

# CONCEPTIONS DES ELEVES ET RESOLUTION DE PROBLEMES EN MECANIQUE

Lillian C. McDermott, Department of physics, University of Washington, Seattle, Washington, USA

## Introduction

Les résultats de recherche sur la compréhension de la physique par les élèves indiquent que certaines idées erronées sur le monde physique sont communes aux élèves de différentes nationalités, issus de milieux socioculturels différents, et de niveaux d'enseignement et d'âges variés. Il existe des preuves importantes sur le fait que les étudiants à l'université ont souvent les mêmes difficultés conceptuelles et de raisonnement que celles largement partagées par des élèves plus jeunes. Il y a souvent peu de changements dans la compréhension conceptuelle avant et après un enseignement formel. De plus, les élèves sont souvent incapables d'appliquer des concepts qu'ils ont étudiés pour des tâches de résolution de problèmes quantitatifs, qui constituent habituellement la mesure de la réussite des élèves à un cours de physique.

Le nombre d'études empiriques sur la compréhension des élèves en mécanique dépasse le nombre total des études dans tous les autres domaines. Nous n'avons pas tenté de résumer toutes les recherches qui ont été menées. Un critère important pour le choix des travaux a été le degré d'application directe des résultats pour la formation des enseignants<sup>i</sup>. Pour faire ce choix, nous nous sommes appuyés sur de longues années d'expérience de formation des maîtres à l'enseignement de la physique et des sciences physiques aux niveaux de l'école primaire, du collège et du lycée<sup>ii</sup>. Un autre critère pris en compte dans la sélection des références a été leur relative accessibilité aux physiciens de tous les pays. Les publications en physique ont été préférées aux références moins facilement disponibles. En raison de l'expansion rapide de la littérature de recherche, nous avons principalement limité cette présentation aux études conduites avec des élèves d'université, y compris les futurs enseignants et les enseignants en activité. Les résultats s'appliquent toutefois aussi bien aux élèves de lycées, et dans certains cas aux élèves des écoles primaires.

## Investigations sur la compréhension des élèves

Dans cette partie nous donnons un bref aperçu de l'état actuel de la recherche sur la compréhension conceptuelle et la résolution de problèmes en mécanique. C'est dans le domaine de la mécanique que la plupart des recherches sur la compréhension de la physique par les élèves ont été menées. Même si depuis longtemps les enseignants étaient conscients des difficultés de cette matière pour les élèves, l'étendue du problème n'a généralement pas été reconnue jusqu'à ce que les physiciens et les chercheurs en didactique commencent à conduire des investigations systématiques et à produire des résultats.

## Développement d'un concept

Une précédente revue des recherches sur la compréhension conceptuelle en mécanique a identifié des facteurs qui devraient être pris en compte dans l'interprétation des résultats de recherche (McDermott, 1984). Les caractéristiques d'une investigation qui affectent ces résultats comprennent : la nature de l'instrument utilisé pour évaluer la compréhension, le degré d'interaction entre l'élève et le chercheur, la profondeur de la méthode d'investigation, la forme des données, le cadre physique, le temps, et les objectifs du chercheur.

## **Cinématique**

Une étude a été réalisée sur la compréhension des étudiants qui ont choisi un cours d'introduction à la physique<sup>iii</sup>, donné dans une grande université, concernant les concepts de position, de vitesse et d'accélération à une dimension. Il s'agissait de savoir si les étudiants pouvaient appliquer correctement ces concepts quand ils interprétaient des mouvements effectifs d'objets réels (Trowbridge & McDermott, 1980 ; Trowbridge & McDermott, 1981). Lors des entretiens, les étudiants observaient deux mouvements et on leur demandait de comparer les vitesses et les accélérations. Après enseignement, près d'un cinquième des étudiants confondaient les concepts de vitesse et de position. Quasiment chaque échec pouvait être attribué à l'utilisation d'un critère de position pour déterminer la vitesse relative. La confusion entre les concepts de vitesse et d'accélération était encore plus fréquente. La plupart des 200 étudiants qui ont participé à cette étude n'avaient même pas une compréhension qualitative de l'accélération comme le rapport  $\Delta v / \Delta t$ .

