éduscol
Informer et accompagner les professionnels de l'éducation

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE ET DE LA JEUNESSE

VOIE GÉNÉRALE ET TECHNOLOGIQUE

2DE 1RE TLE

Physique-chimie

ENSEIGNEMENT COMMUN

SPÉCIALITÉ

LA MODÉLISATION, UNE ACTIVITÉ ESSENTIELLE POUR TRAVAILLER LES COMPÉTENCES DE LA DÉMARCHE SCIENTIFIQUE

Les programmes de physique-chimie – classe de seconde et enseignement de spécialité des classes de première et terminale – font de l'activité de modélisation un des deux piliers de l'enseignement de la discipline, avec la pratique expérimentale. L'objectif de ce document est d'éclairer un tel choix. À cette fin, on analyse d'abord pourquoi l'activité de modélisation joue un rôle si important pour l'apprentissage de la physique et de la chimie, puis on caractérise l'activité de modélisation et on explique pourquoi il est souhaitable de l'expliciter. Enfin, on articule l'activité de modélisation non seulement avec les activités réalisées par les élèves, mais également avec leur acquisition des compétences de la démarche scientifique.

Retrouvez éduscol sur :

Une activité essentielle pour l'apprentissage de la physique et de la chimie

Si l'on considère la science comme un corpus de connaissances d'ordre conceptuel, théorique et expérimental permettant de décrire, interpréter, comprendre les objets et les événements, alors l'activité de modélisation est centrale dans la **construction** et **l'exploitation** des connaissances scientifiques. En effet, dans une première approche, on peut considérer que l'activité de modélisation consiste non seulement à produire une description théorique d'une situation matérielle à partir de diverses observations, mais également à exploiter des éléments théoriques déjà connus pour fournir une interprétation de nouvelles observations et permettre des prévisions. La diversité des actions que recouvre l'activité de modélisation ne doit pas empêcher de la caractériser au mieux dans le contexte de l'apprentissage de la physique et de la chimie. Les préambules des programmes de physique-chimie de la classe de seconde et de l'enseignement de spécialité des classes de première et de terminale proposent quelques éléments constitutifs de la démarche de modélisation :

- simplifier la situation initiale ;
- établir des relations entre grandeurs ;
- choisir un modèle adapté pour expliquer des faits ;
- effectuer des prévisions et les confronter aux faits ;
- recourir à une simulation pour expérimenter sur un modèle ;
- choisir, concevoir et mettre en œuvre un dispositif expérimental pour tester une loi…

Pratiquer la physique et la chimie consiste pour une bonne part à construire et utiliser des modèles pour comprendre, interpréter, prévoir les événements du monde matériel qui nous entoure. La démarche de **modélisation**, par les allers et retours qu'elle induit entre contenus théoriques d'une part et objets et événements d'autre part est de fait intiment liée à la **pratique expérimentale**, sur laquelle elle s'appuie, mais qu'elle peut également étayer. Il est donc légitime de fonder les programmes de physique-chimie sur ces deux « piliers ».

L'activité « de modélisation » n'est pas réservée à la physique et à la chimie : elle se pratique évidemment dans les autres sciences expérimentales enseignées au lycée (avec cependant des nuances de significations[1]), mais également en mathématiques, dans une acception plus restreinte que celle décrite dans le présent document. Ainsi, dans les préambules des programmes de mathématiques (classe de seconde et spécialité de première), la compétence *Modéliser* fait partie des six compétences travaillées, accompagnée des expressions « faire une simulation », « valider ou invalider un modèle ». Au regard de ces mêmes programmes, en mathématiques la modélisation concerne le plus souvent la modélisation « littérale », par exemple à l'aide d'une fonction pour établir une dépendance (temporelle, éventuellement). La notion de modèle est également utilisée en mathématiques pour aborder les problèmes relevant du domaine des probabilités.

1. Par exemple, en SVT, la modélisation peut consister à recourir à un modèle « matérialisé » sous forme d'une maquette.

Pour approfondir…
Pour plus d'informations sur les différences de perception des modèles et de l'activité de modélisation par les professeurs enseignant les différentes disciplines scientifiques, on pourra se reporter à quelques documents fournis en annexe, issus des résultats de l'enquête *Démarches d'investigation dans l'enseignement secondaire : représentations des enseignants de mathématiques, SPC, SVT et technologie (2011)*.

L'hypothèse faite ici, étayée par quelques travaux de recherche (par exemple Evrard T. & Amory B., 2015 ou Tiberghien A., 1994), est que si l'élève prend conscience que l'activité de modélisation est un enjeu essentiel de son apprentissage, il peut donner davantage de sens aux activités réalisées en classe (expériences, analyses de documents, exercices, etc.). En outre, cela peut éventuellement lui permettre d'identifier ce qui est attendu et ce qui peut lui poser problème : l'activité de modélisation est en effet une activité exigeante source éventuelle de difficultés, même à des niveaux d'apprentissage supérieurs. Il paraît donc pertinent et essentiel d'expliciter à l'élève ce qu'est la modélisation et son rôle en physique et en chimie.

« Les concepts qui apparaissent dans notre pensée et notre discours sont tous – du point de vue logique – de libres créations de la pensée qu'on ne peut tirer inductivement des expériences sensorielles. Si cela ne se remarque pas facilement, c'est seulement parce que nous avons l'habitude d'associer si étroitement certains concepts ou chaînes de concepts (énoncés) à certaines expériences des sens que nous ne sommes plus conscients de l'abîme – logiquement infranchissable – qui sépare le monde des expériences sensorielles du monde des concepts et des énoncés. »

Einstein, *Remarques sur la théorie de la connaissance de Bertrand Russel* (1944)

Le présent document propose de caractériser l'activité de modélisation et les modèles utilisés en physique et en chimie (partie 2). Quelques arguments sommaires à son explicitation sont ensuite exposés (partie 3). Enfin l'activité de modélisation est mise en lien avec les différents types d'activités proposées aux élèves d'une part (partie 4) et avec les compétences dites « de la démarche scientifique » identifiées dans les programmes d'autre part (partie 5).

Caractérisation de l'activité de modélisation

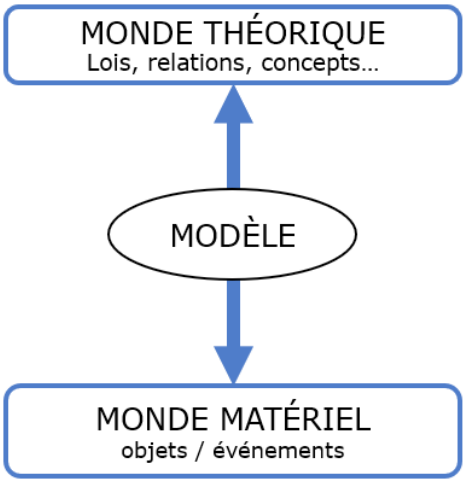
Au cours de l'apprentissage en physique et en chimie, de nombreuses consignes soumises aux élèves renvoient à des éléments plus ou moins théoriques, aux observations possibles et aux liens entre ces deux « mondes » : décrire, interpréter, expliquer, prévoir, exploiter telle loi, modéliser la situation… Distinguer description et interprétation est par exemple un travail entamé dès le cycle 4.

Exemple

Si on immerge un morceau de métal gris (bien choisi) dans un liquide bleu (bien choisi également…), on peut observer au bout de quelques minutes, un dépôt solide rougeâtre et une décoloration du liquide. À ce stade, il s'agit seulement de décrire. Décrire cette situation en évoquant une lame de zinc, un dépôt de cuivre et une solution de sulfate de cuivre procède d'un début de modélisation puisque la description est maintenant orientée par des connaissances conceptuelles : des informations jugées pertinentes pour interpréter sont sélectionnées et idéalisées à l'aide d'un concept comme celui d'espèce chimique. En fonction de la question finalement posée, la conceptualisation de la situation pourra dépasser le seul cadre descriptif afin d'interpréter et d'expliquer ce qui est observé, à l'aide de différents modèles : modèle de l'oxydo-réduction, modèle cinétique…

De façon générale, en première approche, la modélisation consiste à **mettre en relation** :

- des éléments du monde matériel : objets et évènements observables ;
- des éléments du monde théorique : concepts, relations, lois, etc.



S'il est souvent difficile d'établir des relations entre ces éléments, c'est essentiellement parce qu'ils sont de nature très différente : concrets/abstraits, observables/conceptuels…

Modèle de description ou réalité idéalisée

Le passage du monde matériel observable au monde théorique ne se fait pas brutalement, mais par « strates », en différentes étapes. Ainsi, un modèle peut être vu dans un premier temps comme un intermédiaire entre les objets et les événements d'une part, les éléments théoriques d'autre part. Il est la traduction d'une situation matérielle à l'aide de savoirs théoriques pour répondre à une question ou résoudre un problème.

Les « éléments du monde matériel » désignent ce qui est observable. Il y a deux façons de décrire ce qui est observable (la *situation matérielle*) en :

- se limitant aux objets et aux événements : il s'agit d'une description de ce qui est perçu sans faire appel à un quelconque concept scientifique ;
- utilisant des éléments conceptuels, avec des termes identifiés comme «scientifiques».

