

# Chapitre 1

## Principes de la Mécanique

L'expérience a montré que tous les phénomènes observés dans la nature obéissent à des lois bien déterminées. Ces lois peuvent être, en plus, *déterministes* ou *indéterministes*. L'analyse des lois du mouvement, des lois des phénomènes électromagnétiques et de l'interaction des corps, la plus complexe soit-elle, constituent les objectifs essentiels de la *physique*. Autrement-dit, la physique a pour objet l'étude des propriétés de la matière et des lois qui la régissent. Dans ce chapitre, on étudiera les principes de base de la mécanique classique.

### 1.1 Mouvement mécanique

L'univers est constitué par un ensemble de corps interagissant continuellement les uns avec les autres et se trouvant perpétuellement en mouvement. Le mouvement de la matière prend des formes diverses et complexes. On citera, à titre d'exemple, le mouvement mécanique, électromagnétique, thermique, etc. La forme mécanique du mouvement est connue comme la forme la plus simple du mouvement de la matière dans l'univers.

L'étude du mouvement mécanique nous apprend à connaître deux modes de mouvement : le mouvement *corpusculaire* et le mouvement *ondulatoire*. Le premier possède deux caractéristiques : (1) le corps en mouvement est localisé dans l'espace ; (2) l'existence d'une trajectoire bien définie. Par contre, le deuxième mode de mouvement se caractérise par une délocalisation spatiale en ce sens que l'on associe aucun corps localisé à la propagation d'une onde, celle-ci étant le mouvement d'un certain milieu. Dans le macrocosme, les deux mouvements sont nettement délimités.

L'étude des lois du mouvement mécanique fait l'objet d'une branche de la physique appelée *mécanique*. En fait, la mécanique se divise en trois parties : la *cinématique*, la *dynamique* et la *statique*. La cinématique s'intéresse au mouvement des corps indépendamment des causes qui le provoquent ou le modifient. La cinématique étudie donc la géométrie du mouvement. Par contre, la dynamique étudie les causes qui engendrent ou modifient le mouvement. La statique étudie les lois d'équilibre d'un système de corps.

Si l'on connaît les lois du mouvement des corps, on peut dégager les lois d'équilibre. En général, les lois de la statique sont étudiées en parallèle avec les lois de la dynamique.

**A Espace :** La notion du mouvement est une notion intuitive inséparable de celle du *repère* ou *d'espace*. C'est un concept relié à un phénomène d'ensemble de corps. Le mouvement des corps s'effectue relativement l'un par rapport à l'autre. Autrement-dit au cours du mouvement, il se produit une variation de la disposition relative des corps ou des parties différentes d'un même

corps (ce phénomène est appelé *déformation*). Il découle de cela que le repos est une absence de modification dans les relations spatiales entre les choses. Cette affirmation est entièrement relative. En réalité, le repos est un mouvement qu'une modification de point de vue a annulé. Par exemple, une caisse chargée sur un train, se trouvant en mouvement par rapport à la gare, est au repos par rapport au train. C'est sur cette affirmation de l'existence de points de vues équivalents que repose la science du mouvement. Cette affirmation porte le nom de *principe de relativité*. Il s'agit d'un principe d'invariance des lois de la nature par certains changements de points de vues (qu'il faut préciser). Dans un certain sens, le principe de relativité est un principe d'ordre, car il permet d'établir des classes d'équivalence entre phénomènes qui semblent être inégaux. Newton identifia le mouvement qui est *comme nul* au mouvement de translation rectiligne uniforme (Par mouvement uniforme, on entend celui où les espaces parcourus par le corps en question en des temps égaux quelconques sont égaux entre eux). Mais, si repos et mouvement sont équivalents, si la différence entre repos et mouvement est entièrement liée au choix du repère, alors on peut dire, renversant la proposition, que le mouvement uniforme est comme un repos, c'est-à-dire n'a pas besoin de moteur pour perdurer. Il se conserve et s'entretient de lui-même. Newton fera, plus tard, de cet énoncé sa première loi, encore appelée *loi d'inertie*.