Une autre étude a examiné le raisonnement "spontané" en cinématique de 700 étudiants de première et quatrième années d'université et de 80 enfants de onze ans (Saltiel & Malgrange, 1980). On demandait aux sujets de résoudre des exercices papier crayon mettant en jeu des mouvements uniformes dans un référentiel galiléen. L'analyse de leurs essais de description du mouvement révéla que la plupart d'entre eux utilisaient de manière non appropriée un modèle causal (c'est-à-dire invoquant des forces ou autres "causes" de mouvement).

Dans une étude sur la compréhension des étudiants des mouvements à deux dimensions, on montrait, à cinq étudiants qui suivaient le cours d'introduction de la physique et à cinq professeurs de physique, des diagrammes de trajectoire d'objets se déplaçant (Reif & Allen, 1992). On demandait aux participants si les objets accélèrent, ralentissent ou se déplacent à vitesse constante, ceux-ci devaient ensuite dessiner les vecteurs vitesse pour des points indiqués. Les débutants ont médiocrement réussi cette tâche ; même les experts ont éprouvé des difficultés. Une analyse détaillée de la manière dont ces deux groupes ont traité ces tâches a permis aux chercheurs d'identifier les savoirs sous-jacents et les savoir-faire exigés pour obtenir des résultats corrects.

Des chercheurs de plusieurs pays ont participé à une autre étude au cours de laquelle des élèves de lycées et d'universités étaient interrogés sur leur compréhension du déplacement, de la vitesse et du référentiel (Bowden et al., 1992). Les résultats démontrent la nature contextuelle de l'apprentissage et montrent que, plus les problèmes deviennent faciles à résoudre de manière quantitative, plus il est difficile de différencier les élèves à partir de leur niveau de compréhension des concepts de base.

Quelques études se sont centrées sur la compréhension par les élèves des représentations graphiques de la vitesse. Une étude descriptive qui s'est étalée sur plus de sept années et qui a mis en jeu plusieurs centaines d'élèves d'université a contribué à identifier un certain nombre de difficultés rencontrées par les élèves lorsqu'ils font des liens entre les concepts de cinématique, leurs représentations graphiques et les mouvements d'objets réels (McDermott et al., 1987). Une autre étude a permis d'identifier des difficultés spécifiques des élèves relatives aux représentations graphiques de vitesses négatives (Goldberg & Anderson, 1989).

La persistance de certaines difficultés en mécanique a été démontrée non seulement à partir d'études détaillées conduites à une petite échelle, mais également à partir de l'utilisation, à grande échelle, d'instruments conçus pour évaluer la compréhension conceptuelle. Ceux-ci ont prouvé leur valeur pour aider les professeurs à être informés du fait que de nombreux élèves qui réussissent à des examens comportant des questions quantitatives peuvent avoir de sérieuses difficultés conceptuelles. Le test décrit dans ce chapitre a été publié dans des revues très accessibles.

Un instrument d'évaluation a été développé pour tester la capacité des élèves à interpréter les représentations graphiques du mouvement : le test de compréhension des graphes en cinématique (Test of Understanding Graphs in Kinematics (TUG-K)) (Beichner, 1994). Des

questions sur le dessin et l'interprétation des graphes de mouvement ont également été incluses dans une évaluation sur la force et le mouvement (Force and Motion Conceptual Evaluation, FMCE) (Thornton & Sokoloff, 1996).

### ***Dynamique***

Les résultats de recherche ont démontré à maintes reprises que les élèves sortent souvent du cours d'introduction à la physique avec de nombreuses croyances incorrectes équivalentes à celles qu'ils avaient avant enseignement. Les conceptions sur les relations entre force et mouvement ont été largement étudiées. Les difficultés des élèves concernant l'interprétation de la relation entre la force et des concepts plus complexes, tels que le travail, l'énergie et la quantité de mouvement, sont bien moins connues. Nous rapportons ci-dessous un exemple de compréhension de la dynamique par les élèves.

