

Mickaël Melzani

PHYSIQUE ET MESURE

Histoire et fonctionnement de la physique
à travers la mesure et les unités



ellipses

Chapitre 1.

STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES SCIENCES PHYSIQUES

Les concepts physiques sont des créations libres de l'esprit humain.

A. Einstein & L. Infeld, [77]

1 Exemple introductif

Nous commençons par étudier un exemple simple qui va permettre d'introduire les notions de théorie et de modèle. Il s'agit de l'étude d'un lancer de ballon. Le physicien se pose la question suivante : "comment prédire la portée d'un lancer?". Il faudra d'abord identifier les grandeurs qui vont influencer sur cette distance, puis établir selon quelle dépendance. On se dote d'un lanceur de ballon qui permet de contrôler le tir de manière reproductible, et il est ensuite possible de mesurer la distance entre le point de départ et le point d'impact lors de la retombée au sol. Si le lanceur permet de mener des expériences, il reste également à avancer sur le plan formel.

- Pour cela, il faut avant tout choisir une **théorie** avec laquelle travailler (on suppose ici les différentes théories déjà construites et éprouvées). On peut définir un peu formellement ce qu'est une théorie physique, mais donnons plutôt des exemples : la théorie de la mécanique et de la gravitation de Newton, la théorie thermodynamique, l'électromagnétisme de Maxwell... sont autant d'exemples de théories.

Ici, il semble raisonnable d'utiliser la théorie de la mécanique et de la gravitation de Newton.

Remarquons que le choix d'une théorie implique déjà des hypothèses issues de la connaissance du champ de validité de la théorie : dans le cas présent, que les vitesses des ballons sont petites devant celle de la lumière, sinon il faudrait utiliser la théorie de la relativité restreinte (qui permet justement de décrire le mouvement d'objets relativistes, c'est-à-dire dont la vitesse s'approche de $c_{\text{lumière}} = 3,0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

- Il faut ensuite élaborer un **modèle** de la situation étudiée, c'est-à-dire qu'il faut *traduire dans le langage de la théorie* les faits observés. Schématiquement, cela donne la figure 1.1.

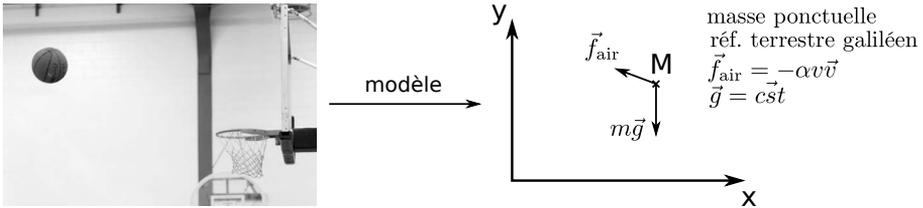


Figure 1.1 – Situation réelle à gauche, et traduction dans le langage de la physique à droite. Il s'agit donc de faire un modèle.

Le modèle permet donc de passer de la situation réelle (et compliquée) à un problème posé dans le langage de la physique (et “simple”). Il est accompagné d'hypothèses simplificatrices.

Ces dernières sont un élément clé. Elles permettent de mener l'étude, et en même temps elles ne doivent pas être trop fortes pour ne pas la mettre en péril. Par exemple ici on néglige la rotation du ballon sur lui-même, on suppose le référentiel terrestre galiléen (donc on néglige la force de Coriolis), on prend une loi simple pour la force \mathbf{f}_{air} qui décrit les frottements, etc.

- Une fois la modélisation effectuée, le problème est posé dans un langage abstrait, souvent mathématique. Il faut alors le résoudre en utilisant les concepts et outils mis à disposition par la théorie. Ici, on utilise un des postulats de base de la théorie de Newton, le principe fondamental de la dynamique :

$$\begin{aligned} m \frac{d\mathbf{v}}{dt} &= \sum \mathbf{force} \\ &= m\mathbf{g} + \mathbf{f}_{\text{air}} \end{aligned} \quad (1.1)$$

avec m la masse du ballon, \mathbf{v} sa vitesse, \mathbf{g} le champ de pesanteur, et \mathbf{f}_{air} la force de frottement de l'air. Le reste est une promenade mathématique dans le monde de la théorie : on résout cette équation en prenant en compte

les conditions initiales (la vitesse v_0 et l'angle θ_0 entre \mathbf{v}_0 et l'horizontale), on en déduit l'expression de la distance d'impact en fonction de v_0 , θ_0 , et des autres paramètres intervenant comme la masse m ou la valeur de g :

$$d_{\text{théo}} = f(v_0, \theta_0, \dots) = \dots \quad (1.2)$$

Il peut être plus ou moins simple d'aboutir à cette expression, et il faut éventuellement utiliser des outils numériques de résolution d'équations. Mais cela ne change rien sur le principe.