La situation matérielle devient une situation d'étude dès l'instant où l'on se pose une question à son sujet. C'est souvent la question posée qui va orienter la façon de décrire de façon idéalisée la situation.

Lorsque les éléments théoriques sont connus (essentiellement les lois physiques à utiliser, utilisant elles-mêmes des concepts), la mise en relation des «deux mondes» s'opère ainsi grâce à un **modèle de description** de la situation matérielle qui permet de traduire la situation d'étude dans les termes de la théorie, en sélectionnant les observables et les informations qui semblent pertinentes au regard du problème à traiter. Cette description dans des termes conceptuels est parfois désignée par l'expression **réalité idéalisée**.

À partir d'une même situation matérielle, le **modèle de description** choisi peut varier selon la question posée ou le problème à résoudre.

Exemples

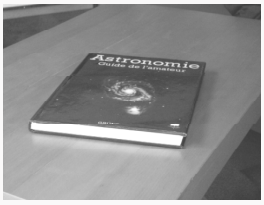
- En fonction de la question posée ou du problème à résoudre, la lumière peut être décrite comme un rayon de lumière, une onde électromagnétique, un photon… Ainsi, pour interpréter une formation d'image en optique, le modèle du rayon lumineux est suffisant pour caractériser la lumière alors que ce n'est pas le cas pour interpréter une situation de diffraction.
- Pour interpréter un mouvement d'un solide au regard des actions exercées, la description du solide par un point matériel est suffisante pour certains types de mouvements et certaines questions. S'il s'agit par exemple d'interpréter des situations de roulement ou des situations dans lesquels les frottements solides sont importants, l'idéalisation par un point matériel s'avérera insuffisante.
- La transformation chimique consistant à décrire le passage d'un mélange d'espèces chimiques d'un état initial à un état final constitue un modèle de description : il s'agit bien d'idéaliser la réalité, avant de passer au modèle explicatif de la réaction chimique.

Le modèle de description (ou la réalité idéalisée) constitue alors une forme de contextualisation d'éléments théoriques et il est en conséquence logique qu'il fasse appel à des schémas, des diagrammes, des relations mathématiques… Le recours aux langages mathématiques est fréquent et souvent associé à un modèle donné. L'usage de ces langages ou de ces registres mathématiques variés (relations littérales, représentations graphiques, calcul et représentation vectoriels…) peut constituer une source de difficultés au point de se transformer pour certains élèves en obstacle à la pratique scientifique. L'absence de maîtrise

d'un langage essentiel pour la modélisation empêche alors d'accéder à la signification et à la pratique de la modélisation. Ces difficultés ont fait l'objet de documents spécifiques antérieurs (GRIESP, 2016). Mais le recours aux langages mathématiques pour modéliser n'est ni systématique ni exclusif : une démarche de modélisation peut aussi s'accompagner d'un recours à la schématisation, à un vocabulaire conceptuel spécifique (des définitions par exemple), aux hypothèses sous-jacentes (les *choix* de modélisation), à des représentations spécifiques (représentations de molécules, syntaxe de l'équation de réaction, schéma de circuits électriques ou de montages optiques…).

Outre cet aspect multiforme, une autre propriété du modèle est son caractère évolutif ou malléable. Parce que le propre d'un modèle scientifique est qu'il peut être réfuté (et donc mis à l'épreuve des faits), il peut être amené à évoluer. Tout en étant nourri par des éléments théoriques, le modèle n'est pas figé et peut changer en fonction de la question posée : son « aménagement » ou son adaptation est préalable à la déstabilisation éventuelle de la théorie dont il est extrait.

Exemple 1

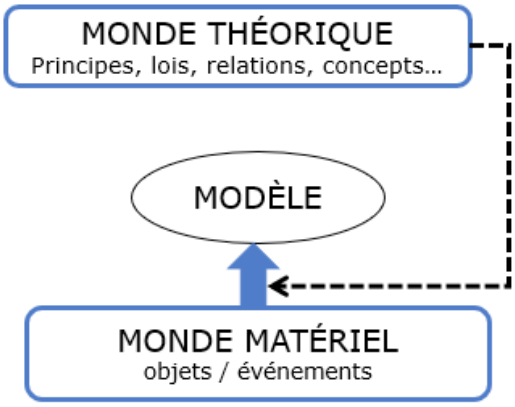


Situation matérielle : un livre d'astronomie est posé sur une table ; on peut aussi décrire cette situation avec des termes scientifiques : on dira alors *le livre est immobile*.
Avec une question telle que «pourquoi le livre est-il immobile ?», la *situation matérielle* devient une *situation d'étude* et le fait que le livre soit un livre d'astronomie, son épaisseur, sa taille sont des informations qui ne sont pas gardées dans l'activité de modélisation de la situation.
En revanche, on garde les informations «le livre ne bouge pas» et «il est sur une table». Les éléments de modélisation ou les concepts théoriques permettant de répondre à la question posée dans le cadre d'une approche relevant de la physique font appel à des éléments de modélisation (incluant la représentation) des actions (des vecteurs) et à une loi (ici le principe d'inertie). Ils peuvent éventuellement être formulés sous forme d'une relation vectorielle.

Exemple 2

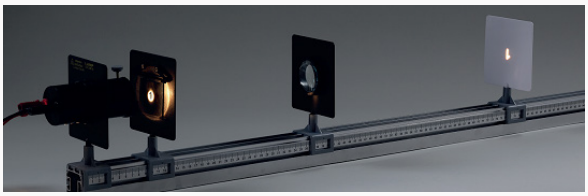
Situation matérielle : l'ampoule à filament d'une lampe de poche brille.
On peut passer de cette situation matérielle à une situation d'étude en posant la question de la cause de l'émission de lumière par l'ampoule : pourquoi l'ampoule brille-t-elle ?
À partir de la même situation matérielle, on peut aussi se demander pourquoi au bout d'un certain temps, l'ampoule ne brillera plus. La situation d'étude n'est plus la même.
C'est bien la situation d'étude et la question posée qui orientent les théories et les modèles utilisés : dans le premier cas, on utilisera un modèle électrocinétique, dans le deuxième un modèle énergétique.

Les théories disponibles et le problème posé orientent la façon dont on modélise une situation matérielle : la situation est simplifiée, décrite dans des termes plus conceptuels, certaines caractéristiques seulement sont conservées (figure ci-dessous). Il s'agit ici de faire des «choix de modélisation», qui pourront être discutés et mis à l'épreuve par l'expérience : par exemple, ne pas tenir compte des frottements pour modéliser une situation de mécanique pourra faire l'objet d'une interprétation de l'éventuel écart entre prévision et observation.



La figure précédente peut laisser croire qu'il y a risque de séparation entre la démarche de modélisation et le monde théorique dont la connaissance est visée, au moins partiellement, pour l'apprentissage[2]. En fait, la démarche de modélisation s'opère à l'aide d'éléments connus de la théorie. La modélisation de la situation permet d'exploiter des éléments théoriques disponibles, connus, pour en déduire une information au sujet de la situation : ceci peut consister en une prévision, mais également en une interprétation ou une description précise de ce qui a été observé.

Exemple



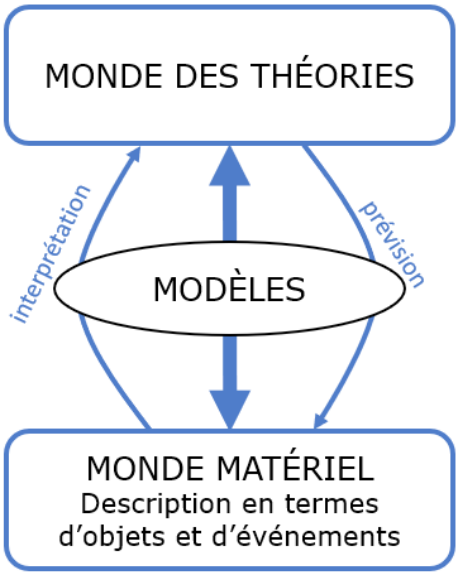
L'utilisation des lois de l'optique géométrique permet de prévoir ou d'interpréter ce qui se passe lorsqu'on cache la moitié de la lentille convergente utilisée pour obtenir l'image d'un objet sur un écran : l'image reste visible entièrement, mais est moins lumineuse.
Pour faire la prévision, ou interpréter l'observation, il convient de modéliser la situation (sous contrainte d'éléments théoriques disponibles), d'utiliser les savoirs théoriques disponibles en les adaptant à la situation via la modélisation effectuée.

2. On verra plus loin que pour l'enseignement, on peut facilement regrouper mondes des théories et modèles.

Modèle explicatif

La description, même en des termes conceptuels, ne peut pas suffire pour mener à bien une démarche de modélisation complète qui viserait l'explication, l'interprétation, la prévision ou la résolution d'un problème.