Avant enseignement, plus de 100 élèves d'un cours d'introduction de la mécanique devaient répondre à un contrôle demandant des réponses courtes sur les concepts de force et de mouvement (Champagne et al., 1980). Le contrôle utilisait une technique dont l'abréviation est D.O.E. (démonstration, observation, explication). Les résultats ont révélé que les élèves qui avaient étudié la physique précédemment avaient beaucoup d'idées erronées : une force produit un mouvement ; une force constante produit une vitesse constante avec une intensité de la vitesse proportionnelle à celle de la force ; l'accélération est due à l'augmentation de la force ; en l'absence de force, les objets soit sont au repos, soit ralentissent. Les résultats d'une autre étude indiquent également qu'avant et après le cours d'introduction à la mécanique de nombreux élèves semblent croire que le mouvement implique une force (Clement, 1982). L'étude met en jeu des tests écrits et des interviews sur un pendule et une pièce de monnaie jetée en l'air.

Une autre enquête étudie dans quelle mesure des élèves pris individuellement appliquent de façon consistante différentes conceptions de la force (par exemple "le mouvement implique une force") dans des contextes variés (par exemple à des corps en mouvement et des corps au repos) (Finegold & Gorsk, 1991). Plus de 500 élèves d'université et de d'écoles secondaires supérieures en Israël ont répondu à des test écrits, alors que 35 élèves participaient à des entretiens. Le test comportait des questions relatives à des forces agissant sur des objets variés, comme un livre posé sur une table, une masse suspendue à un pendule, un boulet de canon en vol, etc. Pour les questions concernant les objets en mouvement, les auteurs ont trouvé que les élèves qui mettaient en jeu une force dans la direction du mouvement, ne la mettaient en jeu que dans certaines situations. La croyance qu'aucune force n'agit sur un objet au repos était très courante.

Une étude a été menée avec des élèves européens de la dernière année du lycée (école secondaire supérieure) jusqu'à la troisième année d'université (Viennot, 1979). Les réponses à des exercices papier crayon sur des situations telles que les oscillations d'une masse fixée à un ressort ont été analysées. Les résultats indiquent que de nombreux élèves supposent que la relation entre la force et la vitesse est linéaire.

Dans une étude mettant en jeu des mouvements curvilignes et des trajectoires d'objets en mouvement, il était demandé à près de cinquante élèves de tracer le chemin qu'une masse suspendue à un pendule suivrait lorsque le fil est coupé pour quatre positions différentes de sa trajectoire (Caramazza et al., 1981). Un quart seulement des élèves a fourni une réponse globalement correcte. Près de 65% des élèves a dessiné une ligne droite lorsque le fil est coupé alors que le pendule passe par sa position d'équilibre.

Quelques études ont porté sur les difficultés des élèves relatives aux situations mettant en jeu la gravité. Une étude sur plusieurs centaines d'élèves de première année d'université en Australie a concerné l'utilisation des démonstrations simples de cours en lien avec la gravité (Gunstone & White, 1981). Par exemple, les élèves devaient comparer le temps de chute de balles de tailles égales en acier et en plastique lorsqu'elles étaient lâchées d'une même hauteur. Lors de cette tâche, les trois quart des élèves ont prédit des temps différents. La plupart des élèves croyait que l'objet le plus lourd tomberait plus vite. Une tendance à "observer les prédictions" a été

remarquée. Les réponses erronées courantes, illustrées par des citations d'élèves, sont discutées en détail dans le rapport écrit de cette étude.