- La dernière étape est capitale : il s'agit de confronter les prévisions théoriques ($d = d_{\text{théo}}$ de l'équation 1.2) établies précédemment **aux résultats de l'expérience** (d_{exp} mesuré sur le terrain).

Les mesures expérimentales ne sont pas infiniment précises, et sont donc accompagnées d'une incertitude : on écrit donc la mesure sous la forme $d_{\text{exp}} \pm \Delta d_{\text{exp}}$, par exemple on a mesuré $(20,5 \pm 0,8)$ m. De même du côté de la théorie, certaines données comme la masse m , l'angle initial θ_0 ou la vitesse initiale v_0 ne sont pas connues exactement et font que le résultat théorique (qui dépend de ces données) est aussi accompagné d'une incertitude : on écrit $d_{\text{théo}} \pm \Delta d_{\text{théo}}$, par exemple on calcule $(21,2 \pm 0,5)$ m.

Ainsi, si $d_{\text{théo}} \pm \Delta d_{\text{théo}}$ et $d_{\text{exp}} \pm \Delta d_{\text{exp}}$ ont un intervalle de valeurs communes, alors on dira qu'il y a plus ou moins accord entre théorie et expérience, ou encore que cette série d'expériences est en accord avec les prévisions théoriques, ou encore que le couple modèle-théorie choisi permet de correctement prédire les résultats des expériences en question. Le modèle peut être conservé car la situation décrite fait partie de son champ de validité.

Dans le cas contraire, il y a désaccord. Si on suppose que l'expérimentateur et le théoricien n'ont commis aucune erreur de mesure ou de calcul et que les incertitudes ont été estimées correctement, il reste deux origines possibles à ce désaccord :

- C'est la théorie qui est mise en défaut. Il est possible que les ballons aillent trop vite et qu'il faille utiliser la théorie de la relativité restreinte.
- C'est le modèle qui est mis en défaut, et on peut distinguer trois catégories d'erreurs de modélisation : nous avons effectué des hypothèses trop simplificatrices (il ne fallait pas négliger la rotation du ballon sur lui-même, ou il fallait prendre en compte la force de Coriolis...), ou erronées (la force de frottement n'est pas en $-\alpha v \mathbf{v}$), ou bien nous avons oublié de prendre en compte certains facteurs (il y avait du vent...). Les choix de modélisation s'avèrent dans ce cas inadaptés.

Il faut alors revoir la théorie ou le modèle, établir une nouvelle expression $d_{\text{théo}} = f(v_0, \theta_0, \dots)$, tester son accord avec l'expérience, et continuer ainsi les allers-retours entre modélisation et mesures jusqu'à aboutir à un accord satisfaisant.

2 Définitions de *théorie, modèle, monde observé*

L'exemple précédent est un cas où des théories bien établies existent (mécanique de Newton) et où l'enjeu est de s'en servir correctement pour modéliser une situation : la problématique est au niveau du modèle. Mais bien sûr d'autres cas vont concerner la recherche de nouvelles théories ou le test de théories existantes : la problématique est alors au niveau de la théorie. Quoi qu'il en soit, les notions introduites précédemment sont toujours utilisables et il convient maintenant de les définir plus clairement.

- **Théorie** : une théorie physique est un ensemble de concepts inventés, reliés entre eux par des lois, certaines étant postulées, d'autres déduites de celles postulées.

Une théorie possède toujours un domaine de validité restreint. Une "bonne" théorie permet, avec des postulats peu nombreux et "raisonnables", d'expliquer une grande classe de phénomènes avec une bonne précision.

Exemples : la théorie de la mécanique et de la gravitation de Newton, la théorie de la relativité restreinte, la théorie de la relativité générale, la théorie de la thermodynamique, la théorie de l'optique géométrique, la théorie de l'optique ondulatoire, la théorie de l'électrostatique, la théorie de la magnétostatique, la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell, la théorie de l'électrocinétique, la théorie de la mécanique quantique, la théorie de l'hydrodynamique, etc.