Dans tout mouvement, on est en présence d'au moins de deux corps. Si nous sommes en présence d'un seul corps, la notion de déplacement n'a pas de sens. Ainsi, pour décrire le mouvement on peut toujours prendre l'un des corps comme *corps de référence*. Ce corps de référence est appelé *système de référence, repère ou espace*. Tout système de référence est donc lié à un ou plusieurs corps.

Le système de référence lié à un certain corps de référence peut se présenter, par exemple, par un système de coordonnées rectangulaires. La position de tous les points de l'espace se définit de façon univoque par rapport à trois axes, mutuellement perpendiculaires, constamment reliés au corps de référence et passant par un point connu appelé *origine* du système de coordonnées. Chaque point de l'espace sera alors défini par trois nombres (coordonnées du point) indiquant les distances de l'origine des coordonnées jusqu'aux pieds des perpendiculaires abaissées du point considéré sur les axes de coordonnées.

Mathématiquement, la position d'un point matériel<sup>1</sup> peut être représentée par un point  $P$  d'un espace affine réel  $\mathcal{E}$  à trois dimensions. Selon les cours élémentaires de la géométrie, à tout couple  $P, P' \in \mathcal{E}$ , on peut associer un élément  $\overrightarrow{PP'} = \overrightarrow{P'P}$  d'un espace  $E$  (à trois dimensions) construit sur le corps des réels. Le vecteur  $\overrightarrow{PP'}$  est appelé *vecteur de déplacement*.  $E$  est dit *l'espace vectoriel des déplacements*. Si  $O$  est un point de l'espace affine  $\mathcal{E}$  (appelé *origine*) et  $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  une base de  $E$ , alors  $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  est dit *repère de l'espace*. A un point  $P \in \mathcal{E}$ , on associe donc un triplet  $(x, y, z)$  tel que :

$$\overrightarrow{OP} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}. \quad (1.1)$$

Les quantités  $x, y, z$  sont appelées *coordonnées cartésiennes du point  $P$*  (figure 1-1).

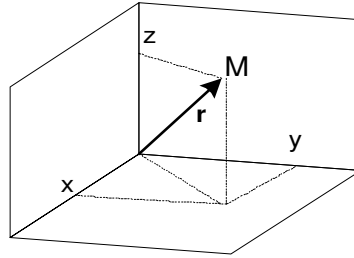
A la notion d'espace est attachée la notion de distance. La distance entre deux points voisins  $(x, y, z)$  et  $(x + dx, y + dy, z + dz)$  est donnée par l'expression (caractéristique des espaces euclidiens)

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (1.2)$$

qui est invariante dans tout changement de repère euclidien.

D'après Newton, il existe un espace absolu immobile, vide et lié au soleil appelé *éther* ou *espace absolu*. Ainsi, le mouvement se révèle, selon Newton, par ses causes et par ses effets

1. On assimile à un point matériel le centre de masse d'un corps suffisamment petit.

Figure 1.1 – Position d'un point matériel  $M$  dans un système rectangulaire.

physiques, c'est-à-dire par les forces vraies qui le manifestent. Il est admis aussi que cet espace est homogène dans toutes ses parties et isotrope, c'est-à-dire que ses propriétés sont indépendantes de la direction. (Ceci nous laisse penser qu'ils existent certaines lois de conservation cachées derrière). On notera, que grâce à ces propriétés, les lois de Kepler décrivant le mouvement des planètes autour du soleil sont indépendantes de la position du soleil et de l'orientation dans l'espace du plan dans lequel se déplace une planète donnée. L'espace physique est donc équivalent à celui admis dans la géométrie d'Euclide.

Les notions d'espace homogène et isotrope sont tout à fait admissibles. Par contre, l'hypothèse sur l'existence d'un espace complètement immobile, non relié à quoi que ce soit, est erronée. Comme l'a souvent fait remarquer Einstein, l'espace absolu de Newton n'est pas satisfaisant pour deux raisons :

1. Il n'est investi d'aucune réalité comparable à celle dont jouit la matière.
2. Il détermine le comportement des objets réels, mais n'est d'aucune façon affecté par ces mêmes objets.