Une autre étude australienne s'est fondée sur des questions à choix multiples posées lors d'un examen de physique de fin de lycée passé par 5500 élèves (Gunstone, 1987). Les questions du test portaient sur des situations mettant en jeu la gravité car elles étaient apparues intéressantes dans de précédentes études à plus faible échelle (voir ci-dessus). Certaines idées erronées se sont trouvées être fortement répandues parmi cette population. Une des questions du test concernait la machine d'Atwood, avec deux masses initialement au repos à la même hauteur. Les élèves devaient prédire ce qui se produirait si quelqu'un abaissait une des masses vers une autre position, la maintenait à cette position, puis la relâchait. Plus de la moitié des élèves ont prédit que les masses se mettraient alors en mouvement. Lorsque cette tâche a été proposée à nouveau sous une forme plus ouverte, une majorité d'élèves qui avait répondu de manière incorrecte a exprimé sa croyance comme quoi les masses retourneraient à leurs positions "d'équilibre".

Lors d'une étude sur la compréhension de la machine d'Atwood par les élèves, de nombreux élèves se sont trouvés avoir de sérieuses difficultés avec l'accélération, les forces internes et externes, et le rôle du fil (McDermott et al., 1987). Le même groupe de recherche a également travaillé sur les difficultés des élèves relatives à l'application de la relation fondamentale de la dynamique et du théorème de l'énergie cinétique à l'analyse de mouvement réels (Dawson & McDermott, 1987). Après avoir étudié les éléments pertinents, la plupart des élèves étaient incapables de mettre en relation les formalismes algébriques appris en classe avec les mouvements simples qu'ils observaient.

L'inventaire du concept de force ("Force Concept Inventory" (FCI)) est un test à choix multiple visant à évaluer la compréhension de la dynamique Newtonienne par les élèves (Halloun & Hestenes, 1985 ; Hestenes et al., 1992). Ce test a pour objectif de déterminer si les élèves sont capables de distinguer une réponse Newtonienne correcte de croyances populaires mais erronées de "sens commun". Les mêmes auteurs ont développé un autre test à choix multiples, le test de mécanique de base ("Mechanics Baseline Test" (MBT)), qui couvre une plus grande variété de sujets en mécanique Newtonienne que ne le fait le FCI (Hestenes & Wells, 1992). Une enquête a été réalisée auprès de 6000 élèves de l'école secondaire supérieure (lycée) et d'université qui ont passé le FCI avant et après l'enseignement de mécanique. Il est apparu que la plus forte amélioration des scores se produisait pour les élèves qui avaient participé de manière interactive à des activités au cours desquelles il y avait un feed-back immédiat par le biais de discussions avec des pairs ou des professeurs (Hake, 1996). Ce rapport a été soumis à publication<sup>iv</sup>.

Même si les résultats obtenus avec les instruments d'évaluation décrits ci-dessus sont encourageants, ils doivent être interprétés avec soin. Quel que soit le test à choix multiple, il est impossible de dire si une réponse correcte a été donnée avec des raisons sous-jacentes erronées (Sandin, 1985). De tels tests peuvent être utilisés comme des indicateurs de l'état initial des élèves individuellement. Toutefois, lorsqu'ils sont utilisés après enseignement, une bonne performance à ces tests devrait être considérée comme une condition nécessaire mais non suffisante à l'acquisition d'une compréhension conceptuelle convenable.

## La résolution de problèmes

C'est dans le domaine de la mécanique que les capacités des élèves à résoudre des problèmes de physique ont été étudiées le plus à fond. La résolution de problèmes a été utilisée par les psychologues cognitifs et les chercheurs en sciences cognitives comme un contexte permettant d'analyser les processus de pensée. Les recherches sur la résolution de problème qui sont directement pertinentes pour l'enseignement de la physique ont été discutées dans une revue détaillée (Maloney, 1994). Dans les études discutées ci-dessus, nous examinons et analysons les processus avec lesquels les individus de niveaux d'expertise différents tentent de résoudre des problèmes en dynamique.