Ainsi dans la suite de ce texte nous emploierons les termes "la théorie utilisée" ou "la théorie" dans le sens bien précis détaillé ci-dessus. Il s'agira donc à chaque fois de la théorie utilisée (ou des théories utilisées conjointement) pour traiter le problème physique en jeu, c'est-à-dire d'un ensemble de concepts, de postulats bien identifiés et de résultats, eux-mêmes d'ordre théorique, qui en découlent.

Ajoutons que cette définition de "théorie" se rapproche de la définition du terme **système de grandeurs** donné par le VIM [55] : "ensemble de grandeurs associé à un ensemble de relations non contradictoires entre ces grandeurs". Nous verrons toutefois qu'un système de grandeurs est un peu plus qu'une théorie, car il faut en plus avoir choisi un ensemble de grandeurs de base indépendantes dimensionnellement (voir p. 200).

- **Modèle** : traduction d'une situation observée en des termes physiques (qui appartiennent à une ou plusieurs théories choisies), rendue possible par des simplifications et des choix.

Exemple : la modélisation du vol du ballon de basket dans la figure 1.1.

Autre exemple : on étudie la formation des images par un appareil photographique. On utilise la théorie de l'optique géométrique (donc pas de diffraction). Dans ce cadre, un modèle possible est d'assimiler l'objectif à une unique lentille mince (simplification, puisqu'il s'agit en fait d'un assemblage complexe de plusieurs lentilles), accompagné du choix de négliger la dispersion du verre. On pourra alors utiliser les relations de conjugaison et les méthodes usuelles de tracé de rayons.

Les sciences physiques sont une discipline mathématisée, et les “termes physiques” utilisés par le modèle sont très souvent des termes mathématiques. Dit autrement, le modèle est alors la traduction en langage mathématique de la situation réelle, traduction rendue possible par la sélection de caractéristiques essentielles pour répondre à la question posée. Mais tous les modèles ne sont pas mathématiques : pensons par exemple aux modèles moléculaires ou cristallographiques dont les éléments de base sont des assemblages d'atomes et de liaisons.

La théorie contient donc l'ensemble des concepts et outils (souvent mathématiques) utilisés, et le modèle est la traduction des faits observés dans ce langage. On a donc schématiquement “théorie \leftrightarrow modèle \leftrightarrow monde observé”.

Introduisons donc un diagramme qui permet de résumer et de présenter ceci de manière imagée. Il comporte trois éléments principaux (voir figure 1.2) :

- **Le monde observé** : observations, expériences, système étudié. Il s'agit de l'ensemble des événements. On y accède via des mesures (accompagnées d'incertitudes). On peut aussi l'appeler “monde des objets et des événements”, “monde réel” ou encore “monde matériel”.
- **Le monde de la théorie** : il regroupe les concepts, grandeurs physiques, postulats, lois, théorèmes, principes appartenant à la théorie en question.
- **Le modèle** : pour chaque situation d'étude particulière, les deux “mondes” précédents sont reliés par un modèle particulier de la situation étudiée. Le modèle est donc, encore une fois, la traduction d'une situation réelle en des termes physiques (qui appartiennent à une théorie choisie), traduction accompagnée d'une nécessaire simplification.

Il ne faut pas confondre les concepts (dont les grandeurs physiques) avec les objets et les événements ! Les deux mondes sont par nature distincts.

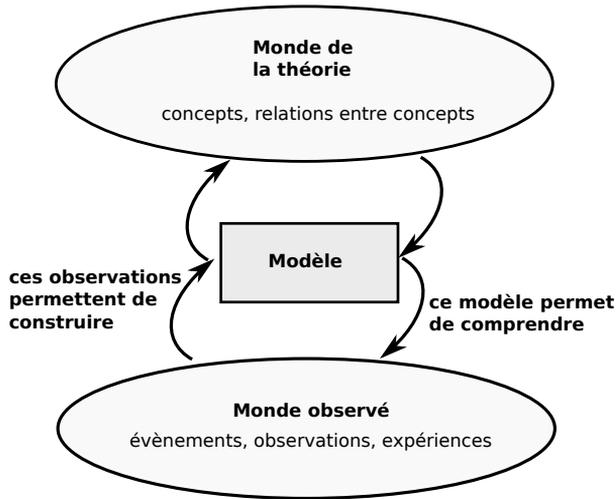


Figure 1.2 – Présentation générale du diagramme des deux mondes.