Il s'agit alors de passer à une « strate » supérieure (au sens d'une proximité plus grande avec la théorie) en élaborant ou en utilisant un **modèle explicatif**, issu d'une théorie, à des fins d'explication. Comme l'étape de modélisation descriptive d'une situation, cette élaboration et cette utilisation des théories passent inévitablement par une phase d'abstraction et d'unification d'évènements observables divers et donc par une étape de modélisation descriptive ou d'idéalisation de la réalité : il n'y a rien d'évident à décrire par le même concept de force des situations aussi diverses qu'un objet posé sur une table, une poutre soulevée par une grue, un projectile « en l'air »… ou une particule chargée dans un champ électrique ; de même, il convient de varier les situations pour atteindre l'idée qu'une vibration d'un milieu matériel est indispensable pour espérer produire un son ; le modèle de la réaction chimique est adapté pour interpréter une grande variété de transformations chimiques. C'est souvent par induction de l'observation (que l'expérience ait été conçue pour cette finalité ou non) que les concepts, les lois, les principes sont construits pour constituer le «monde théorique». Même si on les distingue, modèle et théorie sont rarement pensés indépendamment des événements observables.



Exemples de deux processus possibles dans l'activité de modélisation :
interpréter une situation du monde matériel à l'aide d'un modèle
prévoir ce qui va se passer dans le monde matériel à l'aide d'un modèle

Qu'elle soit en cours d'élaboration ou établie, la théorie permet ainsi de **décrire** et d'**interpréter** le monde des objets et des événements. Une fois cet édifice théorique formalisé, et les choix de modélisation effectués, il est possible symétriquement de l'exploiter pour **prévoir** des événements ou expliquer l'écart entre ce qui est observé et ce qui est prévu «par la théorie», ce qui est représenté de façon très schématique sur la figure ci-dessus. Ce processus n'est pas aussi linéaire que cette présentation peut le suggérer : l'interprétation risque d'être revue une fois la prévision effectuée. Par exemple, des éléments de la situation que l'on a négligés dans une première modélisation ne doivent plus l'être pour rendre compte de l'expérience : le modèle est modifié.

Exemple 1

Situation

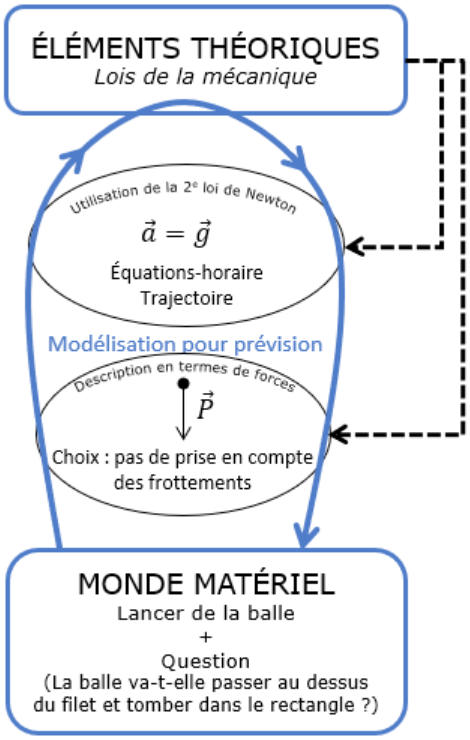
Un joueur de tennis s'apprête à servir.

Question posée

On peut se demander si la balle va passer au-dessus du filet et tomber à l'intérieur du rectangle dédié tracé au sol ; pour ceci il faut se donner les moyens de décrire précisément le mouvement à l'aide de savoirs théoriques, avant même d'utiliser les lois de Newton.

Un modèle de description

Dans un premier temps, il convient de se placer dans le cadre de la mécanique du point. Ainsi, on peut choisir de modéliser la balle par son centre de gravité auquel on affecte sa masse (modèle du point matériel). Pour décrire simplement le mouvement du centre de la balle, on choisit de prendre comme cadre théorique la cinématique du point c'est-à-dire l'étude du mouvement d'un point matériel indépendamment des causes de ce mouvement. On peut alors obtenir quelques positions successives de ce point (à l'aide d'une vidéo ou d'une chronophotographie) et utiliser des savoirs théoriques pour décrire le mouvement. Ces choix de modélisation, faits sous la contrainte de la connaissance des lois de la mécanique qui vont être utilisées ultérieurement, impliquent une perte d'information sur l'éventuelle rotation de la balle sur elle-même : on ne peut plus « remonter » à la façon dont la balle a été frappée. Si l'on souhaite décrire la façon dont la balle tourne sur elle-même, il convient de faire une autre modélisation en choisissant de décrire un point de la surface : des informations supplémentaires seront gardées au prix d'une étude plus complexe.



Un modèle explicatif, pour prévoir

Pour répondre à la question posée (qui revient à prévoir le mouvement), il faut non seulement s'être donné les moyens de décrire le mouvement (utiliser le «modèle cinématique»), mais faire en plus appel à la théorie de la mécanique classique, et plus particulièrement à la deuxième loi de Newton. Il est nécessaire de contextualiser ces éléments théoriques à la situation pour pouvoir les exploiter : modélisation des actions en termes de forces, prise en compte des conditions initiales... Une dernière étape consiste ensuite à traiter mathématiquement les relations obtenues grâce à cette modélisation pour en déduire la hauteur du point choisi pour décrire la balle au niveau du filet puis sa position lorsque la balle touche le sol.

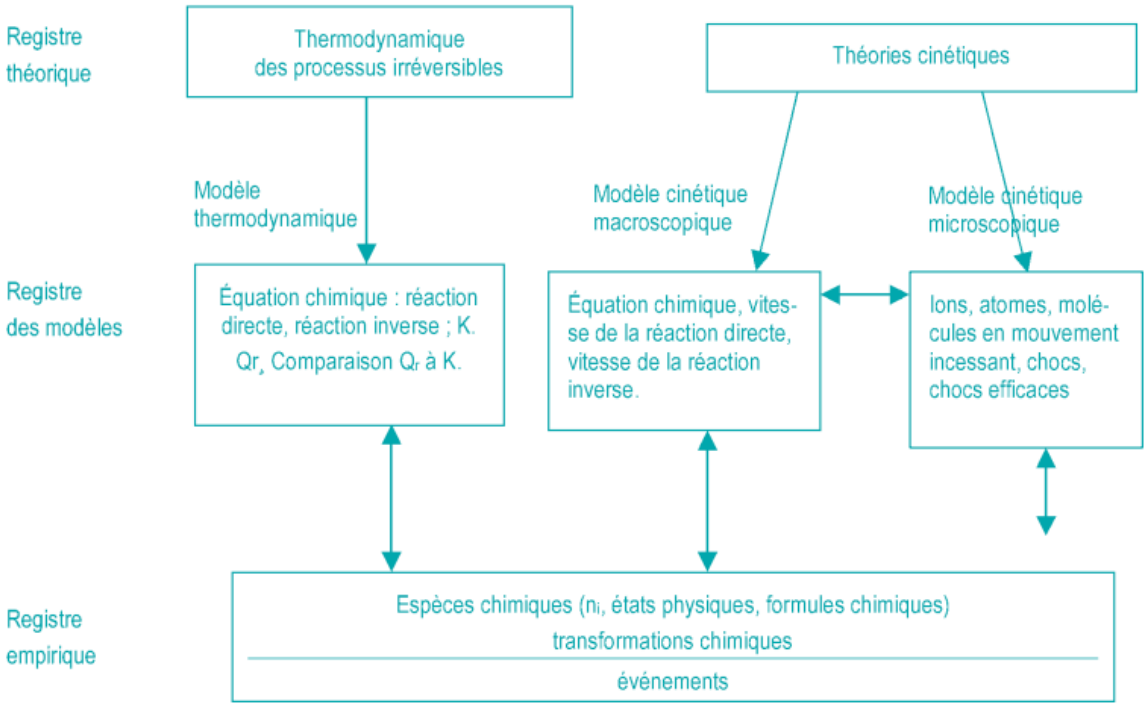
L'exploitation de la loi et du modèle de la situation va montrer qu'il est nécessaire de connaitre par exemple la vitesse initiale de la balle pour répondre à la question. La confrontation éventuelle de l'observation et de la prévision est une étape essentielle qui peut conduire principalement à deux conclusions en cas d'écart (en supposant qu'aucune erreur dans l'usage des savoirs théoriques n'a été commise et en prenant en compte les incertitudes de mesures) :

- le modèle est mis en défaut : hypothèses non adaptées, éléments de la situation non pris en compte (frottements dans l'air, rotation de la balle sur elle-même…) ;
- la théorie est mise en défaut.

Dans le cadre des programmes de physique-chimie de l'enseignement secondaire, le dernier cas est peu fréquent, mais peut être rencontré, par exemple lors de la mise en défaut de l'optique géométrique.