Une étude a tenté d'identifier les différences dans les manières dont les experts et les novices résolvent les problèmes de physique (Chi et al., 1981). Les sujets étaient des étudiants de premier cycle universitaire qui avaient suivi un seul cours en mécanique, un étudiant spécialisé en physique ayant fini son deuxième cycle, un étudiant en troisième cycle de physique et un professeur de physique. Un des résultats montre une tendance des experts à catégoriser les problèmes selon une « structure profonde », alors que les débutants ont tendance à les catégoriser à partir d'éléments de surface.

Dans une autre étude, la résolution de problèmes a été analysée à partir de trois étapes principales : description et analyse du problème, construction d'une solution, et contrôle de la solution (Reif, 1983 ; Reif, 1995). L'analyse de ces étapes a montré que les composantes de la résolution de problèmes sont trop complexes pour être apprises à partir d'exemples et de la pratique. La capacité à résoudre les problèmes dépend non seulement de l'apprentissage des procédures, mais aussi de la capacité à faire appel à des savoirs annexes appropriés (Reif, 1985).

## **Application de la recherche à l'enseignement**

Une des motivations principales pour conduire des recherches sur les difficultés des élèves est d'utiliser les résultats pour guider le développement de curriculums qui prennent en compte les besoins et les capacités des élèves. Les résultats de toutes les études discutées ci-dessus sont compatibles avec une perspective d'enseignement et d'apprentissage qui peut être catégorisée globalement comme étant "constructiviste". Deux éléments importants du point de vue constructiviste sur la manière d'acquérir le savoir scientifique peuvent être résumés de la manière suivante : tous les individus doivent construire leurs propres concepts, et le savoir qu'ils possèdent déjà (ou qu'ils pensent avoir) influence significativement ce qu'ils peuvent apprendre. L'élève n'est pas considéré comme un récipient passif de connaissance, mais plus comme l'acteur de sa création. Ce point de vue sur l'apprentissage est en fort contraste avec celui "transmissif" selon lequel l'information peut être fournie directement aux élèves dans une forme utilisable, si seulement elle est énoncée de manière suffisamment claire. La conséquence serait que le fait d'écouter un cours, de lire un manuel scolaire et de pratiquer la résolution de problèmes devrait permettre aux élèves de développer une compréhension fonctionnelle de la physique, c'est-à-dire la capacité de faire le raisonnement nécessaire pour appliquer les concepts et principes appropriés dans les situations non encore mémorisées.

Nous donnons ci-dessous quelques exemples de stratégies et de matériels d'enseignement qui reflètent une approche constructiviste. Même si ces exemples ont été tirés de ce qui a été développé aux États-Unis, ils ont des applications bien plus larges. Les exemples illustrent l'application de la recherche à l'enseignement et ils sont également pertinents pour la formation des maîtres.

### **Construction de concepts**

Les matériaux d'enseignement ont été spécialement conçus pour aider les futurs enseignants et les enseignants en activité à développer la compréhension conceptuelle et les capacités de raisonnement nécessaires pour enseigner la science comme un processus d'investigation (Rosenquist & McDermott, 1987 ; McDermott et al., 1996). Cette approche conceptuelle de l'enseignement de la cinématique engage les étudiants dans des activités structurées, basées sur le laboratoire<sup>v</sup>, conçues pour les aider à développer une compréhension qualitative de la vitesse instantanée, de l'accélération constante et de la distinction entre ces deux concepts. L'accent est mis sur l'aide aux élèves pour qu'ils développent leurs capacités à faire des allers et retours entre les mouvements réels et leurs représentations graphiques. Ces matériaux d'enseignement ont été développés lors d'un processus itératif de recherche, de développement de curriculums et d'enseignement (McDermott, 1991). En plus de la recherche systématique, la conception initiale des matériaux a tiré profit des idées d'un professeur expérimenté qui a examiné la compréhension des élèves de manière moins formelle (Arons, 1977 ; 1994).