Dans le cas de la théorie de la mécanique et de la gravitation de Newton, une proposition de diagramme serait celle de la figure 1.3. Les diagrammes d'autres théories sont présentés dans le chapitre 3. Un exemple dans un cas particulier est présenté figure 1.4.

Un dernier exemple, dans le cadre d'un système plus complexe : l'étude du climat de la Terre (figure 1.5). Le système observé est la planète Terre, ou plutôt son atmosphère, ses océans et sa surface. C'est un système complexe qu'il faut retranscrire dans le langage de la physique. Quelles théories utiliser ? La mécanique des fluides pour décrire l'écoulement de l'air et de l'eau, la thermodynamique pour décrire les changements d'état et les échanges thermiques, la chimie pour connaître le devenir des gaz dans l'atmosphère. Quels éléments retenir dans le modèle ? La circulation des océans et de l'atmosphère, la rotation de la Terre, la formation des nuages, l'éclairement solaire, l'albédo de surface... Le chercheur est souvent contraint d'utiliser plusieurs théories et de construire et de tester plusieurs modèles. Une fois les équations obtenues, il faudra souvent recourir à des résolutions numériques. La promenade dans le monde de la théorie peut donc être particulièrement longue et ardue en recherche. Il n'en reste pas moins qu'à la fin, elle aboutit à des prévisions chiffrées qu'il faut comparer aux observations pour pouvoir valider l'ensemble de la démarche. Ces allers-retours ne sont d'ailleurs pas toujours utilisés pour *prévoir* : il s'agit parfois aussi de comprendre une observation non expliquée.

Nous pourrions multiplier les exemples, car cette façon d'opérer est générique en sciences physiques. Il s'agit là de la démarche de modélisation, qui procède par allers-retours entre observations et théorie pour construire une description et une interprétation abstraite efficace du phénomène étudié. La même démarche opère si c'est la théorie qui est construite et testée.

Comment fonctionnent les sciences physiques ?

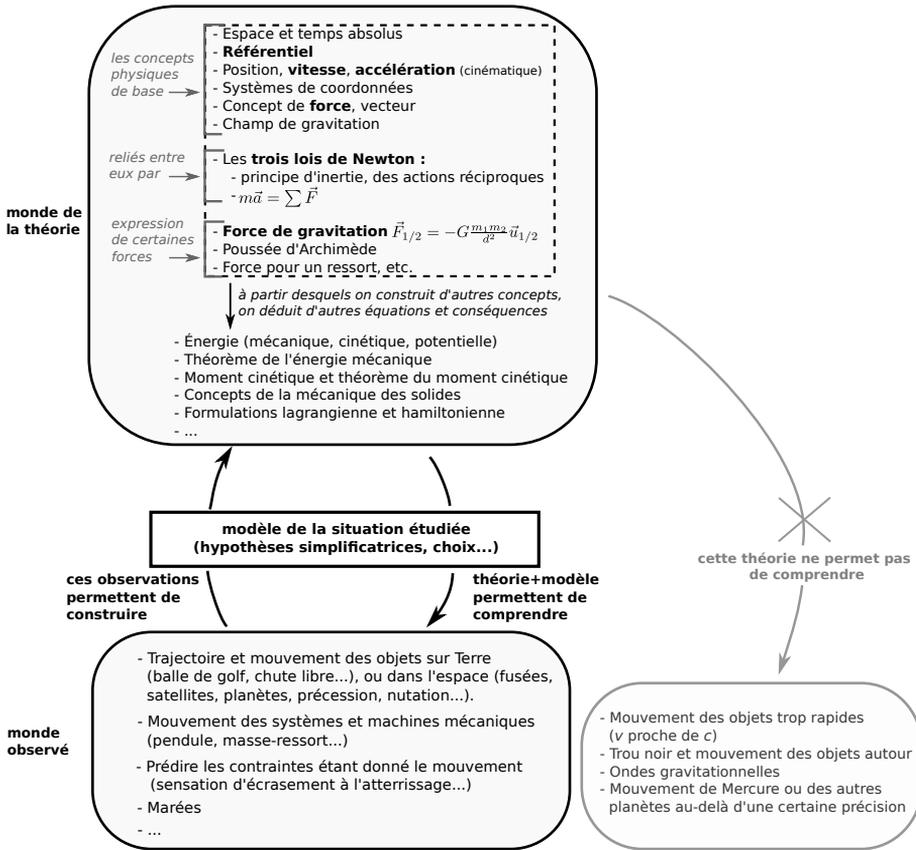


Figure 1.3 – Exemple de diagramme des deux mondes de la théorie de la mécanique et de la gravitation de Newton (ou théorie de la mécanique classique), qui illustre les concepts de cette théorie et son domaine de validité.