Exemple 2

La diversité des modèles, leurs différents types (descriptifs ou explicatifs, macroscopique ou microscopique) peuvent très bien être illustrés en chimie sur le sujet de la transformation chimique, afin de traiter de l'évolution spontanée d'un système chimique et l'arrêt dans le cas d'une transformation non totale. Kermen & Méheut (2008) propose ainsi le schéma ci-dessous :



Différents modèles pour la transformation chimique (Extrait de Kermen & Méheut (2008))

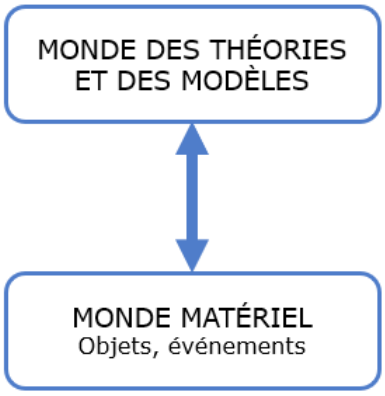
Les auteurs font le choix de considérer deux niveaux dans le registre empirique : dans le premier il s'agit des évènements (un liquide change de couleur…), dans l'autre on parle d'espèces chimiques, de leur état physique, de leur formule et des quantités de matières en jeu ; il s'agit dans ce second niveau d'un modèle descriptif des espèces chimiques et des transformations chimiques. Les auteurs considèrent que cette représentation du monde matériel mobilise des savoirs disponibles qui sont l'aboutissement de processus d'apprentissage antérieurs : les utilisateurs n'ont plus forcément conscience de ce premier niveau de modélisation et ils l'utilisent comme si c'était la réalité. C'est pourquoi les auteurs l'intègrent dans le registre empirique. En outre, les questions ici ne portent pas sur la description du monde matériel, mais sur un niveau supérieur de modélisation afin d'interpréter et prévoir l'évolution spontanée d'un système chimique et son arrêt dans le cas d'une transformation chimique non totale. Selon le regard que l'on porte sur le registre empirique, c'est-à-dire en fonction de la question que l'on se pose, on utilise un modèle différent : thermodynamique pour prévoir ou interpréter une évolution ou une absence d'évolution, et les modèles cinétiques macroscopique ou microscopique pour tenter d'expliquer la présence de toutes les espèces chimiques et une absence d'évolution dans l'état final d'un système ayant subi une transformation chimique non totale.

Quels que soient les choix réalisés pour représenter et traiter ces « strates » dans la modélisation, il s'agit pour une question donnée de repérer ce qui relève de chaque monde pour assurer une mise en relation et pouvoir la discuter explicitement, en particulier afin d'améliorer les modèles et théories utilisés.

Par commodité, on peut adopter l'expression « **savoirs théoriques** » pour décrire tous les éléments du monde théorique et les modèles qui en découlent.

Un point de vue épistémologique rigoureux impose de distinguer théorie et modèle. La théorie (la mécanique newtonienne par exemple) a ainsi une valeur explicative d'observations très diverses (qui constituent son champ de validité). Le modèle (celui de la chute libre, ou celui du pendule simple par exemple) a une valeur descriptive et interprétative pour un ensemble de situations en nombre plus restreint que celles expliquées par une théorie : c'est la composante «opératoire» de la théorie ou d'une partie de celle-ci.

Ce regroupement du monde théorique et des modèles sous l'expression « savoirs théoriques » peut être justifié par le fait que, particulièrement dans l'enseignement secondaire, les théories, partielles et circonscrites à des champs d'application restreints, sont souvent assimilées au modèle utilisé. Il est rare que l'élève ait une vision d'ensemble de la théorie en jeu et ce sont souvent les modèles qui acquièrent pour lui le statut de théorie. Il est tout aussi peu réaliste de vouloir faire établir à l'élève, par inductivisme par exemple, toute une théorie, mais au mieux est-il possible de lui faire trouver une loi, une relation… Dans la suite de ce document, la référence aux «deux mondes» concernera donc le monde matériel d'une part, le monde des théories et des modèles d'autre part (figure ci-contre).



Remarquons que des activités au cours desquelles l'élève est amené à mesurer ou à simuler occupent des positions singulières dans ce schéma, en permettant, voire en facilitant, l'articulation entre les deux mondes.

Conceptions et modélisation

Même si ce n'est pas l'objet du présent document, remarquons également que les idées initiales (préconceptions) des élèves relèvent le plus souvent du monde des théories et des modèles, qui n'est pas réservé à la physique et à la chimie. Ces «théories naïves» (l'adhérence entre force et vitesse en mécanique ou la conception de l'image voyageuse en optique par exemple) ont justement la caractéristique d'être opératoires sur de nombreuses situations d'étude. Le monde des théories et des modèles n'est donc pas vierge en début d'apprentissage. L'activité de modélisation s'opère aussi dans la vie courante et ce sont certaines de ces interprétations spontanées qu'il convient de déconstruire lors de l'apprentissage pour que les élèves puissent s'approprier des modèles scientifiques. Cette distinction entre «vie quotidienne» et «physique-chimie» concerne également le monde matériel : en classe, les élèves sont souvent invités à décrire le monde matériel en termes scientifiques. C'est par exemple le cas si on passe d'une description telle que «le livre est posé sur la table» à une description qui relève de la physique, orientée par le modèle à utiliser, telle que «le livre est immobile».

Une activité à expliciter

La partie précédente a permis de caractériser de façon simplifiée une grande partie de l'activité scientifique telle qu'elle se pratique par les scientifiques eux-mêmes et que les élèves sont également invités à mener à l'aide des différentes activités d'apprentissage proposées en physique-chimie. Nous donnons ci-dessous quelques éléments de réflexion sur l'importance de l'explicitation de cette activité auprès des élèves, chaque fois que c'est possible, et sans pour autant faire de ses caractéristiques un enjeu d'apprentissage.

Pour les enseignants, avoir conscience des obstacles potentiels liés au passage entre les «deux mondes» permet d'anticiper les difficultés éventuelles et de repérer les capacités à travailler spécifiquement. La prise de conscience par l'élève que ce qui est attendu est souvent lié à cette mise en relation peut l'aider à mieux percevoir les finalités et les objectifs de la discipline. Cela peut lui permettre en outre de lever quelques implicites lors de l'usage de certaines consignes comme *interpréter*, *justifier*, *expliquer*, *caractériser*... Il ne s'agit pas pour autant de minimiser les difficultés que l'élève peut rencontrer sur des aspects plus «techniques» pouvant le mobiliser fortement : calculs, représentations, description ou explicitation d'une démarche ou d'un raisonnement…

La description, l'interprétation ou l'anticipation de certaines observations sont des tâches courantes demandées aux élèves. Pour l'enseignant, il est évident que l'élève se trouve dans un contexte d'apprentissage *en physique-chimie* : il doit répondre avec les savoirs de la discipline, en utilisant les termes des modèles appris. Les relations entre modèles et situations peuvent apparaître arbitraires pour les élèves. **L'explicitation de la modélisation** et de ce qui relève des deux mondes est donc une condition essentielle pour **faciliter l'apprentissage**. Cette explicitation impose parfois, tant pour l'enseignant que pour l'élève, de bien distinguer ce qui relève de chaque « monde » en évitant par exemple de superposer une photographie de la situation et un schéma qui la modélise, ou en évitant des expressions telles que « je perçois une fréquence plus grave », « je ressens le principe d'inertie », « la vitesse va plus vite », « la pression appuie », « je verse telle espèce chimique »... Certaines expressions courantes comme « l'image est nette » peuvent elles-mêmes créer la confusion en superposant un usage courant (l'image comme ce que je vois sur un écran ou une photo) et un usage « théorique » (l'image comme concept optique qui par définition ne peut pas être floue…). Une définition mal retranscrite par un élève telle que « *L'équivalence est obtenue*

lorsqu'on a versé suffisamment de solution titrante pour faire réagir toute la solution titrée initiale » peut être vue comme une superposition des deux mondes : la définition de l'état d'équivalence se fait dans des termes du modèle (sans nécessité de recourir aux solutions, qui relèvent du monde matériel) même si l'état d'équivalence est repérable dans le monde matériel en versant une solution dans une autre.

Les précautions de langage qu'impose cette distinction conduisent parfois à des formulations complexes qui peuvent nuire à la lisibilité : si elles sont cruciales dans les phases d'apprentissage, ces précautions peuvent être progressivement abandonnées lorsque l'apprentissage est effectif : lorsque c'est le cas, il n'y a en effet aucune ambiguïté et aucun risque à superposer photographie de la situation et schéma des forces par exemple pour le livre posé sur la table. Explicitant les savoirs à apprendre, les bilans, synthèses ou phases de structuration qui font suite aux activités menées en classe gagnent à être formulés dans les termes du monde des théories et des modèles, afin non seulement de marquer la différence avec le monde matériel, mais également d'indiquer que ces savoirs peuvent être exploités pour traiter une grande variété de situations et ont un caractère général.