Une étude a été conduite pour examiner la disparité entre l'utilisation précise des termes techniques par des scientifiques et leur utilisation à tort et à travers par les élèves. Les résultats suggèrent une stratégie d'enseignement générale pour minimiser les complications linguistiques dans l'enseignement de la mécanique (Touger, 1991).

Des recherches en cours dans les classes guident le développement d'une stratégie d'enseignement pour prendre en compte les difficultés fréquemment éprouvées par les élèves à reconnaître qu'une surface immobile peut exercer une force perpendiculaire sur un objet avec lequel elle est en contact (Minstrell, 1982). Dans cette approche, la force perpendiculaire exercée par une table sur un livre est rendue convaincante en faisant étudier par les élèves le livre dans toute une série de situations physiques similaires qui sont plus facilement acceptables d'un point de vue intuitif (par exemple, sur une main, sur un ressort, sur une surface flexible, etc.). Dans un projet de développement de curriculums, des analogies ont été utilisées comme un pont entre les croyances incorrectes des élèves et les idées Newtoniennes (Clement, 1993).

Une stratégie générale d'enseignement pour aider les élèves à dépasser certaines de leurs difficultés conceptuelles met en jeu l'utilisation d'activités de laboratoire à partir de l'ordinateur (Thornton & Sokoloff, 1990). Par exemple en cinématique, les élèves créent en temps réel des graphes de la position, de la vitesse et de l'accélération en fonction du temps à partir de leur propre déplacement. Ces activités comme d'autres utilisant l'ordinateur ont été incorporées dans un cours d'introduction entièrement fondé sur les activités en laboratoire (Laws, 1991). L'évaluation de cet enseignement à l'aide de pré-tests et de post-tests indique que l'apprentissage et la mémorisation sont significativement meilleurs que dans les cours utilisant des méthodes d'enseignement traditionnelles. Dans un type différent d'approche basée sur les activités en laboratoire, les élèves réalisent des expériences simples conçues pour constituer une base pour un dialogue socratique (Hake, 1987 ; Hake, 1992).

Les cours magistraux interactifs ont été de plus en plus utilisés dans les cours d'introduction de la physique comme moyen d'impliquer intellectuellement les élèves. Dans un enseignement nouveau, le professeur réalise un cours interactif pendant lequel les élèves analysent des situations physique à l'aide de feuilles de travail (Van Heuvelen, 1991a ; 1991b). La première fois que l'étudiant aborde un sujet, l'analyse est qualitative, ensuite il doit faire une analyse quantitative. L'enseignement par les pairs est une autre approche qui a été utilisée pour obtenir la participation active des élèves à un cours magistral à grande échelle (Mazur, 1996). A plusieurs moments pendant le cours, le professeur présente une question qualitative et des réponses à choix multiples qui sont conçues pour révéler des difficultés conceptuelles courantes. Après avoir donné leur réponse, les élèves doivent discuter avec leurs voisins et donner une nouvelle réponse.

Des séries de questions qualitatives à utiliser dans des groupes de travaux dirigés ont été développés pour compléter les cours, les manuels scolaires et les activités de laboratoire qui caractérisent l'enseignement traditionnel (Shaffer & McDermott, 1992). La recherche a été utilisée comme guide pour développer cet enseignement complémentaire, qui a été conçu en vue de faciliter l'approfondissement de la compréhension conceptuelle et des capacités de raisonnement. Pour favoriser le changement conceptuel, les matériaux d'enseignement utilisent fréquemment une stratégie dans laquelle tout d'abord on favorise délibérément la possibilité de faire une erreur particulière pour ensuite la discuter explicitement. La procédure peut être résumée en une séquence d'étapes : mettre à jour, confronter et résoudre (McDermott, 1991).

Le processus avec lequel les élèves peuvent être encouragés à réaliser un changement conceptuel a été également étudié à partir d'un certain nombre de perspectives théoriques. Un modèle d'apprentissage décrit le changement conceptuel en terme de conflit entre les conceptions existantes d'un apprenant et les nouvelles conceptions (Hewson & Hewson, 1984). Il est suggéré que l'apprenant peut accepter d'adopter une nouvelle conception si elle est "intelligible, vraisemblable et utile". Il existe un certain nombre d'autres facteurs importants, comme le degré auquel un élève individuel suit toujours une cohérence interne.

