

Étapes de calcul et démonstrations du tome 1 « Mécanique »  
de Physique Théorique de L. Landau & E. Lifchitz

Sébastien Majerowicz

2023

## Résumé

Ce document est une aide pour la compréhension du premier livre des célèbres cours de Landau & Lifschitz au travers de la démonstration des formules et de la résolution des exercices proposés.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Équations du mouvement</b>	<b>1</b>
1.1	Coordonnées généralisées . . . . .	1
1.2	Le principe de moindre action . . . . .	1
1.3	Le principe de relativité de Galilée . . . . .	3
1.4	Fonction de Lagrange d'un point matériel libre . . . . .	4
1.5	Fonction de Lagrange d'un système de points matériels . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Lois de conservation</b>	<b>9</b>
2.1	Énergie . . . . .	9
2.2	Impulsion . . . . .	10
2.3	Centre d'inertie . . . . .	12
2.4	Moment cinétique . . . . .	13

# Chapitre 1

## Équations du mouvement

### 1.1 Coordonnées généralisées

Pour un point matériel, nous avons en coordonnées cartésiennes :

— le rayon vecteur tel que :

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

— la vitesse telle que :

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (1.2)$$

— l'accélération telle que :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \quad (1.3)$$

Les coordonnées cartésiennes ne sont pas toujours les plus adaptées. Un autre système de coordonnées peut être plus commode à utiliser. Il convient de choisir alors  $s$  grandeurs quelconques  $\{q_i\}_1^s$  pour définir la position d'un système ( $s$  degrés de liberté), ce sont ses *coordonnées généralisées* et les dérivées  $\{\dot{q}_i\}_1^s$ , ses *vitesse généralisées*.

Les relations qui lient les accélérations aux coordonnées et aux vitesses sont appelées les *équations du mouvement*.

### 1.2 Le principe de moindre action

La formule la plus générale de la loi du mouvement des systèmes mécaniques est celle du *principe de moindre action* (ou principe de Hamilton). Il introduit la *fonction de Lagrange* définie telle que :

$$L(\{q_i\}_1^s, \{\dot{q}_i\}_1^s, t) = L(q, \dot{q}, t) \quad (1.4)$$

Entre les instants  $t_1$  et  $t_2$ , le système se meut de telle manière que l'*action* :

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t) dt \quad (1.5)$$

ait la plus petite valeur possible.

Partons d'un seul degré de liberté et définissons  $q = q(t)$  telle que  $S$  soit minimale. Cela signifie que  $S$  a une valeur plus grande si :

$$q(t) \rightarrow q(t) + \delta q(t) \quad (1.6)$$

avec  $\delta q(t)$  est la variation de  $q(t)$ . Or en  $t_1$  et  $t_2$ , toutes les fonctions  $q(t)$  doivent avoir des valeurs identiques (les trajectoires diffèrent mais pas les conditions initiales, ni finales). Donc  $\forall q(t)$ , nous avons :

$$\delta q(t_1) = \delta q(t_2) = 0 \quad (1.7)$$

De plus  $\dot{q} = \frac{dq}{dt}$  dont  $\frac{d(q + \delta q)}{dt} = \dot{q} + \delta \dot{q}$ .

$$S(q + \delta q, \dot{q} + \delta \dot{q}, t) - S(q, \dot{q}, t) = \delta S = \int_{t_1}^{t_2} L(q + \delta q, \dot{q} + \delta \dot{q}, t) dt - \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t) dt \quad (1.8)$$

Or par définition, nous avons :

$$\delta L(q, \dot{q}, t) = \frac{\partial L}{\partial q} \delta q + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q} + \frac{\partial L}{\partial t} \delta t \quad (1.9)$$

Mais puisque  $\delta t = 0$ , cela donne, au premier ordre (développement en série de Taylor) :

$$L(q + \delta q, \dot{q} + \delta \dot{q}, t) \approx L(q, \dot{q}, t) + \frac{\partial L}{\partial q} \delta q + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q} \quad (1.10)$$

ou encore, le principe de moindre action peut s'écrire :

$$\delta S = \delta \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t) dt = 0 \quad (1.11)$$

et, de facto :

$$\int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{\partial L}{\partial q} \delta q + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q} \right) dt = 0 \quad (1.12)$$