C'est aussi la mise en lien des deux mondes qui fait souvent l'objet d'évaluation : à juste titre puisque c'est elle qui permet de tester la compréhension et le caractère opératoire des savoirs théoriques. La seule restitution de savoirs théoriques n'est pas suffisante pour valider la compréhension. L'exploitation d'un savoir théorique pour traiter une situation d'étude est par contre gage d'une forme de compréhension et de capacité à mobiliser de manière pertinente, qui seront valorisées. Le choix des verbes de consigne, et l'explicitation de leur signification (voir *autre document*), est éclairé par cette analyse en termes de modélisation : si des verbes tels que *décrire*, *calculer*, *exprimer* renvoie souvent à un seul des deux mondes, d'autres comme *expliquer*, *interpréter*, *justifier* induisent généralement un lien entre les deux mondes. Encore faut-il que ce soit explicite pour l'élève, car il est possible de justifier une observation… par une observation (l'objet posé sur la table ne tombe pas… car la table l'en empêche). Dans certains cas, il est donc nécessaire soit d'expliciter la signification de chaque verbe au regard de la modélisation (*interpréter* demanderait ainsi une mise en lien avec le monde des modèles) soit une précision chaque fois que nécessaire : *justifier à l'aide de vos connaissances théoriques*… Ce lien entre modélisation et tâches prescrites est développé, via l'analyse des compétences, dans la partie 5.

Enfin, notons qu'il peut être confortable pour l'élève de rester dans l'un ou l'autre des deux mondes, car le coût cognitif du lien entre les deux mondes s'avère souvent important. Le manque de diversité des situations étudiées, ou leur caractère épuré (pour « coller au modèle) peuvent être un frein à la compréhension, en limitant la possibilité de traiter de nouvelles situations authentiques.

Exemple
Si pour donner du sens aux concepts de période et de fréquence, on se limite à l'utilisation d'un électrocardiogramme, les élèves apprennent à reconnaître un cycle sur un graphe et à mesurer la durée du cycle, et donc à déterminer la période. En revanche si on demande aux élèves de décrire le cycle du cœur ou d'une membrane d'un haut-parleur ou d'un pendule, le recours au savoir technique appris sur la situation initiale n'est plus fonctionnel. Cela risque d'être encore plus le cas pour des situations impliquant un phénomène périodique dans un contexte qui ne serait pas celui de la classe de physique-chimie. Les élèves n'arrivent pas à relier le modèle, qui comprend la représentation graphique, la définition de cycle et la relation entre période et fréquence, avec les événements. Cette difficulté se situe essentiellement dans la description des objets et événements. Typiquement s'ils doivent comparer deux pendules de différentes périodes, les élèves vont dire que l'un va plus vite que l'autre, ou que l'un oscille plus que l'autre. Le professeur doit aider la description en distinguant les positions dans l'espace et dans le temps. Alors seulement le cycle pourra être identifié et le lien avec une représentation graphique effectué. Ce travail est particulièrement à l'œuvre lorsqu'il s'agit d'analyser des situations très contextualisées, et de les associer à des situations étudiées antérieurement en classe.

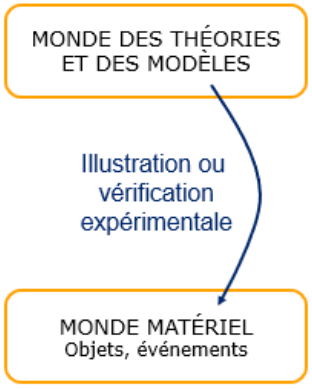
Modélisation et types d'activités

Une autre réflexion, complémentaire, pourrait être engagée en distinguant les types d'activités proposées en lien avec la modélisation. Il n'est pas question ici de normer ou de délimiter de façon rigide une typologie des activités pédagogiques proposées aux élèves. Mais tout enseignant sait qu'il varie les types d'activités proposées : elles n'ont pas toute la même fonction en termes d'apprentissage, ne jouent pas toutes le même rôle dans la progression, ne font pas toutes travailler les mêmes capacités…

De façon quelque peu schématique et sans viser l'exhaustivité, on peut citer quelques exemples :

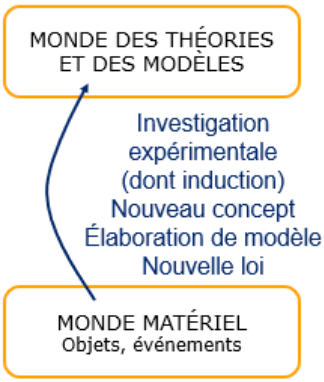
- introduction et découverte d'un nouveau concept ou d'une nouvelle loi ;
- exploitation d'un savoir théorique (loi, principe…) ;
- mise à l'épreuve expérimentale d'un modèle ;
- détermination expérimentale d'une valeur ;
- résolution d'un problème.

Il est possible de caractériser chacun de ces types d'activité du point de vue de l'activité de modélisation. C'est ce que proposent, de façon simplifiée et parfois caricaturale, les schémas ci-dessous, en donnant par ailleurs quelques exemples d'activités expérimentales supports extraites des programmes. La question posée concerne soit le monde des théories et des modèles soit le monde matériel : c'est ce qui oriente le point de départ de la démarche (point de départ de la flèche).



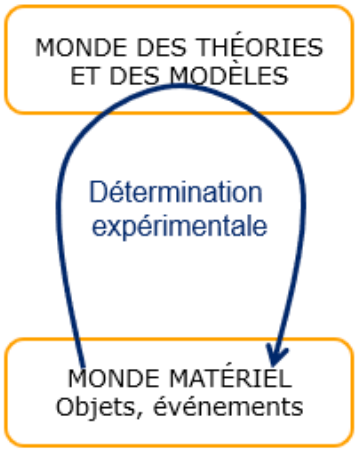
Références aux programmes :

- Vérifier que le réactif limitant est celui prévu
- Tester la relation de conjugaison
- Tester la loi fondamentale de la statique des fluides



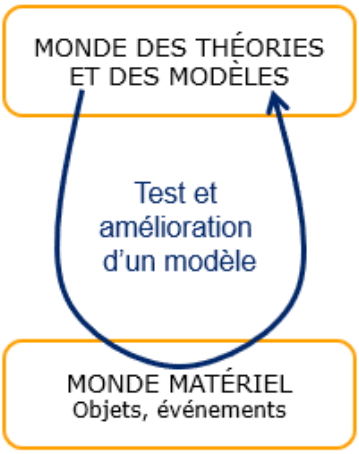
Références aux des programmes :

- Relier l'énergie échangée à la masse de l'espèce qui change d'état
- Représenter et exploiter la caractéristique d'un dipôle



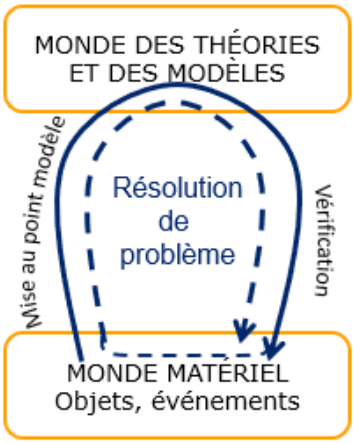
Références aux programmes :

- Réaliser un titrage direct
- Déterminer la célérité d'une onde



Références aux programmes :

- Passer d'un modèle d'optique géométrique à un modèle d'optique ondulatoire
- Modèle d'une source réelle de tension continue



Ces représentations se veulent un outil destiné à l'enseignant pour l'analyse des activités proposées aux élèves. Elles permettent également de faire apparaitre la nature des éléments dont les élèves disposent au cours de l'activité et la nature de ce qu'il va leur être demandé de produire à la fin de l'activité.

Retrouvez éduscol sur :

La modélisation pour travailler les compétences de la démarche scientifique

Par son omniprésence, la modélisation ne permet pas de guider la réflexion sur l'équilibre à trouver entre les compétences de la démarche scientifique travaillées ou évaluées au cours de la formation des élèves. Mais parce qu'elle constitue un bon indicateur de l'apprentissage, la capacité à faire des liens entre les «deux mondes» présente l'avantage d'être articulée avec les cinq compétences choisies dans les programmes pour caractériser l'activité scientifique et permet de les travailler :

- s'approprier
- analyser / raisonner
- réaliser
- valider
- communiquer

Ces compétences doivent permettre de structurer la formation et l'évaluation et elles jouent, pour certaines d'entre elles, des rôles spécifiques dans les liens à faire entre monde théorique et monde des objets et des événements.

Les compétences proposent des exemples de capacités associées, plus précises et évaluables plus aisément à partir des comportements ou productions d'élèves. Dans une activité donnée, sur un sujet donné, l'élève met en œuvre un certain nombre de connaissances et de capacités : certaines d'entre elles jouent un rôle bien particulier dans l'articulation entre les deux mondes. Il est donc envisageable de «situer» les capacités associées aux compétences par rapport à l'activité de modélisation. Cependant, pour ne pas procéder à cette fastidieuse association qui ne pourrait pas être exhaustive, on peut tenter de «situer» les compétences par rapport à la modélisation, en raisonnant sur quelques capacités caractéristiques et fréquemment mises en œuvre. C'est ce qui est proposé dans cette partie. D'autres exemples sont proposés par Melzani (2018) à un niveau post-bac.