Quand on passe d'un système de référence à un autre on ne doit tenir compte que des propriétés géométriques du système de référence et non pas des propriétés physiques des corps reliés au système de référence.

**B Temps :** Le mouvement mécanique est une variation de la position du corps dans l'espace avec le temps par rapport à un corps de référence. Le temps est défini comme étant la mesure de la durée du processus. On peut donc mesurer la grandeur du temps écoulé en évaluant la durée d'un certain processus ou d'un phénomène. La mesure du temps peut s'effectuer à l'aide d'un processus se répétant périodiquement (*horloge*). En physique, on choisit habituellement comme unité de temps la seconde,  $\frac{1}{86400}$  du jour solaire moyen, c'est-à-dire le temps de la rotation complète de la Terre autour de son axe. A la notion de temps se rattachent les notions suivantes : simultanéité, ordre de succession de deux instants, durée de l'intervalle qui les sépare, etc.

L'expérience a montré que lorsque les corps se meuvent dans l'espace à une faible vitesse, très inférieure à celle de la lumière  $c = 3.10^8 m/s$ , on peut considérer que le temps ne dépend pas des propriétés des corps et de leurs mouvements : temps absolu de Newton. On peut admettre que dans ces conditions l'écoulement du temps est le même pour des processus et des phénomènes différents, indépendamment de la nature du phénomène et des propriétés des corps participants à ce phénomène. Donc, d'après Newton, le temps est une durée absolue qui existe indépendamment des corps. Selon la théorie de la relativité restreinte, cette hypothèse est erronée puisque la durée est inséparable de la matière.

**C Vitesse instantanée :** La définition du mouvement comme modification des relations spatiales entre les choses, et l'idée, qui en découle, selon laquelle il existe des mouvements uniformes équivalents au repos, permettent d'étudier le mouvement pour lui-même, en soi, sans tenir compte des causes qui l'engendrent. Le concept fondamental de cette description dite *cinématique* est celui de *vitesse* inventée par Galilée. Cette grandeur vectorielle caractérise le mouvement, à chaque instant, indépendamment des causes. Selon Galilée, la vitesse mesure la variation du vecteur position par unité de temps. Le temps apparaît donc comme le paramètre de la description du mouvement.

**D Masse :** La masse d'un corps est une notion théorique qui correspond à l'idée intuitive et floue de quantité de matière. Autrement-dit, la notion de masse vise à caractériser la quantité de matière contenue dans un objet physique. Cette grandeur se révèle d'abord à nos sens par l'intermédiaire du poids de l'objet : la force de pesanteur qu'exerce la Terre est de toute évidence d'autant plus grande que l'objet contient plus de matière. La masse caractérise également la résistance d'un corps à la modification de son mouvement. Autrement dit, plus la masse d'un objet est grande, plus il est difficile de le mettre en mouvement ou de l'arrêter. Selon la mécanique newtonienne, la masse est additive.

Si  $\mathcal{D}$  représente le domaine de l'espace occupé par un corps matériel  $\Sigma$ , la masse se définit de façon abstraite comme une mesure complètement additive définie sur  $\mathcal{D}$ . La masse du corps matériel  $\Sigma$ , que l'on désigne par  $m(\Sigma)$  ou plus simplement par  $m$ , est par définition

$$m(\Sigma) = \int_{P \in \mathcal{D}} \rho(P) dV(P), \quad (1.3)$$

où  $\rho(P)$  est la densité scalaire de masse au point  $P$  du domaine et  $dV(P)$  un élément de volume infinitésimal qui entoure le point  $P$ .