Ensuite, remarquons que :

$$\delta \dot{q} = \delta \left( \frac{dq}{dt} \right) = \frac{d\delta q}{dt} \quad (1.13)$$

L'équation (1.11) devient alors :

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial L}{\partial q} \delta q + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \frac{d\delta q}{dt} dt = 0 \quad (1.14)$$

En se rappelant l'intégration par parties de Brook Taylor qui dit que :

$$\int_a^b u(x) v'(x) dx = [u(x) v(x)]_a^b - \int_a^b u'(x) v(x) dx \quad (1.15)$$

alors :

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \frac{d\delta q}{dt} dt = \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta q \right]_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) \delta q dt \quad (1.16)$$

L'équation (1.11) s'écrit donc :

$$\begin{aligned} \delta S &= \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial L}{\partial q} \delta q dt + \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta q \right]_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) \delta q dt \\ &= \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta q \right]_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) \right) \delta q dt \end{aligned} \quad (1.17)$$

or l'application de (1.7) dans (1.17) implique directement :

$$\delta S = \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) \right) \delta q dt \quad (1.18)$$

Le principe de moindre action donne  $\forall q, \delta S = 0$  et l'expression ci-dessus doit être valide quelque soit la valeur de  $\delta q$ . Cela a pour conséquence :

$$\frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) = 0 \quad (1.19)$$

ce qui donne les *équations de Lagrange* lorsqu'il y a  $s$  degrés de liberté :

$$\forall i \in (1, 2, \dots, s), \frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) = 0 \quad (1.20)$$

c'est-à-dire  $s$  équations différentielles du second ordre à  $s$  inconnues,  $q_i(t)$ .

Si (A) et (B) sont deux systèmes fermés suffisamment éloignés pour négliger leur interaction mutuelle alors :

$$\lim L = L_A + L_B \quad (1.21)$$

Il s'agit de l'additivité de la fonction de Lagrange. De la même manière, la multiplication par une constante de la fonction de Lagrange d'un système fermé n'influe pas les équations du mouvement.

Une dernière remarque en considérant la fonction de Lagrange  $L'$  telle que :

$$L'(q, \dot{q}, t) = L(q, \dot{q}, t) + \frac{df(q, t)}{dt} \quad (1.22)$$

alors les intégrales (1.5) donnent :

$$\begin{aligned} S' &= \int_{t_1}^{t_2} L'(q, \dot{q}, t) dt = \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t) dt + \int_{t_1}^{t_2} \frac{df(q, t)}{dt} dt \\ &= S + \int_{t_1}^{t_2} df(q, t) = S + f(q(t_2)) - f(q(t_1)) \end{aligned} \quad (1.23)$$

et impliquent que le principe de moindre action  $\delta S = 0$  coïncide avec  $\delta S' = 0$ . Ainsi, la fonction de Lagrange n'est déterminée qu'à la dérivée totale d'une fonction quelconque des coordonnées et du temps.

### 1.3 Le principe de relativité de Galilée

Il est nécessaire de choisir un système de référence pour étudier les phénomènes mécaniques et il est préférable de le choisir afin que les lois de la mécanique y soit les plus simples possibles. Et il est toujours possible de trouver un référentiel tel que l'espace est homogène et isotrope et le temps uniforme. En d'autres termes, la fonction de Lagrange d'un point matériel se mouvant librement dans un système galiléen en coordonnées cartésiennes :

- homogénéité de l'espace :  $L(\vec{r}, \vec{v}, t) \Rightarrow L(\vec{v}, t)$
- uniformité du temps :  $L(\vec{v}, t) \Rightarrow L(\vec{v})$
- isotropie de l'espace :  $L(\vec{v}) \Rightarrow L(\|\vec{v}\|)$

En résumé, nous avons :

$$L = L(\vec{v}^2) \quad (1.24)$$

ce qui implique que  $\frac{\partial L}{\partial \vec{r}} = 0$ . Et par application des équations de Lagrange (1.20), nous avons :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \vec{v}} \right) = 0 \quad (1.25)$$

et comme la fonction de Lagrange n'est fonction que de la vitesse, ou encore  $\frac{\partial L(\vec{v}^2)}{\partial \vec{v}} \propto \vec{v}$  (voir 1.24), dans ce cas alors :

$$\vec{v} = C\vec{t}e \quad (1.26)$$

Dans un référentiel galiléen, tout mouvement libre s'effectue donc à une vitesse constante en grandeur et en direction. C'est la *loi de l'inertie*. Supposons deux référentiels galiléens ( $K$ ) et ( $K'$ ) tels que  $K\vec{K}' = \vec{V}t$ . Alors  $\vec{r} = K\vec{K}' + \vec{r}'$ , soit :