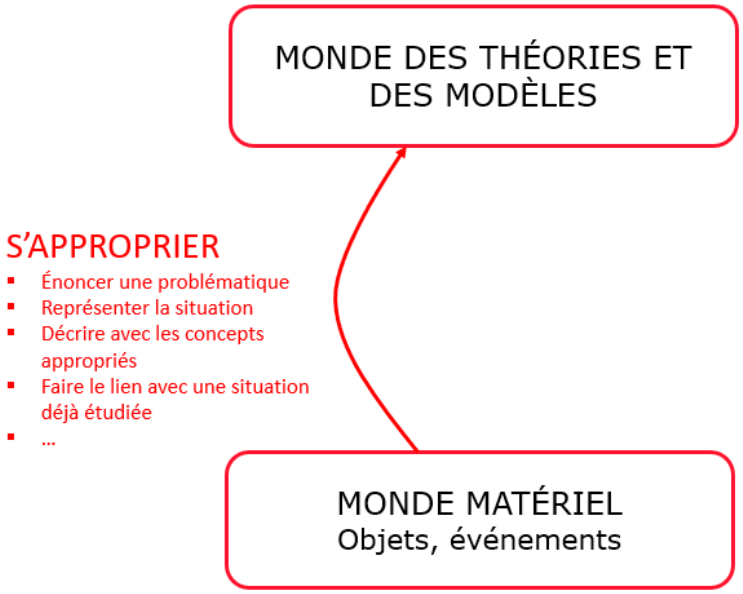
Il s'agit donc ici de caractériser les compétences (et certaines de leurs capacités associées) au regard de l'activité de modélisation décrite dans la partie 2. Il s'agit de gagner en lisibilité et en généralité quitte à perdre en précision ou en finesse dans l'analyse.

Comme le précisent les programmes, l'ordre de présentation des compétences, quel qu'il soit, ne préjuge en rien de celui dans lequel elles sont mobilisées. Au cours de son activité, l'élève mobilise telle ou telle capacité relevant de différentes compétences et celles-ci se trouvent donc partiellement mobilisées et intriquées. En fonction de la démarche adoptée, le parcours en termes de compétences peut varier d'un élève à l'autre, et ceci même pour une conclusion ou une réponse finalement identique.

Le critère de présentation des compétences adopté ci-dessous concerne plus le degré de généralité des compétences : nous présentons d'abord celles qui concernent des aspects plus identifiés et «circonscrits» de l'activité de modélisation en allant ensuite vers celles qui sont impliquées dans de nombreux aspects de l'activité de modélisation. La compétence ***communiquer*** ne fait pas l'objet d'une analyse spécifique ci-dessous, car elle peut difficilement être reliée à l'un ou l'autre des deux mondes ou à des liens spécifiques entre les deux mondes. La communication est travaillée potentiellement à chaque étape du travail de l'élève et peut concerner, en fonction des consignes données, aussi bien des aspects théoriques qu'une capacité à décrire une situation matérielle.

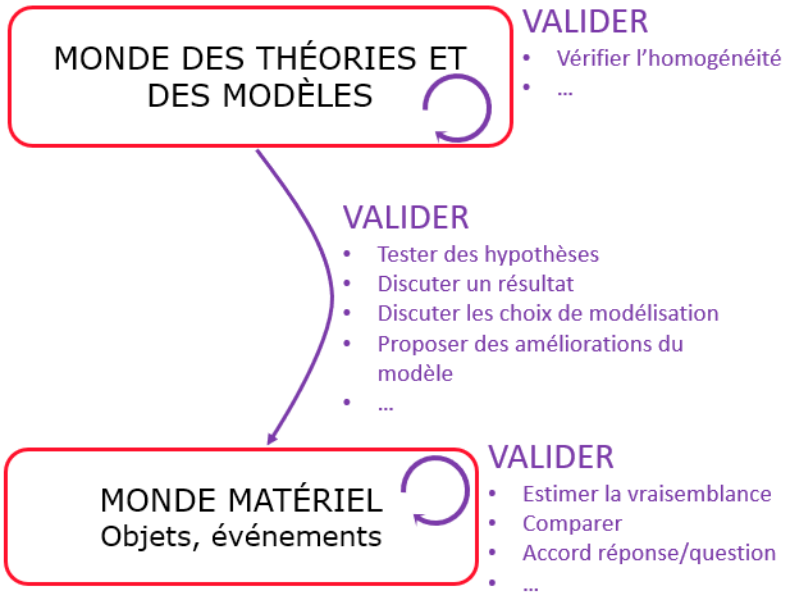
S'approprier

L'**appropriation** consiste le plus souvent à reformuler une problématique (en repérant par exemple les mots-clés ou en la « traduisant » de manière scientifique, dans les termes d'un modèle), à l'identifier (en faisant le lien par exemple avec une situation étudiée antérieurement), à représenter la situation par un schéma, à la décrire avec les concepts jugés pertinents, à repérer les grandeurs d'influence. Pour l'essentiel, il s'agit de faire des choix de modélisation. L'appropriation peut concerner prioritairement la situation matérielle d'étude. Elle peut aussi s'exprimer à travers le regard porté sur cette situation lorsqu'il s'agit de la comparer ou de l'assimiler à une situation jugée «voisine» ou déjà rencontrée. Dans tous les cas, l'appropriation est réalisée à l'aide des connaissances théoriques disponibles.



Valider

À l'inverse, la **validation** est souvent mise en œuvre une fois un modèle exploité. Elle recouvre la mise à l'épreuve des hypothèses retenues, la discussion du résultat obtenu, la vérification de la cohérence entre une relation et une observation ou l'aménagement des choix de modélisation pour augmenter l'accord entre prévision «du modèle» et observation… Elle peut aussi s'opérer de façon interne aux objets et évènements lorsque par exemple il s'agit d'estimer la vraisemblance d'une valeur au regard de ses connaissances personnelles, d'une photographie, d'une observation... Certaines capacités associées à la validation ne contribuent donc pas toujours à faire des liens entre les deux mondes.

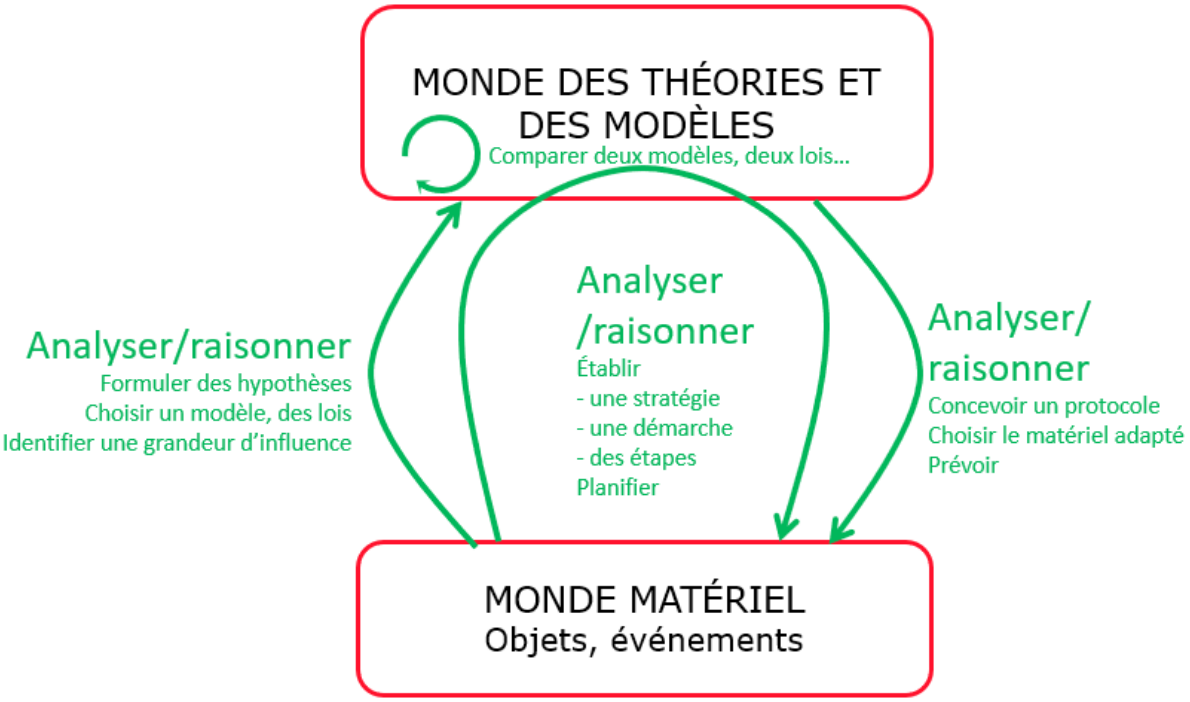


Retrouvez éduscol sur :

Analyser et raisonner

Appropriation et validation peuvent difficilement se faire sans une **analyse** de la situation, en la confrontant aux savoirs théoriques disponibles.

L'**analyse** et le **raisonnement** sont des compétences «à large spectre» qui vont aussi intervenir dans la façon dont on va modéliser (se rapprochant en ce sens de l'appropriation), formuler des hypothèses… ou lorsqu'on utilise la théorie et le modèle pour faire des prévisions.
Plus largement encore, la compétence *analyser* intervient lorsqu'il s'agit de planifier une démarche de résolution ou de planifier des tâches. Tenter de «cartographier» l'analyse et le raisonnement dans la représentation des deux mondes est difficile au regard des nombreuses facettes que ces compétences recouvrent et de la multiplicité potentielle des capacités concernées.