Si le domaine  $\mathcal{D}$  est vide de matière, on désigne l'ensemble  $\Sigma$  par  $\emptyset$  et  $m(\emptyset) = 0$ . Si on fait une partition de  $\Sigma$  en deux sous-ensembles matériels disjoints,  $\Sigma_1$  et  $\Sigma_2$ , on a :

$$m(\Sigma) = m(\Sigma_1) + m(\Sigma_2). \quad (1.4)$$

## 1.2 Représentations mathématiques

Il apparaît que la réalité peut être décrite avec une grande précision à l'aide de représentations mathématiques. De telles représentations sont constituées par des objets mathématiques plus ou moins complexes qui sont mis en correspondance avec la réalité physique. Pour bâtir la dynamique, Newton fait correspondre le mouvement d'un mobile à une représentation analytique de sa position en fonction du temps  $\vec{\mathbf{r}}(t)$  puis propose des hypothèses simples sur cette fonction : continuité et dérivabilité. De même, il postule qu'il existe une cause, à l'origine du mouvement, représentée par un vecteur  $\vec{\mathbf{F}}$  appelé *vecteur force*. Ainsi, au système réel dynamique est associé un objet mathématique relativement complexe constitué par l'ensemble  $\{\vec{\mathbf{r}}(t), \vec{\mathbf{F}}\}$ . A l'intérieur de cette représentation mathématique, les lois de la physique prennent l'aspect de relations ou d'équations qui gouvernent l'objet mathématique. En dynamique, on pose  $\vec{\mathbf{F}} = m\vec{\gamma}$ , où l'accélération  $\vec{\gamma}$  est obtenue en dérivant deux fois  $\vec{\mathbf{r}}(t)$  par rapport au temps. C'est l'existence de telles relations qui donne son importance à la représentation mathématique formulée au début. C'est précisément cela qui fait de la physique une science exacte, car elle est capable de prédictions et de vérifications quantitatives.

Les raisons de croire en la validité de cette dualité entre la réalité physique et les représentations mathématiques sont les suivantes :

1. Elle peut être vérifiée avec une grande précision à l'aide des instruments de mesure ;

2. Elle a été confirmée dans plusieurs expériences effectuées à des endroits différents ;
3. Les conséquences tirées de l'analyse mathématique de la représentation ont conduit à la prédiction de phénomènes nouveaux.

Bien-entendu, ces représentations sont appelées à s'approfondir au cours de l'évolution de nos connaissances.

L'établissement d'une loi passe généralement par quatre étapes :

1. La réunion de données empiriques quantitatives grâce à l'expérience. Ces données peuvent être aussi reliées par des règles empiriques.
2. L'introduction d'un *schéma mathématique* ou *modèle* qui permet d'interpréter les données et de les relier entre-eux.
3. L'analyse détaillée du schéma mathématique, c'est-à-dire utiliser le schéma pour prédire de nouvelles relations et de nouveaux phénomènes.
4. Vérification par l'expérience de ces nouvelles prédictions.

### 1.3 Lois intégrales et lois différentielles

En physique, on distingue deux types de lois : *lois intégrales* (descriptives) et *lois différentielles* (causales). Les lois de Kepler sont des lois intégrales, car elles donnent une réponse complète à la question de savoir comment les planètes se meuvent autour du Soleil (forme elliptique de l'orbite, égalité des aires balayées en des temps égaux, relation entre demi-grands axes et durée de la période de révolution) sans s'intéresser ni à la nature des astres ni aux causes de leur mouvement. On conclut donc que les lois intégrales mathématisent des mouvements, sans fournir le moyen de calculer comment, de l'état de mouvement d'un système, découle le mouvement qui le suit immédiatement dans le temps. Les lois différentielles en physique répondent justement à la question de savoir comment un système varie sous l'influence de forces extérieures pendant un intervalle de temps très court. C'est ce que font justement les lois de Newton.