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{V}t \quad (1.27)$$

En Mécanique classique, le temps est absolu, aussi :

$$t = t' \quad (1.28)$$

Les formules (1.27) et (1.28) sont les *transformations de Galilée*.

## 1.4 Fonction de Lagrange d'un point matériel libre

Considérons le mouvement libre d'un point matériel dans un système galiléen. Cela implique (1.24), soit  $L = L(v^2)$ . Avec un référentiel ( $K$ ) qui se déplace par rapport à un autre référentiel ( $K'$ ) telle que  $\vec{v}' = \vec{v} + \vec{\epsilon}$ , nous avons :

$$\begin{aligned} L' = L(\vec{v}'^2) &= L(\vec{v}^2 + 2\vec{v} \cdot \vec{\epsilon} + \vec{\epsilon}^2) \\ &= L(\vec{v}^2) + \frac{\partial L}{\partial \vec{v}^2} 2\vec{v} \cdot \vec{\epsilon} \end{aligned} \quad (1.29)$$

en supprimant les ordres supérieurs à 2 en  $\vec{\epsilon}$  dans le développement en série de Taylor de :

$$L(\vec{v}^2 + 2\vec{v} \cdot \vec{\epsilon} + \vec{\epsilon}^2) \approx L(\vec{v}^2) + \frac{\partial L}{\partial \vec{v}^2} (2\vec{v} \cdot \vec{\epsilon} + \vec{\epsilon}^2) + \frac{\partial L}{2\partial \vec{v}^4} (2\vec{v} \cdot \vec{\epsilon} + \vec{\epsilon}^2)^2 + \dots \quad (1.30)$$

En reprenant la fonction de Lagrange qui peut se définir comme (1.22), nous pouvons poser :

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \vec{v}^2} 2\vec{v} \cdot \vec{\epsilon} &= \frac{df(\vec{r}, t)}{dt} \\ \Leftrightarrow 2 \frac{\partial L}{\partial \vec{v}^2} \frac{d\vec{r}}{dt} \cdot \vec{\epsilon} &= \frac{df(\vec{r}, t)}{dt} \\ \Leftrightarrow 2 \frac{\partial L}{\partial \vec{v}^2} \frac{d(\vec{r} \cdot \vec{\epsilon})}{dt} &= \frac{df(\vec{r}, t)}{dt} \end{aligned} \quad (1.31)$$

n'est vraie que si et seulement si  $\frac{\partial L}{\partial \vec{v}^2} = \alpha$ , avec  $\alpha$  une constante. Or nous avons 1.24, qui implique :

$$L = L(\vec{v}^2) = \alpha \vec{v}^2 \quad (1.32)$$

Dans le cadre où le référentiel ( $K$ ) se meut à une vitesse  $\vec{V}$  par rapport à ( $K'$ ), la fonction de Lagrange devient :

$$\begin{aligned}
L' = \alpha \vec{v'}^2 &= \alpha (\vec{v} + \vec{V})^2 \\
&= \alpha \vec{v}^2 + 2\alpha \vec{v} \cdot \vec{V} + \alpha \vec{V}^2 \\
&= L + 2\alpha \frac{d\vec{r}}{dt} \cdot \vec{V} + \alpha \frac{dt}{dt} \vec{V}^2 \\
&= L + \frac{d}{dt} \left( 2\alpha \vec{r} \cdot \vec{V} + \alpha \vec{V}^2 t \right)
\end{aligned} \tag{1.33}$$

dont le second terme est une dérivée totale par rapport au temps d'une fonction qui ne dépend que de la position et du temps. Ce second terme peut donc être omis, voir (1.22) et la fonction de Lagrange devient, en posant  $\alpha = m/2$  :

$$L = \frac{m\vec{v}^2}{2} \tag{1.34}$$

où  $m$  est appelée *masse* du point matériel. Par additivité de la fonction de Lagrange dans le cadre de particules sans interactions :

$$L = \sum_a \frac{m_a \vec{v}_a^2}{2} \tag{1.35}$$

Un point intéressant est que la masse ne peut être négative. En effet, dans un tel cas, l'action :

$$S = \int_{t_1}^{t_2} \frac{m\vec{v}^2}{2} dt \tag{1.36}$$

ne peut alors pas avoir de minimum et le principe de moindre action ne peut pas être rempli !