Il a été suggéré que les processus de changement conceptuel peuvent être organisés en trois types : "différenciation", "extension de classe", et "reconceptualisation" (Dykstra, 1992). Pour la différenciation, les nouveaux concepts émergent d'idées plus générales (par exemple la vitesse et l'accélération émergent du mouvement). Pour l'extension de classe, les concepts considérés comme différents se révèlent être les mêmes (par exemple le repos et la vitesse constante). Pour la reconceptualisation, un changement significatif se produit (par exemple, une "force implique un mouvement" devient une "force implique une accélération").

Dans un autre modèle, les connaissances des élèves sont découpés en morceaux ou décrites en termes de "facettes" qui peuvent être en lien avec le contenu, les stratégies ou le raisonnement (Minstrell, 1992). Un exemple de facette est la notion "plus un objet est lourd, plus il tombe vite", une idée qui est normalement incorrecte mais qui peut être vraie dans certains contextes. Dans ce modèle, l'enseignement vise à aider les élèves à modifier des facettes existantes et à ajouter de nouvelles facettes. L'enseignement est considéré comme un processus d'aide aux élèves afin qu'ils incorporent, dans une structure conceptuelle correcte, des facettes existantes et des facettes nouvelles.

### **Résolution de problèmes**

Un enseignement a été spécialement élaboré pour améliorer les compétences de résolution de problèmes des élèves. Dans une série d'études une investigation sur les capacités nécessaires pour comprendre une relation telle qu'une définition ou une loi a été menée (Reif et al., 1976 ; Reif, 1981). Une stratégie d'enseignement a été développée pour enseigner la méthode générale pour acquérir une compréhension d'une telle relation. Une stratégie explicite de résolution de problèmes mettant en jeu l'application de la relation a été enseignée. Les résultats d'une étude sur les effets de l'organisation des connaissances sur la performance lors d'une tâche suggèrent qu'une présentation hiérarchique des informations améliore les capacités des élèves à résoudre certains types de problèmes (Eylon & Reif, 1984).

Une stratégie pour l'enseignement des compétences à résoudre les problèmes utilisant des groupes de travail coopératif a été développée. Dans cette stratégie, les sessions de résolution de problème ont remplacé les récitations traditionnelles comme complément des activités de laboratoire et des cours (Heller et al., 1992 ; Heller & Hollabaugh, 1992). Des problèmes avec un contexte riche sont distribués à des groupes de travail. Ces problèmes diffèrent considérablement des problèmes de fin de chapitre des manuels scolaires traditionnels. Ils placent l'élève dans une situation réelle pour laquelle la physique doit être utilisée pour concevoir une solution à un problème. Les informations fournies aux élèves peuvent comporter des faits non pertinents et peuvent être incomplètes. Cette approche a été testée pour identifier un certain nombre de facteurs importants pour son efficacité, y compris la structure des groupes et la formation fournie aux assistants d'enseignement.

Un autre type de stratégie d'enseignement pour la résolution de problèmes a été conçu pour être utilisé durant des cours pour des classes comportant un grand nombre d'élèves. On enseigne aux élèves à débiter la résolution d'un problème en écrivant une description qualitative. Les élèves identifient les concepts et les principes pertinents et justifient leur sélection. Ils décrivent ensuite comment appliquer les concepts et principes pour trouver une solution (Leonard et al., 1996).

### **Commentaires**

Quelques-unes des études expérimentales discutées ci-dessus se sont entièrement centrées sur l'identification et l'analyse des difficultés des élèves, alors que d'autres ont pris en compte la conception et l'analyse des stratégies d'enseignement qui abordent ces difficultés. Les résultats de l'ensemble de ces études conduisent aux généralisations sur l'apprentissage et l'enseignement (McDermott, 1993).