L'analyse peut également concerner seulement le monde des modèles. C'est le cas lors de la comparaison de deux outils théoriques complémentaires exploités pour une même situation : quelle loi semble la plus pertinente pour résoudre efficacement le problème (2e loi de Newton ou point de vue énergétique par exemple) ?

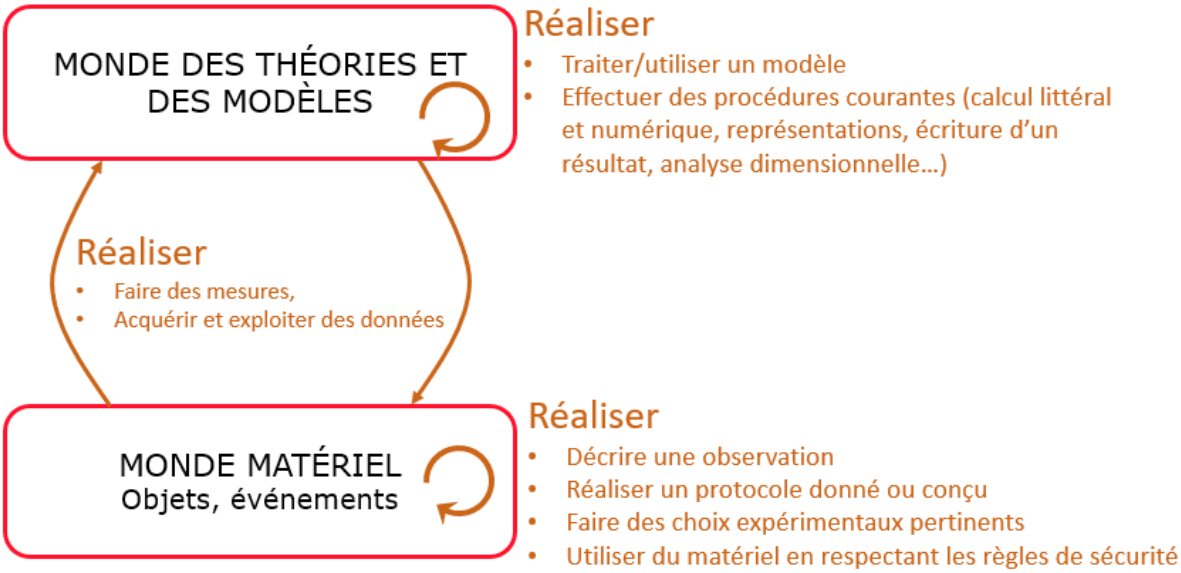
Réaliser

Enfin, pour ne pas considérer que la **réalisation** intervient à chaque action «cognitive» ou gestuelle, il peut être tentant de la circonscrire, de façon simplifiée, à des :

- tâches «techniques» internes au modèle : il s'agit de ce qu'on peut appeler des procédures courantes (calculs, représentations graphiques, analyse dimensionnelle, etc.), constituant une sorte de «boite à outils» pour utiliser et traiter des éléments d'ordre théorique ;
- tâches expérimentales dans le monde des objets et des événements : il s'agit de regrouper ici des savoir-faire expérimentaux courants (par exemple faire varier un paramètre, faire un étalonnage…) et nécessaires pour permettre la mise en lien avec le monde des théories et des modèles.

Cependant, la réalisation de mesures, la collecte et le traitement de données jouent un rôle spécifique dans l'articulation des deux mondes. L'action de mesurer articule en effet la prise d'informations au sujet du monde matériel au regard d'une grandeur théorique qui relève du modèle utilisé.

Plus généralement, la compétence *réaliser* contribue à la mise en relation des deux mondes. Pendant l'activité de modélisation, elle est très liée aux autres compétences travaillées et peut difficilement être mise en œuvre sans ces autres compétences, mais elle revêt un caractère opératoire qui permet aux autres compétences de s'exprimer.



Conclusion

En conclusion, l'activité de modélisation est un enjeu crucial dans l'apprentissage de la physique et de la chimie, ainsi que pour la formation scientifique des adultes de demain. On peut tenter de définir simplement un modèle comme un outil théorique modeste, mais suffisamment efficace pour interpréter les phénomènes observés et prévoir des évènements susceptibles de se produire (Gaidioz & Tiberghien, 2003 ; Robardet & Guillaud, 1997). Même si un modèle a une cohérence propre, il n'est jamais pris pour lui-même et constitue un intermédiaire entre théories et situations matérielles : « *il est toujours relationnel : modèle de, modèle pour* » (Bachelard S., 1979). Il en va de même pour l'enseignement scientifique où, pour éviter une dérive dogmatique, il ne s'agit pas d'enseigner le meilleur modèle qui soit, mais de montrer, outre ses caractères hypothétique et modifiable, qu'il est pertinent pour certains problèmes dans certains contextes (Martinand, 2002). C'est donc à travers des situations et des problèmes que le modèle prend tout son sens. Grâce à une diversité d'activités explicitant certaines caractéristiques de la modélisation en jeu, chaque élève pourra mieux acquérir des savoirs théoriques utiles qu'il sera capable de mobiliser dans de nouvelles situations, et il pourra développer en outre sa maîtrise des compétences de la démarche scientifique. Ce passage de cadres descriptifs et explicatifs de la vie courante à un point de vue scientifique sur le monde observable (Gaidioz, Vince & Tiberghien, 2004) constitue un élément essentiel et structurant de son apprentissage.

Annexe

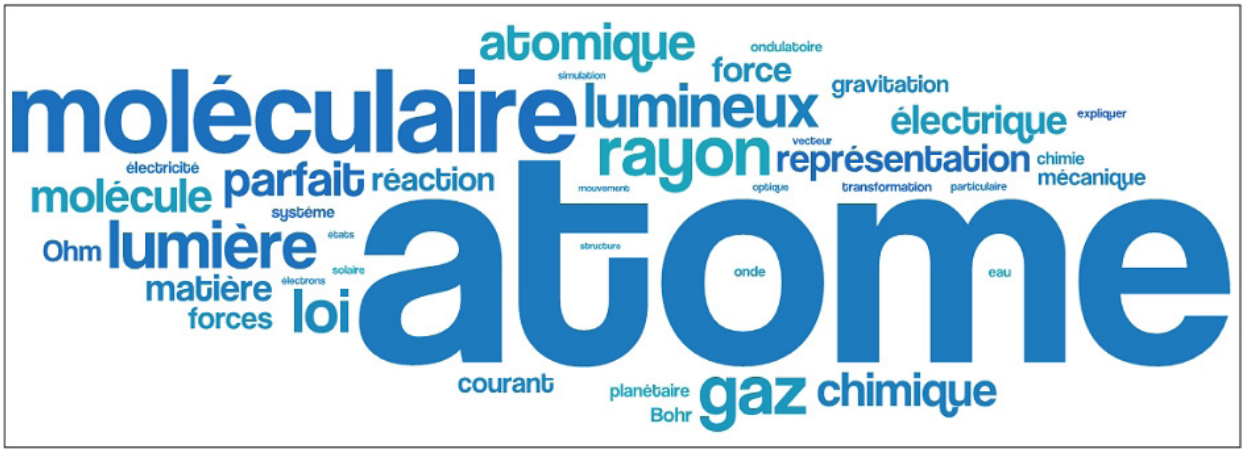
Quelques résultats d'une enquête à destination des enseignants sur la notion de modèle.

MONOD-ANSALDI R. & PRIEUR M. (2011) Démarches d'investigation dans l'enseignement secondaire : représentations des enseignants de mathématiques, SPC, SVT et technologie. *Rapport d'enquête IFÉ – ENS de Lyon*. Décembre 2011. Téléchargeable avec ce lien.

Dans cette enquête, il était demandé aux enseignants, dans le contexte d'une analyse de leur perception des démarches d'investigation, de citer quelques exemples de modèles dans leur discipline et de se prononcer sur la fonction et sur la forme des modèles. 771 enseignants de physique-chimie ont répondu, exerçant pour moitié environ au lycée, l'autre moitié exerçant en collège.

Sans grande surprise, la familiarité avec les modèles apparait bien plus grande pour les enseignants de physique-chimie et de SVT que pour ceux de mathématiques et technologie (l'enquête était adressée aux enseignants de lycée et de collège) : neuf enseignants sur dix peuvent citer un modèle pour les deux premières disciplines, tandis qu'à peine plus de la moitié peut le faire pour les deux autres.

