{AB} = \int_A^B Fdl = -F\int_A^B dl = -FL_{AB}$$

La longueur $LAB$ est la distance effectivement parcourue entre $A$ et $B$. Cette distance dépend évidemment du chemin suivi.

### c) Définition de l'énergie potentielle

Le travail $W_{AB}\left(\vec{F}_{ext}{}^{C}\right)$ d'une force conservative $\vec{F}_{ext}{}^{C}$ ne dépend pas du chemin suivi mais uniquement de l'état initial (état $A$) et final ($B$). Ce travail peut s'exprimer à partir d'une fonction d'état $EP$ (fonction ne dépendant que de l'état du système) appelée *énergie potentielle*.

Par définition : pour une force conservative $\vec{F}_{ext}{}^{C}$ il existe une fonction d'état $EP$ telle que :

$$W_{AB}\left(\vec{F}_{ext}{}^{C}\right) = E_P(A) - E_P(B) = \Delta E_P$$

La variation d'énergie potentielle entre deux points $A$ et $B$ est égale à l'opposé du travail de la force conservative entre ces deux points.