

Initiation à la mécanique en classe de quatrième

PRESENTATION.

On présente ici un Module d'Initiation à la Mécanique expérimenté en 1972-1973, 1973-1974 et 1974-1975 dans 12 classes de quatrième de divers établissements de la région de Marseille (Marseille, Aix-en-Provence et Gardanne), soit 3 classes de type I, 4 classes de type II et 5 classes divisées en groupes de niveaux appartenant au C.E.S. expérimental « Versailles ».

La Mécanique (rationnelle) a été choisie, d'une part à cause du rôle considérable joué par l'aspect mécanique des choses dans l'environnement technologique — rôle qui rend indispensable sa compréhension par les enfants soumis à la scolarité obligatoire — d'autre part, par l'importance des études consacrées récemment à la formation des concepts mécaniques chez l'enfant par les psychologues de l'intelligence (notamment Piaget).

Enfin, les caractéristiques de la mécanique de l'environnement (rôle des frottements) rendent tout à fait inadéquate une étude directement technologique, et rendent, au contraire, indispensable une analyse préalable au niveau de la mécanique « pure », seule démarche véritablement explicative en face des phénomènes toujours complexes que nous présente la réalité.

Les principes ayant présidé à la construction de ce module et les diverses étapes de l'Initiation, peuvent être résumés comme suit :

Le modèle fondamental d'explication satisfaisant le besoin de comprendre au niveau des enfants de 13-14 ans étant l'explication causale, la loi de la dynamique sera présentée essentiellement comme un rapport de causalité. Cela conduit à privilégier le concept de *force* abordé à travers son rôle *dynamique*.

On est parti de l'étude du mouvement d'un train, parce qu'il fait partie de l'environnement technologique de l'enfant dans la réalité, dans l'imagination et dans le jeu. D'autre part, le train lâché « sur son élan » donne, plus qu'aucun autre véhicule, l'intuition de l'inertie, de la tendance à poursuivre indéfiniment son mouvement, et peut conduire plus facilement à imaginer un véhicule idéal sans frottement.

Enfin le « moteur » et le « mobile » sont nettement (spatialement) séparés, et les mouvements de démarrage ou de freinage (qu'on étudie sur des films) sont voisins de mouvements uniformément accélérés ou retardés, et en fournissent facilement le concept.

On parvient ainsi facilement, par anticipation, observation et analyse, au schème fondamental : en l'absence de frottement, un train lancé « sur son élan » conserve une vitesse constante. S'il est tiré par une locomotive, sa vitesse croît régulièrement. Le taux d'accroissement de la vitesse, ou accélération est proportionnel à la traction (ou force) de la loco et inversement proportionnel à la charge (ou masse) du train.

On étudie ensuite un « monte-charge » constitué d'un fil passant sur une poulie et portant à ses deux extrémités des poids variables. Les enfants manipulent ce système. La disposition adoptée leur permet de comprendre que la « force » agissant sur le système est égale à la différence des poids, et qu'elle met en mouvement la somme des masses, ce qui fournit une distinction *dynamique* entre poids et masse.

L'analogie avec le train permet de franchir une étape dans la conception générale de la *force* et dans la compréhension de la dynamique comme loi abstraite.

Les enfants manipulent ensuite de petits « parachutes » de diverses tailles, lestés par des poids variés. C'est l'occasion de considérer une nouvelle espèce de force, la résistance de l'air, et de comprendre qu'elle puisse se composer avec le poids, ce qui renforce l'idée qu'on puisse utiliser la force comme un concept abstrait et indépendamment de sa « nature ». On apprend à « schématiser » les forces par des flèches. En outre, on a affaire à une force résultante qui varie avec le temps et on analyse les phases successives du mouvement qui tend finalement vers un mouvement limite.

Cette manipulation montre de plus :

- 1) le mouvement devient uniforme, non seulement quand il n'y a pas de force, mais quand on a deux forces qui se compensent, ce qui est psychologiquement très différent ;
- 2) les frottements et résistances, dont on a fait abstraction pour comprendre l'effet accélérateur des forces, sont eux-mêmes assimilables à des forces. Leur réintroduction comme forces supplémentaires permet d'analyser et de comprendre le fonctionnement mécanique de plusieurs véhicules ou machines réels, et non plus idéals.

On montre, en faisant agir un poids sur un petit wagonnet au moyen d'une poulie et d'un fil horizontal, que le poids peut transmettre une force de direction quelconque et dont l'intensité est égale au poids (voir monte-charge).

Cette force peut agir sur un wagonnet pour l'accélérer, mais elle peut aussi agir, au repos, pour *déformer un ressort*. On étudie les déformations de divers ressorts. Dans le cas du ressort à boudin, l'allongement est proportionnel au ressort. On peut se servir de ce fait pour étalonner un *dynamomètre*.

On analyse, dans le cas de la déformation d'un ressort, l'équilibre du système caractérisé par une *action* et une *réaction* directement opposés.

L'analyse du lancer par l'arc (par le maître) et par un système de deux dynamomètres tirant sur un même projectile (par l'élève) montre comment deux forces concourantes peuvent avoir une action unique. La direction de cette action de lancer (étudiée quand le lancer est encore virtuel) est déterminée à partir du graphique des forces schématisées, par la règle de la médiane.

Enfin, on étudie, dans un plan vertical, l'équilibre de trois forces concourantes et on établit la règle du parallélogramme (ou du triangle).

Des considérations plus développées sont données ci-après. Elles sont suivies par les principaux documents de travail (préparation théorique, texte des leçons — sauf la dernière qui est encore en remaniement — texte des épreuves de pré-test et de contrôle). Nous ne pouvons pas encore fournir les éléments statistiques résultant du contrôle, qui sera effectué en fin de module.