### 1.4 Lois fondamentales du mouvement

L'expérience montre que le mouvement de tout corps n'est déclenché ou modifié que par des interactions avec d'autres corps. La modification du mouvement s'accompagne tout d'abord d'une certaine variation du vecteur vitesse en grandeur, en direction ou les deux en même temps. Donc, les actions extérieures déterminent d'une certaine façon la vitesse du corps. Par conséquent, on peut affirmer que si le corps n'est pas soumis à des actions extérieures, il peut se mouvoir avec une vitesse constante ou demeurer à l'état d'équilibre. C'est *la loi d'inertie de Galilée*.

Les lois de la dynamique établissent les liens entre le mouvement du corps et les causes ayant déclenchées ou modifiées ce mouvement.

#### 1.4.1 Force ; Première loi de Newton

En mécanique on entend par force la cause physique de la modification de l'état du mouvement du corps ou la modification de la forme du corps ou les deux ensemble. Elle apparaît comme une conséquence de l'interaction d'au moins deux corps. Une force est définie comme une

grandeur vectorielle appliquée dans le sens du mouvement ; elle est notée par  $\vec{F}$ . Les interactions mécaniques d'un corps avec d'autres ou l'interaction d'autres corps avec le corps considéré peuvent maintenant être définies au moyen des forces mises en action par les autres corps et agissant sur le corps considéré. La notion de force réduit donc le problème du mouvement de plusieurs corps à un problème d'interaction à deux corps. C'est *le principe de subdivision*.

L'action exercée sur un corps par plusieurs forces  $\vec{F}_1, \dots, \vec{F}_n$  est équivalente à l'action d'une force dite *résultante des forces* ; elle est égale à la somme vectorielle de ces forces :  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \dots + \vec{F}_n$ . Ce corps sera dit *en équilibre*, si et seulement si, la somme vectorielle de ces forces est nulle

$$\vec{F}_1 + \dots + \vec{F}_n = 0. \quad (1.5)$$

Cette équation est appelée *condition d'équilibre* (figure 1-2). Si cette condition n'est pas vérifiée,

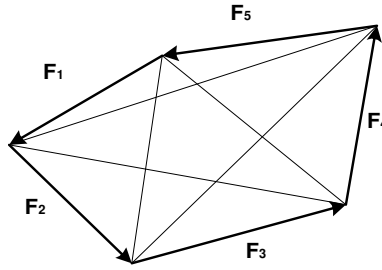


Figure 1.2 – Condition d'équilibre - la résultante des forces appliquées à un corps est nulle.

il y a mouvement. Le problème fondamental reste comment cette force, en grandeur et direction, est reliée à la variation du mouvement du corps. Autrement dit, comment définir la loi établissant le rapport de causalité entre la force et le mouvement. Ce problème a été résolu par Newton en se basant sur la loi d'inertie de Galilée. Cette loi est appelée *première loi de Newton* et s'énonce ainsi : *Tout corps se trouve à l'état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme tant que des forces appliquées ne provoquent des variations de cet état*. Donc, seule une force peut modifier l'état de repos ou le mouvement rectiligne uniforme du corps.

#### 1.4.2 Seconde loi de Newton

La première loi de Newton stipule que si un corps subit l'action d'une force, son mouvement n'est plus rectiligne et uniforme. Mais, cette même loi ne donne aucune réponse sur la nature du mouvement qu'aura le corps sous l'action de cette force. Cette réponse est apportée par la seconde loi de Newton. Selon cette loi le produit de la masse d'un corps par son accélération est proportionnel à la grandeur de la force agissant sur le corps considéré. Les directions de la force et de l'accélération coïncident.