De manière évidente, le carré de la vitesse s'écrit en fonction de la longueur  $l$  d'un arc tel que :

$$\vec{v}^2 = \left( \frac{dl}{dt} \right)^2 = \frac{dl^2}{dt^2} \tag{1.37}$$

Cela permet d'écrire la fonction de Lagrange :

— en coordonnées cartésiennes :

$$\begin{aligned}
dl^2 &= dx^2 + dy^2 + dz^2 \\
\Rightarrow L &= \frac{m}{2} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2)
\end{aligned} \tag{1.38}$$

— en coordonnées cylindriques :

$$\begin{aligned}
dl^2 &= dr^2 + r^2 d\phi^2 + dz^2 \\
\Rightarrow L &= \frac{m}{2} (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\phi}^2 + \dot{z}^2)
\end{aligned} \tag{1.39}$$

— en coordonnées sphériques :

$$\begin{aligned}
dl^2 &= dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2(\theta) d\varphi^2 \\
\Rightarrow L &= \frac{m}{2} (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\theta}^2 + r^2 \sin^2(\theta) \dot{\varphi}^2)
\end{aligned} \tag{1.40}$$



## 1.5 Fonction de Lagrange d'un système de points matériels

Dans ce cas, un système est fermé s'il est composé de points matériels réagissant les uns avec les autres mais isolés de tout corps extérieur. L'interaction entre les points matériels peut être décrite en ajoutant à la fonction de Lagrange une fonction dépendante des seules coordonnées des particules. Ainsi, en reprenant (1.35) :

$$L = \sum_a \frac{m_a \vec{v}_a^2}{2} - U(\{\vec{r}_i\}_1^s) = T - U \quad (1.41)$$

avec  $T$  l'énergie cinétique et  $U$  l'énergie potentielle du système.

En mécanique classique, les interactions entre particules sont instantanées (uniformité du temps et relativité de Galilée). De la même manière, le changement de  $t$  en  $-t$  ne change pas la fonction de Lagrange, ni les équations du mouvement, c'est la réversibilité de la mécanique classique.

En passant l'équation (1.20) des coordonnées généralisées en coordonnées cartésiennes, nous avons pour la particule  $a$  :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \vec{v}_a} \right) = \frac{\partial L}{\partial \vec{r}_a} \quad (1.42)$$

En introduisant la fonction de Lagrange de (1.41) :

$$\frac{\partial L}{\partial \vec{v}_a} = \frac{m_a}{2} \frac{\partial \vec{v}_a^2}{\partial \vec{v}_a} - \frac{\partial U}{\partial \vec{v}_a} = m_a \vec{v}_a \quad (1.43)$$

car l'énergie potentielle ne dépend que des coordonnées donc  $\frac{\partial U}{\partial \vec{v}_a} = 0$ . Et :

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \vec{r}_a} &= \frac{m_a}{2} \frac{\partial \vec{v}_a^2}{\partial \vec{r}_a} - \frac{\partial U}{\partial \vec{r}_a} \\ &= \frac{m_a}{2} \frac{\partial}{\partial \vec{r}_a} \left( \frac{d\vec{r}_a}{dt} \right)^2 - \frac{\partial U}{\partial \vec{r}_a} \\ &= \frac{m_a}{2} \left[ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \vec{r}_a}{\partial \vec{r}_a} \right) \right]^2 - \frac{\partial U}{\partial \vec{r}_a} \\ &= - \frac{\partial U}{\partial \vec{r}_a} \end{aligned} \quad (1.44)$$

car  $\frac{\partial \vec{r}_a}{\partial \vec{r}_a} = 1$  ! Nous obtenons ainsi :

$$m_a \frac{d\vec{r}_a}{dt} = - \frac{\partial U}{\partial \vec{r}_a} \quad (1.45)$$