EXPOSE DES MOTIFS ET DES FINALITES.

Dans le cadre des projets de renforcement des enseignements scientifiques en premier cycle, et en particulier d'introduction de « modules » de sciences physique en quatrième, tels que les prépare la Commission Lagarrigue, il nous est apparu, au cours même de notre expérimentation (qui en est à sa troisième année) que nous avons besoin de voir plus clair dans les problèmes assez généraux de *finalité*, qui se posent à propos de l'appréciation de notre expérience et de sa place éventuelle dans un futur cursus du premier cycle. Nous désirons donc poser les principes suivants, comme des bases de départ qui, quant à nous, nous paraissent évidents, mais qui doivent de toute façon faire préalablement l'objet d'une discussion et d'une option à laquelle il faudra s'en tenir une fois pour toutes.

1) Finalités premier cycle.

Si on prend sérieusement en considération le fait que la majorité (de l'ordre des 2/3) des enfants soumis à la scolarité obligatoire, ne poursuivent pas les études secondaires au-delà du premier cycle, et si par ailleurs on admet que la fonction sociale principale du système scolaire doit être une fonction de formation de la masse, la fonction de sélection de l'élite n'intervenant qu'en deuxième ligne, alors il est évident que la finalité principale de l'enseignement de premier cycle doit prendre en compte avant tout cette majorité des élèves destinés à arrêter définitivement leurs études scolaires à la fin de la troisième, et tendre à leur constituer un « bagage » de connaissances et d'aptitude formant un tout cohérent, modeste certes, mais ne comportant pas de lacunes essentielles propres à être ressenties comme telles. Ce bagage doit avoir pour objet, pour les élèves et pour les adultes qu'ils deviendront :

- de leur procurer non une formation, même rudimentaire en vue d'une profession, mais une vision du monde propre à accroître autant que possible leur liberté de choix d'une formation professionnelle,
- de leur fournir une culture minimum rationnelle et organisée à base de prise de conscience et de compréhension de l'environnement — et s'agissant de physique, de *l'environnement technologique*,
- de les munir des connaissances de base qui leur permette, dans la suite, de tirer profit des multiples informations qui leur fourniront les circonstances de la vie et particulièrement les « media ».

Ceci posé et étant donné le rôle fondamental que jouent les phénomènes mécaniques dans l'univers des objets techniques, il semble impossible d'accepter que les élèves du premier cycle ne reçoivent pas un enseignement de base cohérent et solide concernant ces phénomènes mécaniques. Il serait, certes, regrettable que les élèves du premier cycle ignorent comment fonctionne un alternateur, un transformateur ou un moteur électrique. Mais il est proprement ridicule qu'ils connaissent le fonctionnement d'un moteur électrique sans rien savoir sur les conditions mécaniques dans lesquelles ce moteur est employé et surgit dans leur environnement, ce qui est à peu près la situation actuelle (Techno de troisième). Et l'argument suivant lequel ces notions seront éclaircies en terminale ou en seconde n'est pas recevable puisque, encore une fois, il ne concerne pas la majorité des élèves qui n'entreront ni en seconde ni en terminale.

Par ailleurs, la situation de la Mécanique est telle qu'il est impossible de comprendre, ou même d'exprimer dans un système

cohérent de lois, le fonctionnement mécanique des véhicules et des « machines » (ce qu'on pourrait appeler la mécanique de l'environnement, ou la mécanique technologique) sans avoir assimilé d'abord le modèle de la « Mécanique pure », qui fait abstraction des frottements — lesquels jouent le rôle prépondérant dans la pratique. Le rôle des frottements ne peut être pleinement compris que si on les réintroduit après dans le modèle à la lumière des notions (force, énergie) qui sont à la base de la Mécanique pure et des frottements qui peut rendre compte de manière intelligible des aspects mécaniques de l'environnement, avec lesquels l'enfant et l'homme se trouvent confrontés à tout instant.

D'où l'intérêt — et même la nécessité — de l'introduction au cours du premier cycle, d'une initiation à la Mécanique comportant le maniement, dans des cas simples, des concepts de base de la Mécanique rationnelle, en tant que ces concepts sont cachés derrière les apparences compliquées de la Mécanique technologique.

2) Finalités deuxième cycle.

En ce qui concerne la minorité qui poursuivra des études secondaires dans le second cycle, il faut prendre en compte le point de vue qui fait du premier cycle une préparation au second. A cet égard, les nouveaux programmes de Mécanique proposés pour la seconde appellent les remarques suivantes :

— Le souci de rigueur qui anime les promoteurs de ces programmes est certes légitime.

C'est vrai qu'il est impossible de rencontrer dans la réalité un point matériel sur lequel expérimenter et que ce qu'on appelle ainsi est toujours un solide étendu, pour lequel on doit prendre en compte non seulement la translation mais la rotation. C'est vrai qu'il est difficile — peut-être impossible — de donner une définition irréprochable de la force, et que les variations de la quantité de mouvement sont les seuls effets qu'on puisse tirer directement de l'expérience.

C'est vrai qu'il n'y a jamais, à strictement parler, que des interactions entre deux systèmes et que le souci de simplification qui fait « couper » cette interaction en deux actions pouvant être étudiées séparément, oblige à des abandons graves du côté de la rigueur.