3 Définition de *grandeur physique* et rôle de la mesure dans l'utilisation des théories

Concentrons-nous sur le rôle de la mesure dans la démarche d'utilisation des théories. La mesure intervient au moment d'attribuer une valeur numérique extraite de l'expérience aux grandeurs utilisées par la théorie. Dans l'exemple du ballon elle prend place au moment des mesures de durée et de longueur. Les mesures font le pont entre le monde de l'expérience et le monde de la théorie. L'objectif des sciences physiques étant la description du réel, elles sont donc essentielles. Ce qui distingue une théorie purement mathématique d'une théorie physique, c'est l'existence dans cette dernière de grandeurs mesurables, grâce auxquelles il est possible d'établir une connexion avec le réel, de le prédire, de le comprendre, et de tester en retour l'édifice théorique et le modèle choisi.

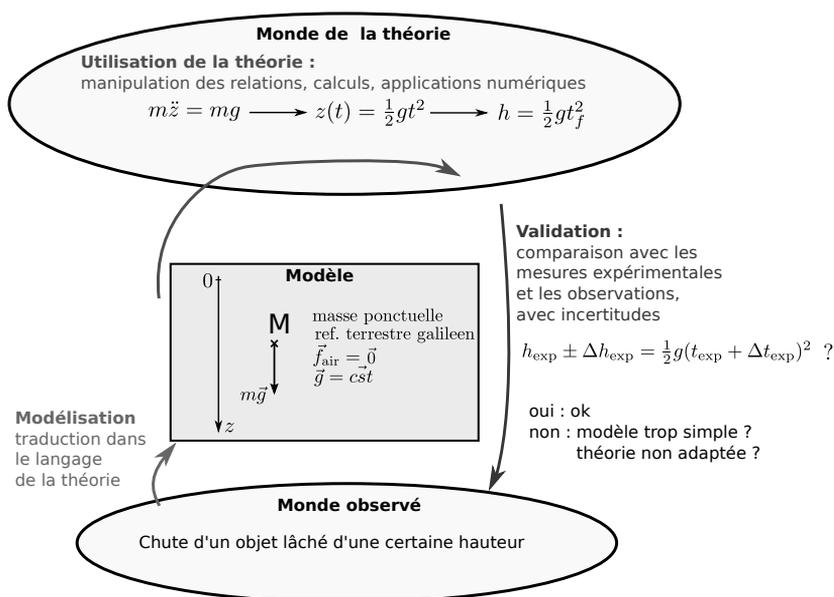


Figure 1.4 – Illustration avec le diagramme des deux mondes de la démarche de modélisation d'une situation physique particulière, ici l'étude d'une chute libre verticale.

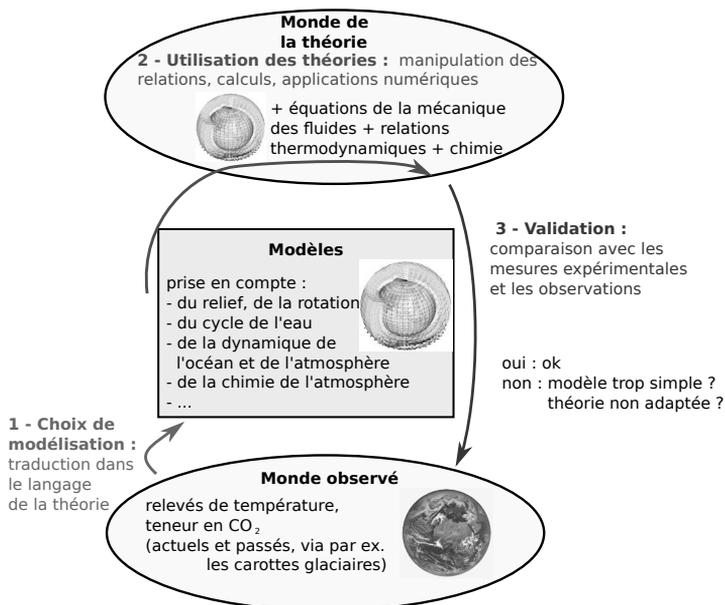


Figure 1.5 – Exemple concernant la modélisation du climat sur Terre.