Il s'agit des *équations de Newton* et le vecteur :

$$\vec{F}_a = - \frac{\partial U}{\partial \vec{r}_a} \quad (1.46)$$

est appelé la *force* agissant sur le point matériel  $a$ . L'énergie potentielle  $U$  ne dépendant que des coordonnées alors les accélérations, voir (1.45), ne dépendent également que des coordonnées. Si l'énergie potentielle est définie à une constante près telle que  $U'(\vec{r}_a) = U(\vec{r}_a) + \alpha$  alors l'équation (1.45) ne change pas car  $\frac{\partial U'}{\partial \vec{r}_a} = \frac{\partial U}{\partial \vec{r}_a}$ . Préférentiellement,  $\alpha$  est choisie de telle manière à ce que l'énergie potentielle tende vers zéro quand la distance entre les points matériels augmentent.

Pour passer des coordonnées cartésiennes aux coordonnées généralisées, il faut définir une transformation indépendante du temps telle que :

$$x_a = f_a(\{\dot{q}_i\}_1^s) \quad (1.47)$$

$$\Rightarrow \dot{x}_a = \frac{dx_a}{dt} = \sum_{k=1}^s \frac{\partial f_a(q_k)}{\partial q_k} \frac{dq_k}{dt} \quad (1.48)$$

en employant la différentiel totale.

En reportant cela dans l'équation (1.41), nous avons :

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2} \sum_a m_a (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) - U \\ &= \frac{1}{2} \sum_a m_a \left[ \left( \sum_{k=1}^s \frac{\partial f_a(q_k)}{\partial q_k} \dot{q}_k \right)^2 + \left( \sum_{k=1}^s \frac{\partial g_a(q_k)}{\partial q_k} \dot{q}_k \right)^2 + \left( \sum_{k=1}^s \frac{\partial h_a(q_k)}{\partial q_k} \dot{q}_k \right)^2 \right] - U(q) \\ &= \frac{1}{2} \sum_a m_a \left[ \sum_{i,j=1}^s \frac{\partial f_a(q_i)}{\partial q_i} \frac{\partial f_a(q_j)}{\partial q_j} \dot{q}_i \dot{q}_j + \sum_{i,j=1}^s \frac{\partial g_a(q_i)}{\partial q_i} \frac{\partial g_a(q_j)}{\partial q_j} \dot{q}_i \dot{q}_j + \sum_{i,j=1}^s \frac{\partial h_a(q_i)}{\partial q_i} \frac{\partial h_a(q_j)}{\partial q_j} \dot{q}_i \dot{q}_j \right] - U(q) \end{aligned}$$

Nous avons donc la fonction de Lagrange sous la forme :

$$L = \frac{1}{2} \sum_a m_a \left[ \sum_{i,j=1}^s a_{ij}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j \right] - U(q) \quad (1.49)$$

avec :

$$a_{ij}(q) = \frac{\partial f_a(q_i)}{\partial q_i} \frac{\partial f_a(q_j)}{\partial q_j} + \frac{\partial g_a(q_i)}{\partial q_i} \frac{\partial g_a(q_j)}{\partial q_j} + \frac{\partial h_a(q_i)}{\partial q_i} \frac{\partial h_a(q_j)}{\partial q_j} \quad (1.50)$$

où les coefficients  $a_{ij}$  ne dépendent que des coordonnées. Aussi dans un système de coordonnées généralisées, l'énergie cinétique est fonction quadratique des vitesses mais peut aussi dépendre des coordonnées.

Considérons le système  $A$  non fermé et interagissant avec le système  $B$  animé d'un mouvement potentiellement fonction du temps.  $A$  se meut dans le champ créé par  $B$  et le système  $A + B$  est fermé. La fonction de Lagrange s'écrit alors :

$$L_{A+B} = T_A(q_A, \dot{q}_A) + T_B(q_B, \dot{q}_B) - U(q_A, q_B) \quad (1.51)$$

L'énergie cinétique  $T_B$  n'est fonction que du temps et est donc le résultat de la dérivée totale par rapport au temps d'une fonction, voir (1.22). Par conséquent, elle peut être soustraite de la fonction de Lagrange totale. Nous avons donc :

$$L_{A+B} = T_A(q_A, \dot{q}_A) - U(q_A, q_B(t)) \quad (1.52)$$

avec  $U$  qui dépend explicitement des coordonnées et du temps.