Ce souci de rigueur part de la considération de « la physique du physicien » et des préoccupations comparables à celles qui ont animé la réforme de l'enseignement des Mathématiques. Il est naturel et légitime que les physiciens le ressentent fortement, et il trace la voie vers le but final à atteindre : faire passer dans l'univers de l'élève les principes, les exigences et les méthodes

qui ont été progressivement mis à la base de la science physique au cours de l'évolution de cette science.

Mais tel qu'il est aujourd'hui, ce programme ne prend pas du tout en compte les traits psychologiques spécifiques des élèves auxquels il s'adresse, traits qui établissent des différences importantes entre le fonctionnement de leur intelligence et le mode de pensée de leurs professeurs.

Le système de départ constitué par deux disques glissant et tournant sur un coussin d'air, repérés par un petit point lumineux de leur circonférence, et soumis à une interaction, produite par exemple par un ressort, ce système spécialement conçu pour permettre d'en tirer des notions parfaitement claires et des relations parfaitement rigoureuses (ou peu s'en faut) va apparaître, d'après ce que nous savons de la psychologie de l'adolescent, terriblement compliqué à l'élève de seconde, et il risque de se produire un choc, peut-être aussi désastreux que celui que produisent les « maths modernes » à telle ou telle étape de leur enseignement.

Tout en reconnaissant le progrès que représente le nouveau programme de Mécanique, il nous semble nécessiter une préparation visant à fournir, à travers des intuitions concrètes, des instruments de pensée conceptuelle qui serviront de fil conducteur indispensable pour que le système rigoureux de la Mécanique soit véritablement compris, et soit relié au concret de l'environnement, soit autre chose qu'un système de relations abstraites qui, même tiré d'expériences passablement sophistiquées, restera une fois érigé en théorie générale, un système formel sans lien avec le réel (le « concret » ne se confond nullement avec « l'expérimental »).

Ainsi, il nous semble opportun — et même nécessaire — qu'au moment d'aborder le système rigoureux qu'on lui présente dans le second cycle, les élèves aient déjà acquis un modèle moins rigoureux bien que déjà rationnel et même formalisé, correspondant et assujetti à la saisie spontanée qu'ils peuvent avoir de l'aspect mécanique des choses, reposant sur des concepts qui ne sont pas définis de façon stricte mais qui sont d'une intuition courante, modèle grâce auquel la deuxième approche qu'ils suivront en seconde apparaîtra moins comme une construction générale et abstraite, que comme un affinage du modèle antérieur, visant à rendre parfaitement logiques des relations qui étaient — et qui restent — aperçues à travers les intuitions concrètes.

3) Conditions psycho-pédagogiques.

Mais les finalités, construites du point de vue d'une certaine partie de « la physique du physicien », à faire acquérir aux élèves

du premier cycle, doivent être complétées par la considération de « la physique de l'élève », c'est-à-dire des concepts et démarches que se forme spontanément l'enfant de 13-14 ans, ou auxquels il peut être conduit par une clarification de ses intuitions confuses. A cet égard, on sait beaucoup de choses sur la formation des idées mécaniques dans la période qui précède immédiatement l'âge de nos élèves, à la suite de recherches nombreuses et approfondies menées ces dernières années au Centre d'Epistémologie Génétique de Genève, sous la direction de Jean PIAGET (*) (voir Etudes d'Epistémologie, Tomes 27, 28, 29) et du reste, au cours de notre expérience, nous avons pu faire, en condition scolaire, un grand nombre de remarques éclairées par la théorie opératoire de l'intelligence et dont la signification n'est pas négligeable.

Ainsi, on sait que vers 12-13 ans, l'enfant devient capable d'analyser spontanément les diverses causes intervenant dans un mouvement, et en particulier de faire la part des frottements et des résistances, qu'il considère comme des facteurs perturbants, et dont il est capable de faire abstraction par la pensée.

Il sait aussi raisonner sur une situation réelle en la situant parmi des situations virtuellement possibles, en particulier analyser de cette façon les conditions d'équilibre en termes de déplacements virtuels (ceci, bien entendu, de façon qualitative et relativement confuse). Il sait raisonner sur les rapports de multiplication dans une machine simple, et, par actualisation des déplacements virtuels, anticiper les rapports de poids qui se feront équilibre.

Il sait appréhender les interactions entre mobiles (en particulier dans les problèmes de chocs) en termes de transmission de « l'élan », et construire ainsi des quantités invariantes qui seront transférées d'un mobile à l'autre en se conservant.

Il parvient spontanément à la notion (qualitative) d'accélération ou de ralentissement continu d'un mouvement, et à l'idée de rapporter ces variations à un concept qui, quelque nom qu'il lui donne, a les caractéristiques de la force.

Enfin, il se trouve au seuil de l'appréhension des structures et compositions vectorielles : tout au moins sait-il que l'action de deux forces concourantes sur un mobile dépend de leurs directions et de leurs grandeurs, cette composition étant bien mieux comprise dans le cas des forces en action que dans celui des forces en équilibre.

(*) Ces recherches ont, du reste, été reprises — et confirmées — en divers endroits, notamment en Angleterre et aux Etats-Unis.

Ces études ont été faites à travers des interrogations individuelles relativement « non-directives ». Il est évident qu'elles suggèrent au pédagogue toute une série de « leçons » où les élèves auraient à manipuler un dispositif mécanique et où, à travers les commentaires et interrogations directives du maître, ils seraient amenés à préciser quantitativement la définition des concepts et la forme des lois qu'ils ne constituent spontanément que sous une forme vague et qualitative.