La seconde loi de la dynamique a été énoncée par Newton sous une forme plus générale. Pour caractériser l'état mécanique d'un corps en mouvement, Newton a introduit la notion de *quantité du mouvement du corps* ou *d'impulsion*. La quantité du mouvement d'un corps est une grandeur vectorielle égale au produit de la masse par le vecteur vitesse. Si l'on désigne par  $\vec{p}$  la quantité du mouvement du corps de masse  $m$ , on a :

$$\vec{p} = m \vec{v}. \quad (1.6)$$

La formule (1.6) associe donc à une grandeur cinématique (la vitesse  $\vec{v}$ ) une grandeur dynamique (la quantité du mouvement  $\vec{p}$ ). On pourrait presque dire que Newton procède ici par

cette définition à une dynamification de la vitesse. Newton énonça la seconde loi de la dynamique de la manière suivante : *La variation de la quantité du mouvement est proportionnelle à la force agissante et s'effectue suivant la direction de la droite de l'action de cette force.* En d'autres termes, la dérivée vectorielle de la quantité du mouvement d'un corps par rapport au temps est égale en grandeur à la force appliquée :

$$\vec{\mathbf{F}} = \frac{d\vec{\mathbf{p}}}{dt} = \frac{d(m\vec{\mathbf{v}})}{dt}. \quad (1.7)$$

### 1.4.3 Troisième loi de Newton

Dans la première et la seconde loi de Newton, il ne s'agissait que de la force appliquée au seul corps considéré et elles ne donnaient aucune information sur les autres corps. Dans chaque cas concret, lorsqu'on envisage une force quelconque, on indique toujours deux corps : celui sur lequel la force agit et celui qui provoque la force. Le rôle du second corps dans les phénomènes dynamiques se manifestent dans la troisième loi de Newton. Cette loi s'énonce de la manière suivante : *A l'action est toujours opposée une réaction égale, c'est-à-dire que les interactions mutuelles de deux corps sont égales et opposées.* La troisième loi ne révèle rien sur la grandeur des forces et ne fait que constater qu'elles sont égales.

Par exemple, si on pose une masse sur une surface, la surface agit sur la masse avec une force  $\vec{\mathbf{F}}$  dirigée vers le haut et appliquée à la masse, tandis que la masse, de son côté, agit sur la surface avec la force  $-\vec{\mathbf{F}}$  appliquée à la surface.

### 1.4.4 Principe de relativité de Galilée

L'énoncé des lois de la dynamique n'est le même que pour des systèmes *d'axes absolus* ou *galiléens*. En effet, soient deux systèmes de référence, l'un  $Oxyz$  est considéré comme immobile et l'autre  $O'x'y'z'$  en mouvement par rapport au premier avec une vitesse constante  $\vec{\mathbf{V}}$ . Tous les corps au repos par rapport au second système se déplaceront avec la vitesse  $\vec{\mathbf{V}}$  par rapport au premier. Quant aux corps animés dans le second référentiel de la vitesse  $\vec{\mathbf{v}}'$ , ils se déplaceront évidemment à la vitesse

$$\vec{\mathbf{v}} = \vec{\mathbf{V}} + \vec{\mathbf{v}}' \quad (1.8)$$

dans le référentiel au repos. Puisque la vitesse  $\vec{\mathbf{V}}$  est constante, l'accélération du corps dans le référentiel mobile est égale à l'accélération dans le référentiel au repos, c'est-à-dire

$$\vec{\mathbf{a}} = \vec{\mathbf{a}}'. \quad (1.9)$$

L'accélération est donc la même dans tous les systèmes de référence en mouvement uniforme et rectiligne les uns par rapport aux autres.

Si tous les référentiels choisis effectuent un mouvement rectiligne et uniforme l'un par rapport à l'autre et si, en outre, il est établi que dans l'un d'eux les lois de la dynamique sont vérifiées, alors l'énoncé de la première et la seconde loi de la dynamique, dans l'un de ces référentiels, reste valable pour tous les autres référentiels. Tous ces référentiels sont dits *galiléens*. C'est seulement dans ces référentiels que la loi d'inertie de Galilée est vérifiée. Cette assertion est dite *principe de relativité de Galilée*. En fait, le principe de relativité de Galilée ne fait que constater que les lois de Newton sont invariables par rapport à des référentiels galiléens. Le principe de relativité d'Einstein étend cette affirmation aux lois de l'électrodynamique et aux autres lois de la physique.