Dans le cas particulier d'une unique particule dans un champ extérieur, la fonction de Lagrange est :

$$L = \frac{mv^2}{2} - U(\vec{r}, t) \quad (1.53)$$

et l'équation de Newton (1.45) devient :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = - \frac{\partial U(\vec{r}, t)}{\partial \vec{r}} \quad (1.54)$$

Dans le cadre d'un champ uniforme ( $U$  ne dépend plus du temps), la force définie en (1.46) devient :

$$\begin{aligned}\vec{F} &= -\frac{dU(\vec{r})}{d\vec{r}} \\ \vec{F}.d\vec{r} &= -dU(\vec{r}) \\ \vec{F}.\vec{r} &= -U(\vec{r})\end{aligned}\tag{1.55}$$

# Chapitre 2

## Lois de conservation

### 2.1 Énergie

Les *intégrales premières* ou *intégrales du mouvement*, sont les fonctions de  $q_i$  et  $\dot{q}_i$  qui conservent une valeur constante au cours du mouvement. Elles sont additives, c'est-à-dire qu'avant et après une interaction, leur somme garde une valeur identique.

Commençons par l'intégrale première qui découle de l'*uniformité du temps*.

Pour un système fermé à  $s$  degrés de liberté, nous avons :

$$\frac{dL}{dt} = \sum_{i=1}^s \frac{\partial L}{\partial q_i} \frac{dq_i}{dt} + \sum_{i=1}^s \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \frac{d\dot{q}_i}{dt} + \frac{\partial L}{\partial t} \quad (2.1)$$

L'uniformité du temps donne  $\frac{\partial L}{\partial t} = 0$  et en utilisant l'équation (1.20), nous avons :

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= \sum_{i=1}^s \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i \right) + \sum_{i=1}^s \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \ddot{q}_i \\ &= \sum_{i=1}^s \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i \right) \\ 0 &= \frac{d}{dt} \left( \sum_{i=1}^s \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i - L \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Par conséquent, la quantité :

$$E = \sum_{i=1}^s \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i - L \quad (2.3)$$

est constante dans le temps pour un système fermé.  $E$  est l'*énergie* du système. Et puisque la fonction de Lagrange est additive, l'énergie l'est aussi. Les systèmes mécaniques dont l'énergie se conserve sont appelés *systèmes conservatifs*. Enfin, si le système est placé dans un champ extérieur constant par rapport au temps alors la loi de conservation de l'énergie reste valable car la fonction de Lagrange est implicitement indépendant du temps.

À partir de l'équation (1.41), nous pouvons écrire :

$$\sum_{i=1}^s \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i = \sum_{i=1}^s \frac{\partial (T - U)}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i = \sum_{i=1}^s \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i \quad (2.4)$$

car l'énergie potentielle  $U$  ne dépend que des coordonnées (voire du temps). Nous savons que l'énergie cinétique  $T = f(\dot{q}^2)$ . Or pour une fonction homogène de degré  $\alpha$ , telle  $f(t.x) = t^\alpha f(x)$ , alors le théorème d'Euler donne pour cette fonction :

$$\sum_i x_i \frac{\partial f(x)}{\partial x_i} = \alpha f(x) \quad (2.5)$$

Appliquée à l'énergie cinétique, cela donne :

$$\sum_{i=1}^s \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i = 2T = \sum_{i=1}^s \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i \quad (2.6)$$

ce qui permet de conclure à, en complétant l'équation (2.3) :

$$E = T(q, \dot{q}) + U(q) \quad (2.7)$$

soit en coordonnées cartésiennes :

$$E = \sum_a \frac{m_a \vec{v}_a^2}{2} + U(\{\vec{r}_i\}_1^s) \quad (2.8)$$

## 2.2 Impulsion

Après l'uniformité du temps, nous allons étudier les conséquences de l'homogénéité de l'espace. Dans ce cadre, les propriétés mécaniques d'un système fermé ne changent pas lors d'un déplacement parallèle du système dans son entier. Supposons ainsi que la fonction de Lagrange reste inchangée pour un déplacement infinitésimal tel que :  $\vec{r}_a \rightarrow \vec{r}_a + \vec{\epsilon}$ , i.e.  $\delta L = 0$  :