Il est prévisible — et nous l'avons montré effectivement — qu'on puisse, dans certains cas simples, et en renonçant à rechercher une trop grande généralité, les amener à la représentation mathématique ou graphique des notions ou des lois fondamentales de la Mécanique, ceci sous une forme qui éclaire pour eux la raison d'être des principaux phénomènes mécaniques qu'ils sont amenés à rencontrer dans leur vie quotidienne, ou à entendre mentionner comme un des aspects fondamentaux de l'environnement.

HYPOTHESES ET OBJECTIFS PEDAGOGIQUES.

1) Approche spécifique de l'enfant de 13-14 ans.

Sur la base des considérations générales qui précèdent, et compte tenu des études non-directives menées par l'école de Genève — et auxquelles l'un d'entre nous a participé de façon continue — nous avons établi un programme d'initiation à la Mécanique étudié de façon, d'une part à éclairer un certain nombre de notions mécaniques fondamentales qui sont à l'œuvre dans les « machines » que l'élève rencontrera dans son environnement technologique, d'autre part à tenir compte des traits spécifiques de la psychologie cognitive des enfants de 13-14 ans, traits qui diffèrent notablement des caractéristiques intellectuelles de l'élève du second cycle en fonction desquelles est conçu traditionnellement (et encore plus dans les réformes en cours) l'enseignement de la Mécanique.

Pour préciser ce dernier point, nous avons été guidés par un certain nombre de « principes » — applicables bien entendu et très précisément à l'âge correspondant à une première initiation — et qui s'opposent dans une certaine mesure aux principes directeurs ordinaires référés à des élèves nettement plus âgés appartenant au second cycle ou à l'enseignement supérieur.

1) Avant d'être capable de certain type d'abstraction — ou avant de pouvoir être conduit à ces types d'abstraction par une pédagogie appropriée — l'enfant sait raisonner correctement sur des cas *concrets* et saisir les relations générales sous des formes particulières. Un approfondissement et une explication de ces formes particulières peut le conduire à énoncer les relations

générales sans perdre le contact avec le concret qu'il connaît bien. C'est à partir de là que, par la mise en rapport de situations concrètes différentes, mais analogues, peut s'opérer le passage à l'abstraction — dont le Centre de Genève est en train, en ce moment, d'élucider les conditions (abstraction « empirique » et abstraction « réfléchissante » de PIAGET).

2) Avant de se préoccuper — et d'être capable — de « définir » dans un énoncé précis les principales notions de la mécanique (vitesse, force, masse, résistance, quantité de mouvement, etc.), l'enfant s'en fait une « idée » directe et globale, que nous désignons, faute d'un meilleur terme, par « intuition » (insight). Il est capable, sous cette forme, d'apercevoir et d'énoncer très clairement des relations entre ces notions intuitives. Par exemple, il affirmera fortement que la locomotive, en tirant sur un train, fait croître sa vitesse, sans pouvoir encore définir ni la vitesse, ni la force de traction. Quand plus tard, il apprendra à préciser — et finalement à définir — ces notions, les relations qu'il a d'emblée aperçues entre elles lui fourniront des points de repère qui l'aideront à « comprendre » ces définitions précises, à condition qu'on ait pris soin de maintenir le lien entre les notions finalement définies et les intuitions initiales.

3) Dans la genèse cognitive des relations physiques, l'aspect qualitatif précède l'aspect quantitatif. Il est saisi plus tôt et avec plus d'évidence. Ainsi, de ce point de vue, la relation la plus « prégnante » est la relation de *causalité*, suivant laquelle tel « agent » *produit* tel phénomène. Cette relation, que la physique cherche — avec raison — à éliminer sous sa forme naïve et à remplacer par des concepts plus évolués (interaction, structure, etc.) est, au contraire, très frappante pour l'enfant, elle lui fournit une clé essentielle d'explication et de compréhension : c'est d'elle qu'il faut partir dans le processus pédagogique et ce n'est qu'à un stade ultérieur qu'on pourra aider l'enfant à s'en débarrasser.

4) L'introduction du quantitatif commence par la simple conception des *sens* de variation, c'est-à-dire par la comparaison de relations d'ordre (c'est la « fonction constituante » de PIAGET) : ce facteur (cause) fait varier cet autre facteur (effet) dans le même sens, ou en sens contraire, ou ne le fait pas varier du tout. Une « intuition » préalable de ce genre fournit un support essentiel dans l'intelligence de l'enfant pour l'élucidation des fonctions mathématiques explicites (« fonctions constituées »).

Il faut les expliciter clairement au préalable. Cela évitera, dans bien des cas, non que l'enfant donne des énoncés faux, mais qu'il donne des énoncés absurdes.

5) Dans des cas importants, les notions et relations mécaniques formées au niveau des quatre remarques qui précèdent

peuvent être explicitées spontanément par l'enfant, soit directement, à partir de manipulations bien choisies qui lui fourniront l'occasion de découvrir les indices pertinents. Ce stade quasi-spontané nous semble essentiel comme point de départ pour passer progressivement à une élucidation scientifique proprement dite. Il paraît particulièrement bien adapté à l'étape d'une première initiation, et il se révèle spécialement riche en ce qui concerne les notions mécaniques.

Il faut, bien entendu — même à l'étape considérée — le dépasser et introduire d'abord des lois quantitatives, puis une définition précise des notions employées, enfin une description de procédés de mesure qui permettront — en réalité ou en principe — une vérification expérimentale exacte des lois. On notera que cette approche, inspirée par des remarques psychopédagogiques, fonctionne dans une certaine mesure en sens inverse de celle du physicien adulte — et des manuels — qui est inspirée au contraire par des exigences logiques et épistémologiques. Ce sera l'objet de l'enseignement de second cycle, et de l'enseignement supérieur, d'introduire — au fur et à mesure qu'elles peuvent être complètement assimilées —, la logique et l'épistémologie correctes du physicien dans le système cognitif de la physique.