Si  $\vec{\mathbf{r}} = x\vec{\mathbf{i}} + y\vec{\mathbf{j}} + z\vec{\mathbf{k}}$  et  $\vec{\mathbf{r}}' = x'\vec{\mathbf{i}} + y'\vec{\mathbf{j}} + z'\vec{\mathbf{k}}$  représentent les vecteurs positions d'un point  $M$  respectivement par rapport à  $Oxyz$  et  $O'x'y'z'$ , on a :

$$\vec{\mathbf{r}} = \vec{\mathbf{r}}' + \vec{\mathbf{r}}_0, \quad (1.10)$$

où  $\vec{r}_0 = \vec{V}t$  indique la position de l'origine  $O'$  par rapport au référentiel  $Oxyz$  (si on suppose bien évidemment qu'à l'instant  $t = 0$  le vecteur  $\vec{r}_0$  est nul).

Supposons maintenant que le référentiel  $O'x'y'z'$  se déplace à une vitesse  $V$  par rapport à  $Oxyz$ , de sorte que les axes  $Ox$  et  $Ox'$  se trouvent toujours sur une même droite et sont dirigés dans le même sens (figure 1-3). Si, à l'instant  $t = 0$ , les origines des deux référentiels coïncident,

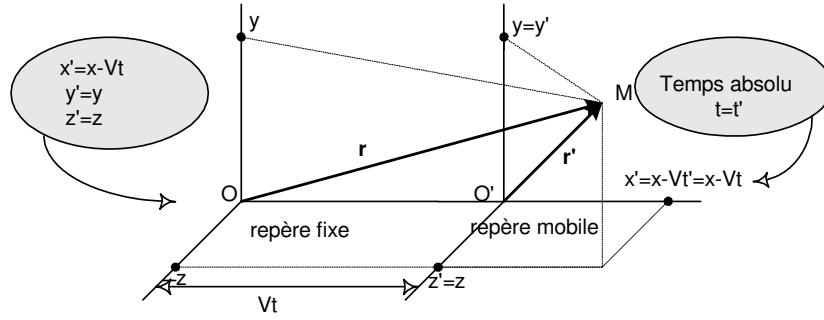


Figure 1.3 – Transformation de Galilée.

la transformation (1.10) s'écrit

$$x' = x - Vt, \quad y' = y, \quad z' = z. \quad (1.11)$$

En déduisant ces égalités, on a supposé que la durée du temps est absolue, c'est-à-dire invariable dans tous les référentiels. Cette proposition intuitive est admise sans démonstration. Cette assertion reste vraie tant que le mouvement des corps possède une vitesse négligeable devant la vitesse de la lumière. Si on désigne par  $t'$  le temps dans le référentiel  $O'x'y'z'$ , il est toujours admis en mécanique de Newton que

$$t' = t. \quad (1.12)$$

Les formules (1.11) et (1.12) portent le nom de *transformation de Galilée*.

Des transformations de Galilée se dégage la loi de composition des vitesses :

$$\frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt} - V, \quad \frac{dy'}{dt} = \frac{dy}{dt}, \quad \frac{dz'}{dt} = \frac{dz}{dt}, \quad (1.13)$$

ou bien

$$v'_x = v_x - V, \quad v'_y = v_y, \quad v'_z = v_z. \quad (1.14)$$

On conclut donc que : *La vitesse du corps le long de l'axe  $x$  dans le référentiel  $Oxyz$  est égale à la somme de la projection de la vitesse du même corps sur l'axe  $x'$  dans le référentiel  $Ox'y'z'$  et de la vitesse du référentiel  $O'x'y'z'$  par rapport à  $Oxyz$ .*

## 1.5 La mécanique analytique

La formulation développée par Newton dans l'étude des lois du mouvement est, par excellence, une formulation purement géométrique. Pour donner un sens mathématique aux lois fondamentales de la dynamique, Newton a utilisé la notion de vecteur pour définir les notions : de vitesse, d'accélération, de force, etc. La résolution d'un problème mécanique par cette formulation nécessite toujours des constructions et des raisonnements géométriques.