$$\begin{aligned} \delta L(\vec{r}_a, \vec{v}_a) &= \sum_a \frac{\partial L}{\partial \vec{r}_a} \delta \vec{r}_a + \sum_a \frac{\partial L}{\partial \vec{v}_a} \delta \vec{v}_a \\ &= \sum_a \frac{\partial L}{\partial \vec{r}_a} \vec{\epsilon} \text{ puisque } \delta \vec{v}_a = \vec{0} \end{aligned} \quad (2.9)$$

donc  $\delta L = 0$  est équivalent à :

$$\begin{aligned} \forall \vec{\epsilon}, \sum_a \frac{\partial L}{\partial \vec{r}_a} \vec{\epsilon} &= 0 \\ \forall \vec{\epsilon}, \vec{\epsilon} \cdot \sum_a \frac{\partial L}{\partial \vec{r}_a} &= 0 \\ \Leftrightarrow \sum_a \frac{\partial L}{\partial \vec{r}_a} &= 0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Or les équations de Lagrange (1.42) donnent :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \vec{v}_a} \right) &= \frac{\partial L}{\partial \vec{r}_a} \\ \Leftrightarrow \sum_a \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \vec{v}_a} \right) \right) &= \sum_a \left( \frac{\partial L}{\partial \vec{r}_a} \right) \end{aligned}$$

En appliquant l'équation (2.10), nous avons :

$$\sum_a \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \vec{v}_a} \right) \right) = \frac{d}{dt} \sum_a \left( \frac{\partial L}{\partial \vec{v}_a} \right) = \vec{0} \quad (2.11)$$

Ainsi, dans un système fermé, la quantité vectorielle :

$$\vec{P} = \sum_a \frac{\partial L}{\partial \vec{v}_a} \quad (2.12)$$

est inchangée pendant le mouvement. Le vecteur  $\vec{P}$  est l'*impulsion*<sup>1</sup> du système. En utilisant l'équation (1.41), nous obtenons :

$$\begin{aligned} L &= \sum_a \frac{m_a \vec{v}_a^2}{2} - U(\{\vec{r}_a\}_1^s) \\ \Rightarrow \frac{\partial L}{\partial \vec{v}_a} &= \frac{m_a}{2} \frac{2\vec{v}_a}{\partial \vec{v}_a} - \frac{\partial U}{\partial \vec{v}_a} \\ &= m_a \vec{v}_a \end{aligned} \quad (2.13)$$

Ainsi :

$$\vec{P} = \sum_a m_a \vec{v}_a \quad (2.14)$$

avec  $\vec{P} = \sum_a \vec{p}_a$  pour un système fermé en l'absence de champ extérieur.

Supposons l'existence d'un champ extérieur telle que  $U \rightarrow U(z)$  en coordonnées cartésiennes, les équations de Newton (1.45) donnent :

$$\begin{aligned} m_a \frac{dv_x}{dx} &= -\frac{\partial U}{\partial x} = 0 \\ m_a \frac{dv_y}{dy} &= -\frac{\partial U}{\partial y} = 0 \\ m_a \frac{dv_z}{dz} &= -\frac{\partial U}{\partial z} \end{aligned}$$

et donc, dans ce cas,  $P_x$  et  $P_y$  se conservent donc.

Une conséquence de l'équation (2.10) en accord avec celle de (1.46) pour la force  $\vec{F}_a$  agissant sur le point matériel  $a$  est que :

$$\sum_a \vec{F}_a = \vec{0} \quad (2.15)$$

i.e. que la somme de toutes les forces s'exerçant sur toutes les particules d'un système fermé est absolument nulle. Dans le cas particulier de deux particules, il y a  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}$ . Les deux forces sont égales mais opposées, il s'agit de la loi de l'égalité entre l'action et la réaction.