2) Situation préalable.

Des sondages individuels et un pré-questionnaire écrit nous ont montré que, préalablement à tout enseignement, les élèves avaient une intuition assez claire et largement répandue :

- De l'inertie de leur corps dans l'accélération ou le ralentissement des véhicules (autobus, moto, vélo).
- Des modes d'appréciation de la vitesse au cours du mouvement (supposé uniforme) d'un véhicule — et parfois même du mode de mesure de cette vitesse en km par heure.
- De l'absence de sensations et d'information relatives à la vitesse dans un ascenseur en mouvement uniforme.
- De la tendance d'un train lâché « sur son élan » à conserver sa vitesse lorsqu'on parvient à réduire les frottements.
- Du rôle de freinage de la résistance de l'air.
- Du rôle de la masse (apprécié par le poids) dans le démarrage ou l'accélération d'un véhicule.

3) Objectifs à atteindre.

- Compréhension de la loi de l'inertie comme cas limite des frottements nuls, d'abord en mouvement horizontal puis en mouvement quelconque.
- Notion d'accélération (constante).

- Compréhension de la loi $\gamma = F/m$ en mouvement rectiligne uniformément accéléré d'abord à partir d'une force particulière (traction d'une locomotive), puis généralisation à d'autres types de force (poids, résistance de l'air) pour aboutir à la notion générale de force considérée au point de vue dynamique.
- Distinction entre poids et masse au point de vue dynamique. Le poids est un vecteur, la masse un scalaire (à valeurs positives).
- Représentation d'une force par une flèche.
- Composition — et compensation — de deux forces de nature différente. Mouvement uniforme (loi de l'inertie) dans le cas de la compensation.
- Expression des frottements et résistances en termes de forces. Lois de la résistance de l'air. Vitesse limite.
- Passage des forces dynamiques aux forces statiques, déformation des ressorts.
- Cas particuliers de ressorts à déformation proportionnelle. Dynamomètre et mesure statiques des forces.
- Action résultante de deux forces concourantes. Règle du parallélogramme.
- Equilibre de trois forces concourantes.

Présentation des thèmes.

Les raisons pour lesquelles nous commençons l'étude de la mécanique par la loi de la dynamique résultent de nos hypothèses pédagogiques, avant tout de l'idée que le schème le plus directement explicatif pour l'enfant de 13-14 ans est le schème de *causalité*.

Le chemin choisi pour arriver à une conception scientifique de la force, de la masse et de l'accélération, revient à considérer le rapport dynamique entre elles : une certaine force agissant sur un système ayant une certaine masse *causera* une certaine accélération. La compréhension claire, d'abord qualitative, puis quantitative, de ce *rapport* apportera des précisions essentielles sur les trois concepts, qui ne sont saisis initialement que sous forme intuitive et assez confuse. Autrement dit, au lieu de commencer à bien définir ce que sont en elles-mêmes la force, la vitesse et la masse, on se sert de la relation de causalité, très éclairante pour l'enfant, pour préciser ces trois concepts *dans leurs rapports mutuels*.

L'introduction de ces concepts se fait à travers l'exemple des véhicules, à cause de la place considérable que tiennent ceux-ci dans l'imagination, les jeux et l'expérience quotidienne de

l'enfant. Ainsi, les explications introduites à l'école pourront surgir à chaque instant dans la pensée de l'enfant en dehors de l'école, et se renforcer en même temps qu'elles permettront d'emblée de comprendre des relations qu'il rencontrera dans la vie de tous les jours. Notre choix s'est fixé d'autre part sur le *train* comme premier exemple à analyser parce que (contrairement au cas de l'automobile, du vélo...), le « moteur » apparaît **comme** bien distinct du « mobile », au point que la « force » exercée par l'un sur l'autre peut se caractériser et se matérialiser bien clairement, et parce que l'effet d'accélération (démarrage), que l'enfant connaît et retrouve par l'imagination, est relativement simple, et voisin de celui que fournirait une traction constante en l'absence de frottement.

L'inconvénient est que ce thème ne se prête pas à la manipulation directe (sauf pour le train « lego »). On a diminué cet inconvénient en partant de l'étude de *films* qui peuvent être projetés, repassés, passés à l'envers à loisir.

Nous avons ainsi confectionné trois « court-métrages », deux sur des trains réels, que nous avons tourné dans une gare, un triage, et sur une locomotive, grâce à la coopération de la S.N.C.F., un troisième sur modèles réduits, avec possibilité de repérage du temps, de la distance et de la vitesse, directement visibles sur le film.

Premier thème : Le train - Loi de l'inertie et notion d'accélération.

La leçon utilise surtout les films sur les trains comme supports visuels de l'imagination.

Après une présentation très rapide de la *notion* d'accélération au démarrage (le train va « de plus en plus vite »), puis de la *cause* de ce démarrage (le train est tiré par la locomotive — il peut aussi être poussé), on considère le cas d'un train qui, une fois mis en mouvement, est lâché par la locomotive (qui pousse), cas qui est illustré par de nombreuses images présentées de façon à faire « sentir » la tendance des véhicules à conserver leur mouvement. Les élèves sont invités à suggérer les causes qui finissent par arrêter le train, et les moyens de diminuer ces causes. Si on considère la situation « idéale » où les frottements sont complètement supprimés, on en arrive à énoncer la loi de l'inertie. Dans la suite, on apprendra à raisonner, dans chaque cas observé ou expérimenté réellement, sur la situation « virtuelle » d'un système sans frottement.