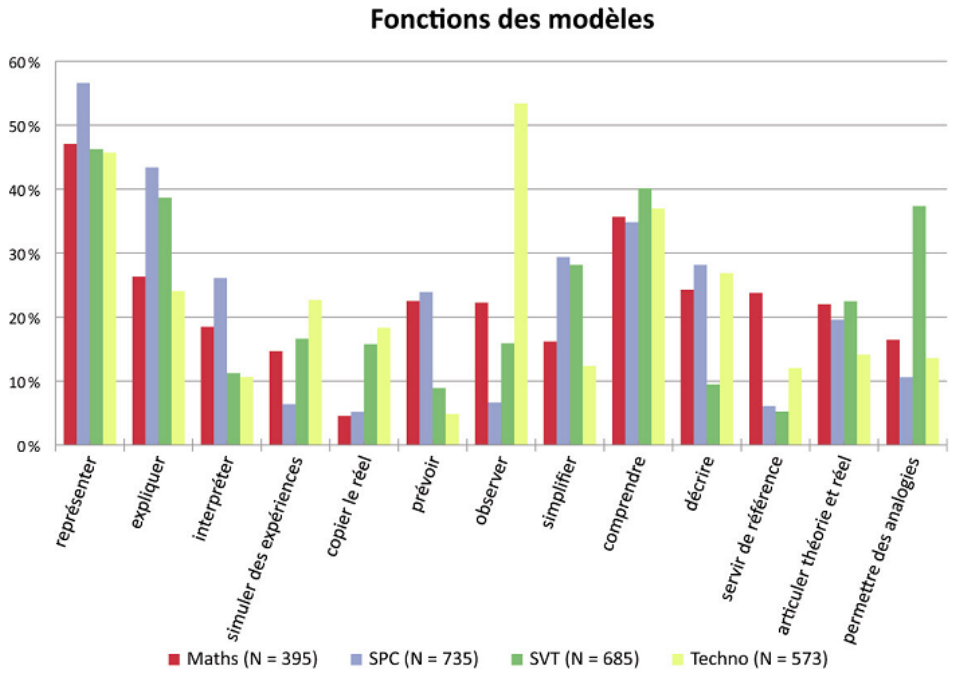
En physique-chimie, les modèles les plus cités sont indiqués sur le «nuage de mot» ci-dessous. Ils concernent surtout des modèles servant à décrire et sont relativement peu formels. On peut évidemment faire l'hypothèse qu'ils sont très liés aux programmes en vigueur (les réponses ont été collectées lors du premier semestre 2011). Les exemples cités sont plutôt moins diversifiés que dans les autres disciplines.



Nuage de termes obtenu à partir des réponses ouvertes des enseignants de SPC à la question *Donnez deux exemples de modèles dans votre discipline*.

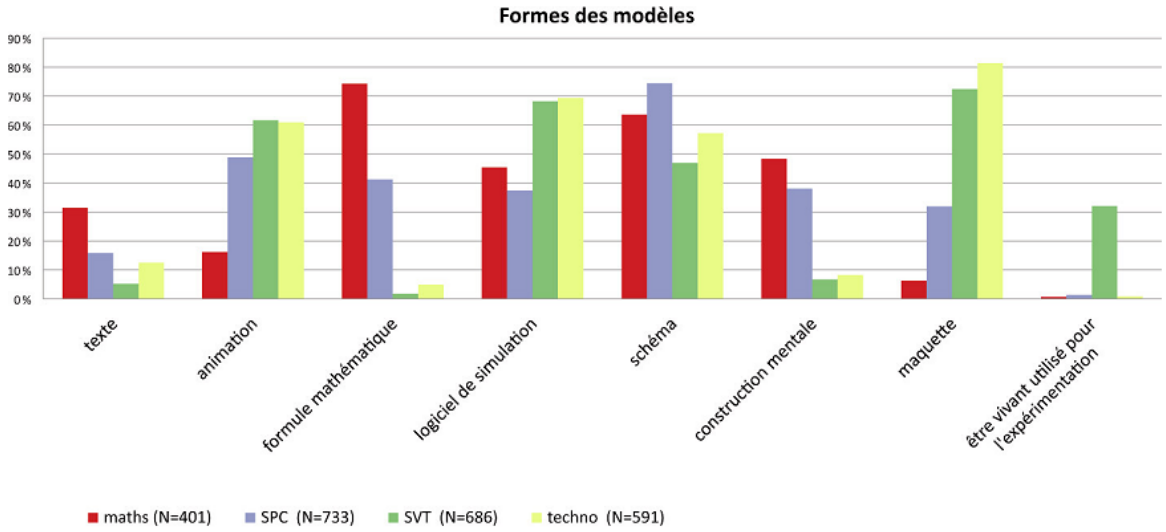
Au sujet de la fonction et de la forme des modèles, la proximité des réponses des enseignants de physique-chimie est forte avec celles formulées par les enseignants de mathématiques, tandis que SVT et technologie font apparaitre quelques similitudes.

Une question de l'enquête proposait de choisir et classer trois fonctions des modèles parmi treize. Si la fonction de représentation est la plus citée (pour trois disciplines sur quatre), les enseignants de physique-chimie ne retrouvent spécifiquement leurs collègues de SVT que sur les fonctions expliquer et simplifier. Par contre, interpréter, décrire et prévoir, souvent cités, rapprochent physique-chimie et mathématiques. Enfin, articuler théorie et réel n'est cité que par environ 20 % des répondants de mathématiques, physique-chimie et SVT.



Pourcentages de répondants par discipline ayant classé la proposition dans les trois premières positions, parmi les répondants ayant choisi au moins une fonction du modèle à la question *Pour vous, quelles sont les fonctions des modèles utilisés dans votre discipline ? Choisissez puis classez les propositions retenues en mettant en position 1 la fonction que vous jugez la plus importante*.

Cette proximité disciplinaire se retrouve sur la forme des modèles (figure ci-dessous). Il était proposé de choisir et classer trois formes de modèles parmi huit. Seule la forme schéma fait consensus interdisciplinaire. Par ailleurs, là encore la proximité des réponses en physique-chimie est plus grande avec les mathématiques qu'avec les SVT : formule mathématique, construction mentale.



Pourcentages de répondants par discipline ayant classé la proposition dans une des trois premières positions, parmi les répondants ayant choisi au moins une forme du modèle à la question *Pour vous, quelles sont les formes des modèles utilisés dans votre discipline ? Choisissez puis classez les propositions retenues en mettant en position 1 la forme que vous jugez la plus importante*.

Le modèle semble donc être bien davantage perçu comme matérialisé en SVT et technologie alors qu'il est perçu comme relevant de l'abstraction, de l'idée, en physique-chimie et en mathématiques.

Retrouvez éduscol sur :

Bibliographie

- Bachelard S. (1979). Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles. In *P. Delattre and M. Thellier. Élaboration et justification des modèles. Paris, Maloine* : 3-19.
- Coince D., Miguet A.-M., Perrey S., Rondepierre T., Tiberghien A. & Vince J. (2008). Une introduction à la nature et au fonctionnement de la physique pour les élèves de seconde. *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, vol. 102, n° 900, 3-20.
- Coince D., Vince J., & Tiberghien A. (2009) La notion de modèle au cœur de la physique. *Cahiers pédagogiques,* n°469 - Faire des sciences physiques et chimiques.
- Evrard T. & Amory B. (dir) (2015) *Les modèles, des incontournables pour enseigner les sciences !* De Boeck.
- Gaidioz P. & Tiberghien A. (2003) Un outil d'enseignement privilégiant la modélisation. *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, vol. 97, n° 850, 71-83.
- Gaidioz P., Vince J. & Tiberghien A. (2004) Aider l'élève à comprendre le fonctionnement de la physique et son articulation avec la vie quotidienne. *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, vol. 98, n° 866, 1029-1042.
- GRIESP (coll.) (2016) Expérimentation et modélisation, la place du langage mathématique en physique-chimie.
- Kermen I. (2018) Comment le caractère dual, macroscopique-microscopique, de la chimie s'incarne-t-il dans son enseignement ? Réflexions autour des modèles et du langage. *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, vol. 112, n° 1000, 95-108.
- Kermen I. & Méheut M. (2008) Expliquer l'arrêt de l'évolution d'un système chimique en terminale S. *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, vol. 102, n° 905, 847-856.
- Martinand J.-L. (2002). Apprendre à modéliser. In *R. M. J. Toussaint. Changement conceptuel et apprentissage des sciences. Recherches et pratiques. Québec, Les éditions logiques* : 47-68.
- Melzani M. (2018) Enseigner explicitement la démarche de modélisation et le fonctionnement des sciences physiques. *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, vol. 112, n° 1008, 1179-1201.
- Monod-Ansaldi R. & Prieur M. (2011) Démarches d'investigation dans l'enseignement secondaire : représentations des enseignants de mathématiques, SPC, SVT et technologie. *Rapport d'enquête IFÉ – ENS de Lyon*. Décembre 2011. Téléchargeable avec ce lien.
- Robardet G. & Guillaud J.-C. (1997) *Éléments de didactique des sciences physiques*. PUF.
- Sensevy G. & Santini J. (2006) Modélisation : une approche épistémologique. *ASTER* n°43
- Tiberghien A. (1994) Modelling as a basis for analysing teaching-learning situations. In *Learning ans Instruction*. Vol.4. pp. 71-87
- Vince J., Monod-Ansaldi R., Prieur M. & Fontanieu V. (2013) Représentations sur la discipline, son apprentissage, les démarches d'investigation et quelques concepts-clés : quelles spécificités pour les enseignants de Sciences Physiques ? 1ère partie. *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et Chimie*, 1ère partie : vol. 107, n° 950, 31-50 ; 2e partie : vol. 107, n° 951, 147-165.
- Walliser B. (1977) *Systèmes et modèles*. Paris, Seuil.