Dans le cadre du mouvement décrit par les coordonnées généralisées, nous avons :

— les *impulsions généralisées* :

$$p_i = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \quad (2.16)$$

— les *forces généralisées* :

$$F_i = \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (2.17)$$

— les équations de Lagrange :

$$\dot{p}_i = F_i \quad (2.18)$$

---

1. Anciennement appelée *quantité de mouvement*

## 2.3 Centre d'inertie

Supposons deux référentiels  $(K)$  et  $(K')$  tels que le second se meut à la vitesse  $\vec{V}$  par rapport au premier. Nous avons donc  $\vec{v}_a = \vec{v}'_a + \vec{V}$ , soit, pour l'impulsion :

$$\begin{aligned}\vec{P} = \sum_a m_a \vec{v}_a &= \sum_a m_a \vec{v}'_a + \sum_a m_a \vec{V} \\ \Leftrightarrow \vec{P} &= \vec{P}' + \vec{V} \sum_a m_a\end{aligned}\quad (2.19)$$

Il existe toujours un référentiel  $(K')$  tel que le système est considéré comme au repos, soit  $\vec{P}' = \vec{0}$ . La vitesse de ce référentiel par rapport à  $(K)$  peut s'écrire :

$$\vec{V} = \frac{\vec{P}}{\sum_a m_a} = \frac{\sum_a m_a \vec{v}_a}{\sum_a m_a} \quad (2.20)$$

et elle définit la vitesse dans son ensemble du système mécanique ayant une impulsion  $\vec{P}$  non nulle. Et une analogie avec le mouvement d'un point matériel est évidente en posant sa masse comme  $\mu = \sum_a m_a$ . La masse est donc *additive*. La relation (2.20) peut aussi s'écrire comme :

$$\begin{aligned}\vec{V} = \frac{\vec{R}}{dt} &= \frac{\sum_a m_a \frac{d\vec{r}_a}{dt}}{\sum_a m_a} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\sum_a m_a \vec{r}_a}{\sum_a m_a} \right) \\ \Leftrightarrow \vec{R} &= \frac{\sum_a m_a \vec{r}_a}{\sum_a m_a}\end{aligned}\quad (2.21)$$

Ainsi la vitesse d'un système dans son ensemble est la vitesse de déplacement du point de l'espace dont le rayon vecteur est défini par l'équation (2.21). Ce point est appelé *centre d'inertie* du système mécanique.

Il s'agit d'une généralisation de la loi d'inertie énoncée en (1.26) pour un système fermé dont le centre d'inertie coïncide avec le point matériel. En conclusion, pour étudier les propriétés mécaniques d'une système fermé, il est intéressant de choisir le référentiel dans lequel son centre d'inertie est au repos et le mouvement rectiligne et uniforme du système peut alors être occulté. Soit  $E_{\text{int}}$  l'énergie interne d'un système fermé au repos, elle comprend l'énergie cinétiques du mouvement relatif des particules dans le système ainsi que l'énergie potentielle de leur interaction mutuelle. L'énergie totale d'un système mû dans son ensemble par une vitesse  $\vec{V}$  peut s'écrire :

$$E = \frac{\mu \vec{V}^2}{2} + E_{\text{int}} \quad (2.22)$$

En effet, dans le référentiel  $(K)$  :

$$\begin{aligned}E &= \frac{1}{2} \sum_a m_a \vec{v}_a^2 + U = \frac{1}{2} \sum_a m_a (\vec{v}'_a + \vec{V})^2 + U \\ &= \frac{1}{2} \sum_a m_a \vec{v}'_a^2 + \frac{1}{2} \sum_a m_a \vec{V}^2 + \sum_a m_a \vec{v}'_a \vec{V} + U \\ &= \frac{\mu}{2} \vec{V}^2 + \vec{V} \sum_a m_a \vec{v}'_a + \frac{1}{2} \sum_a m_a \vec{v}'_a^2 + U\end{aligned}\quad (2.23)$$

$$(2.24)$$

Puisque :

$$\begin{aligned} E' &= \frac{1}{2} \sum_a m_a \vec{v}_a'^2 + U \\ \vec{P}' &= \sum_a m_a \vec{v}_a' \end{aligned}$$

alors nous arrivons à :

$$E = E' + \vec{V} \cdot \vec{P}' + \frac{\mu}{2} \vec{V}^2 \quad (2.25)$$

qui est la loi de transformation de l'énergie lors d'un changement de référentiel se mouvant l'un par rapport à l'autre comme défini. Aussi, dans le cas d'un système mécanique au repos dans le référentiel  $(K')$ , alors  $\vec{P}' = \vec{0}$  et  $E'$  est l'énergie interne de ce système. Nous retombons alors sur l'équation (2.22).

## 2.4 Moment cinétique