On reprend alors en détail — sur films — l'étude du démarrage du train (ainsi que celle de son arrêt par freinage — qu'on compare au démarrage passé à l'envers) — en introduisant la

notion de vitesse, qui est introduite initialement par l'indication d'un « cadran de vitesse », mais qui est ensuite reliée opératoirement au quotient de l'espace par le temps (dans le cas du mouvement uniforme) par l'étude de l'étalonnage du cadran de vitesse d'une voiture à partir de trajets effectués à des vitesses constantes sur une route kilométrée. Ceci permet alors l'utilisation rationnelle, même dans le cas d'une vitesse variable, du cadran de vitesse gradué en kilomètres par heure, mètres par seconde, etc.

Ceci fait, on établit pour le démarrage d'un train (d'après les données du film sur modèle réduit) la fonction vitesse-temps, d'une part « par points » comme relation numérique de proportionnalité, d'autre part comme graphique rectiligne. On fait apparaître, soit comme « taux de variation », soit comme « pente » du graphique, une quantité appelée *accélération*, dont on fait remarquer sur des exemples (films) ou sur des graphiques, qu'elle peut être plus ou moins grande (on n'introduit pas explicitement une unité d'accélération, mais on compare les démarrages du point de vue de la vitesse acquise « dans la première minute »). Des exercices d'inversion sont introduits à partir du freinage, par la considération du temps que met pour s'arrêter un train de vitesse déterminée.

Enfin, on introduit la loi de variation de « l'espace parcouru », soit de façon seulement qualitative en faisant des constatations sur les indications des films, soit — pour les classes d'un bon niveau — en raisonnant sur les vitesses initiales et finales pour un certain intervalle de temps, et en admettant qu'ils font prendre en compte la vitesse *moyenne*.

Thème 2 : Le train - Facteurs de l'accélération.

L'accélération au démarrage, numériquement caractérisée par la vitesse acquise dans la première minute, est *produite* par la traction de la locomotive. Des locomotives plus ou moins « puissantes » peuvent tirer plus ou moins fort. Cette notion de « force de traction » étant d'abord prise dans son sens intuitif et qualitatif. Plus la locomotive tire fort, plus la vitesse croît rapidement : l'accélération est d'autant plus grande que la traction est plus grande. L'accélération dépend aussi du train : plus les wagons sont nombreux et chargés, plus le train est difficile à faire démarrer : l'accélération est d'autant plus petite que le train est plus chargé. Ces deux relations sont facilement anticipées par les enfants. On les précise (tout en restant dans le qualitatif) en remplissant un tableau à double entrée comparant plusieurs locos et plusieurs trains, du point de vue du plus et du moins. On précise alors la notion de « force de traction » : on suppose que les diverses locos sont attelées au train par un puissant ressort, lequel s'allonge plus ou moins suivant que la

traction est plus ou moins grande. La traction peut être alors *mesurée* par l'allongement. Les élèves sont invités à manipuler des dynamomètres à ressort (gradués en unités arbitraires). On énonce trois lois fondamentales, en décrivant (et en montrant en film) les procédés employés pour leur vérification.

1) Si le mécanicien règle le moteur de sa machine de façon que la traction reste *constante* pendant tout le démarrage, alors le mouvement est précisément le mouvement uniformément accéléré décrit dans la leçon précédente (indication du cadran de vitesse proportionnelle au temps).

Il est à noter que ce point n'est pas du tout admis d'emblée par la majorité des élèves, qui pensent tout naturellement que « plus on veut que le train aille vite, plus il faut tirer fort ». C'est là qu'il faut constituer tout un cycle de raisonnements directs et inverses prenant appui sur le principe d'inertie tel qu'il a été admis comme cas-limite, et insistant à tout moment sur le fait qu'il s'agit toujours d'un cas *idéal*, celui d'un système sans frottements. Les élèves manipulent et font fonctionner un petit train « lego » à piles en intercalant un dynamomètre entre la locomotive et le train. Une lecture « au vol » de l'indication initiale, puis de l'indication en régime normal permet de dégager le rôle des frottements qui sont évalués par cette deuxième indication, et d'*imaginer* quelle serait l'allure du phénomène s'il n'y avait pas du tout de frottements.

2) Si la traction (indiquée par le ressort) est deux ou trois fois plus forte, l'accélération est deux ou trois fois plus grande. Ce point est très facilement admis (et même anticipé) par les élèves, car la loi de proportionnalité est la première forme de fonction quantitative croissante qui se présente à leur esprit. Il n'en résulte nullement qu'ils soient capables de manier cette relation dans toutes ses caractéristiques.

Divers essais nous ont suggéré une méthode analogue à la vieille « règle de trois » comme seul moyen pour les élèves de résoudre des exercices simples (avec des données qui sont dans des rapports simples).

Nous ne pensons pas qu'on puisse utiliser dans le cas de lois physiques « concrètes » les notions raffinées qui sont proposées à ces élèves dans l'enseignement de mathématiques. A ce point, on introduit (brièvement) une *unité* de force, le newton, et la *schématisation* d'une force par une flèche.

3) Si la charge du train devient deux ou trois fois plus lourde, l'accélération (produite par une même traction) devient deux ou trois fois plus petite. Ceci est également admis immédiatement par les élèves, comme la forme la plus naturelle d'une fonction décroissante. Et ce cas soulève les mêmes difficultés

que la proportionnalité directe. Cette dernière loi peut être vérifiée qualitativement (et indirectement) au moyen du train « lego » qu'on charge plus ou moins, et en lisant l'indication initiale du dynamomètre. Cette dernière expérience, qui suppose implicitement que l'accélération au démarrage est toujours la même, introduit en fait la variation simultanée des deux facteurs force et masse.

A la suite de ces deux leçons, les élèves ont acquis (et nous l'avons vérifié) un schème précis consistant dans une relation *mathématique* $\gamma = F/m$ associée à une relation *causale*, c'est-à-dire fortement liée à un système d'intuitions qui domine à ce stade la pensée physique de l'enfant. Cette formalisation de l'intuition causale s'est effectuée dans un cas bien particulier (mouvement horizontal permettant d'éliminer l'action du poids, séparation nette entre le moteur et le mobile permettant une visualisation et une mesure de la force motrice).

Il reste à faire de cette relation particulière aux trains une relation mécanique générale en la retrouvant dans d'autres situations, où elle est moins évidente, mais où cette première étude procurera des analogies très éclairantes. Chemin faisant, on enrichira la notion particulière de force de traction de déterminations nouvelles en la rapprochant d'abord de la force de pesanteur, puis de la force de résistance de l'air, pour construire le concept général de *force*.

Thème 3 : Le monte-charge.

Il s'agit d'une machine « Atwood » simplifiée, qui est manipulée par les élèves (par groupe de deux) et pour laquelle on se contente d'établir qualitativement des covariations.

Le fil passant sur une poulie porte à ses deux extrémités des cylindres égaux, divisés chacun en trois parties égales de masse M . En outre, l'une des masses M est subdivisée en rondelles égales qu'on peut transporter d'un des cylindres sur l'autre.

Une première analyse faite dans des situations d'équilibre et de déséquilibre fait comprendre comment l'action des poids se transmet — et se compense partiellement — le long du fil et de la poulie, si bien que la force motrice apparaît comme la différence des poids.

Puis, on passe à l'étude du système en mouvement... Les élèves fixent leur attention sur la rotation de la poulie, qu'ils peuvent apprécier à l'œil, et sur le temps mis par l'un des cylindres pour franchir une hauteur donnée, qui est appréciée (grossièrement) au moyen d'une montre trotteuse.

La leçon est menée en attirant sans cesse l'attention des élèves sur l'analogie avec le démarrage du train de façon à suggérer

une analogie entre la traction de la locomotive, et le poids actif. Le but est de construire le concept de force comme abstraction commune de ces deux causes d'accélération.

En outre, comme on peut faire varier indépendamment le poids actif (différence des poids suspendus aux deux extrémités du fil) et la masse totale entraînée (somme des masses suspendue), on fait comprendre d'une façon relativement claire (parce que sur un plan dynamique) aux élèves la différence fondamentale de ces deux types de grandeurs, différence qui résulte du fait que le poids est un vecteur (possibilité de composition soustractive) tandis que la masse est un scalaire (qu'on peut seulement additionner).

On va donc retrouver ainsi la loi $\gamma = F/m$ déjà vue dans le cas du train, mais sa vérification (au moins qualitative) s'effectue à travers des manipulations, en partie libres, effectuées par les élèves eux-mêmes, ce qui complète les constatations tirées de l'observation (films) par celles qui fournissent l'expérimentation.

Il nous a semblé du reste, en comparant la conduite des classes de « type » différent, que les élèves des classes de type 2 arrivaient mieux à comprendre l'ensemble du phénomène, si on commençait par le thème 3 reposant directement sur la manipulation, pour traiter ensuite les thèmes d'observation sur le train).

Une autre série d'expériences est menée en attachant une surcharge au bout d'un fil accroché au-dessous d'un des cylindres, de façon à ce que la force correspondante puisse être supprimée (lorsque la surcharge atteint le sol) au cours même du mouvement. Celui-ci peut être alors transformé en un mouvement (approximativement) uniforme ou en un mouvement retardé. Ces cas sont encore une fois mis en relation avec les cas correspondants rencontrés à propos du train.

Thème 4 : Les parachutes.

On utilise des dispositifs en papier fort en forme de cônes renversés, à la pointe desquels on peut accrocher de petites surcharges... Les élèves montés sur un tabouret laissent tomber deux parachutes et classent ainsi qualitativement les divers dispositifs employés : parachutes plus ou moins grands ou plus ou moins chargés.

Le but de la leçon est de faire apparaître (par ses effets dynamiques) un autre type de force, la résistance de l'air, et notamment de faire comprendre comment elle peut être composée avec le poids, en particulier comment ces deux forces peuvent s'annuler.

Les élèves comprennent facilement (et même anticipent) que la résistance croît avec la vitesse, qu'elle peut être schématisée par une flèche ascendante, et que c'est la différence du poids et de la résistance qui fait croître la vitesse du système. La possibilité de composer ces deux forces de « nature » différente consacre la formation du concept *général* de force.

L'allure du mouvement est décrite sur le plan théorique, depuis le début (où le poids agit seul) jusqu'au moment où est atteinte une vitesse limite.

Il est à noter que l'existence d'un mouvement uniforme limite dans le cas où les deux forces — de nature différente — se compensent, apparaît psychologiquement avec un statut complètement différent du cas (rencontré dans le cas du train) où le mobile est abandonné sans aucune force (et à la limite où les frottements sont nuls). La comparaison, sur laquelle on insiste fortement, du cas « pas de force » et du cas « poids et résistance opposés » permet d'étendre et de renforcer la signification de la loi de l'inertie, ainsi que de la composition, et donc de l'équivalence, des forces de natures différentes.

Les rôles du poids et de la surface du parachute dans la grandeur de cette vitesse limite sont dégagés sans peine. On fait appel à la description du parachutisme réel, notamment pour traiter le cas où le parachute est ouvert lorsque la vitesse est supérieure à la vitesse limite, et joue ainsi un rôle initial de freinage (mouvement accéléré).

Les trois derniers thèmes vont s'attacher à préciser les propriétés *opératoires* de la force, prise abstraitement, et qu'on s'attachera à manier sous la forme « schématisée » d'une flèche.

L'essentiel va être ici de préciser les rapports entre la force en action, telle qu'elle a été atteinte à travers ses effets dynamiques, et de la force équilibrée par d'autres forces, qui est, malgré les apparences, un concept beaucoup plus difficile à faire assimiler à l'enfant — en particulier parce qu'il s'agit toujours d'extraire et d'isoler « par la pensée » un élément particulier au sein d'un système global en équilibre.

Thème 5 : Mesures des forces en équilibre.

On commence par renforcer l'idée consistant à prendre le poids comme terme de comparaison de toutes les forces, en montrant qu'au moyen d'un fil et d'une poulie, un poids peut être transformé en une force de direction quelconque, par exemple en une force de traction horizontale agissant sur un wagonnet.

Puis, en utilisant la même poulie et le même fil, on fait agir le poids sur un système déformable : boucle de fil d'acier, petit arc, ressort à boudin.

Traitant alors la force (dont l'intensité est égale à celle du poids) comme la *cause* de la déformation, on étudie la relation quantitative entre la grandeur de la cause et la grandeur de l'effort, c'est-à-dire qu'on étudie la fonction force \rightarrow déformation.

On reprend alors l'analyse du système : le poids *tire* sur le fil qui tire sur le ressort, en l'inversant : le ressort *retient* le fil, qui retient le poids ; de façon à constituer un cycle fermé et à faire comprendre la compensation des actions (tirer) et des réactions (retenir).

L'étude des fonctions (et des graphiques) pour les divers systèmes déformables, fait apparaître la propriété du ressort à boudin : le graphique est une droite, les allongements sont proportionnels aux intensités des forces. Sans introduire la notion abstraite et difficile de « grandeur mesurable », mais en utilisant simplement la loi du ressort, on en vient ainsi à étalonner le ressort et à l'utiliser pour mesurer une force de grandeur et de direction — et de « nature » — quelconques, c'est-à-dire à expliquer comment fonctionne le dynamomètre, qui avait été utilisé jusqu'ici comme une « boîte noire ».

Thème 6 : Forces composées.

Il s'agit d'étudier la composition de deux forces concourantes, en traitant les forces (et leur résultante) comme *en action* (tout au moins virtuellement) et en se contentant de déterminer la *direction* de l'action résultante.

Un premier résultat est établi dans le cas de deux forces *égales*, en utilisant un *arc tendu* d'abord symétriquement, puis dissymétriquement (l'égalité des deux forces est assurée en tendant la corde par l'intermédiaire d'une petite poulie).

L'action (flèche) sera toujours dirigée suivant la bissectrice des deux forces.

On passe ensuite au cas de deux forces d'intensités différentes en fixant deux dynamomètres à deux pitons fixes et en tendant diversement leur extrémité commune au moyen d'un fil tenu à la main.

Ce sont les *réactions* des ressorts des dynamomètres qui sont à considérer (sens des flèches). Elles sont, comme les actions, indiquées sur les graduations. Le système est en équilibre, mais on fixe l'attention des enfants sur la direction (initiale) que prendrait l'action résultante *si on lâchait le fil*, direction qui est évidemment celle du fil avant qu'on l'ait lâché. On propose la règle :

- construire les flèches schématisant les deux forces concourantes,

- prendre la direction passant par le milieu du segment joignant leurs extrémités. Les enfants font un certain nombre de vérifications par constructions graphiques.

Thème 7 : Equilibre de trois forces.

Dans la leçon précédente, l'action composée de deux forces avait été considérée du point de vue dynamique (projection d'une boulette) tout au moins de façon virtuelle, l'attention des enfants ayant été centrée sur le mouvement que produiraient les ressorts si on lâchait le fil.

Actuellement il s'agit, non seulement de passer à la détermination de la résultante en grandeur et en direction, mais surtout de passer d'un système (virtuellement) dynamique à un système statique, ce qui n'est pas sans soulever des difficultés psychologiques.

La planche de la leçon précédente est fixée en position verticale (avec une inclinaison variable). Au point de concours, on suspend un poids variable et on assigne aux deux forces obliques le rôle de « soutenir » le poids vertical.

On construit la médiane du triangle formé par le point de concours et les flèches schématisant les deux forces obliques, on montre chaque fois que cette médiane est verticale, comme on peut le prévoir (leçon précédente) et que le double de cette médiane (qui représente la diagonale du parallélogramme des forces) va correspondre à la schématisation d'une force résultante qui est directement opposée au poids.

On pourra, après un certain nombre de vérifications, en rester à cet énoncé général.

Pour les classes d'un bon niveau, on pourra en outre :

- 1) montrer que les trois forces, placées bout à bout dans le bon sens, vont former un triangle fermé, et que cette règle met les trois forces sur le même pied, chacune d'elles pouvant être considérée comme équilibrant les deux autres dans un système unique d'interdépendance ;
- 2) faire l'application de la loi du parallélogramme à la décomposition d'une force en deux autres dans des cas simples illustrés par des applications pratiques.

Groupe de Recherches
sur l'Enseignement de la Physique
(Université de Provence - Marseille).