La facilité à résoudre les problèmes quantitatifs n'est pas un critère approprié pour la compréhension fonctionnelle.

*Les questions relatives à un raisonnement qualitatif et aux explications verbales sont essentielles.*

Comme en témoignent les notes, beaucoup d'élèves qui ont terminé un cours d'introduction de la physique peuvent résoudre des problèmes quantitatifs, comme ceux à la fin des chapitres d'un manuel scolaire standard. Toutefois, les réussites sur de tels problèmes ne garantissent pas que les élèves aient développé une compréhension fonctionnelle, c'est-à-dire la capacité à faire le raisonnement nécessaire pour appliquer les concepts et principes appropriés dans des situations non encore mémorisées. Pour beaucoup d'élèves, la résolution de problèmes est une expérience passive. Les problèmes qui exigent un raisonnement qualitatif et une explication verbale demandent un niveau d'implication intellectuel plus élevé. Il existe des preuves issues de la recherche comme quoi les élèves qui ont fait l'expérience de la résolution de problèmes qualitatifs réussissent aussi bien, et souvent mieux, sur les problèmes quantitatifs que ceux qui ont passé plus de temps à résoudre des problèmes traditionnels (Shaffer & McDermott 1992 ; Thacker et al., 1994). Ce qui est encore plus important est que, les élèves qui ont travaillé avec des problèmes qualitatifs réussissent mieux de tels problèmes que les autres élèves et sont capables de donner de meilleures explications physiques.

Ce résultat suggère la séquence suivante d'enseignement. L'étude d'un nouveau sujet devrait commencer par aider les élèves à développer une compréhension qualitative du matériel directement à partir de l'expérience ou de l'observation lorsque c'est possible. Les mathématiques sont souvent introduits très tôt dans une présentation typique. Malheureusement, une fois que les équations apparaissent, les élèves ont tendance à éviter d'analyser qualitativement les situations. Le formalisme mathématique devrait être reporté jusqu'à ce que les élèves aient une certaine pratique du raisonnement qualitatif concernant le phénomène étudié. De plus, on devrait demander aux élèves de faire la synthèse des concepts et des mathématiques, et d'articuler les relations selon leurs propres termes.

Une structure conceptuelle cohérente n'est pas un résultat typique de l'enseignement traditionnel.

*Les élèves ont besoin de participer au processus de construction de modèles qualitatifs, ce qui peut les aider à comprendre les relations et les différences entre les concepts.*

Le développement d'un concept est un processus itératif de raffinements successifs. Lorsque cela est possible, la première rencontre avec un nouveau concept devrait être intimement liée aux observations et à l'expérience des élèves. Les raffinements successifs devraient se produire en spirale, les élèves reconnaissant la nécessité de rendre compte des nouveaux phénomènes.

Certaines difficultés conceptuelles ne sont pas surmontées par un enseignement traditionnel.

*Les difficultés conceptuelles persistantes doivent être explicitement traitées par des problèmes variés dans des contextes différents.*

Dans les cas où il est connu d'après la recherche ou l'expérience d'enseignement que les élèves vont certainement éprouver des difficultés, il est important de permettre délibérément de faire une erreur particulière et que cette erreur soit ensuite traitée explicitement. Une fois que l'erreur est mise à jour à partir d'une tâche appropriée, on peut aider l'élève à reconnaître et à faire face à cette difficulté. A ce point, il est crucial que l'enseignant insiste pour que la difficulté soit résolue. Si cela n'est pas fait, la difficulté aura tendance à rester latente, et à émerger plus tard dans un autre contexte.

La recherche et l'expérience acquise sur la formation des maîtres ont montré la nécessité de cours spéciaux pour la formation des maîtres (McDermott, 1990). Deux généralisations sont

particulièrement pertinentes pour la préparation des enseignants. Toutes deux sont issues de la recherche et de l'expérience sur la formation.

Enseigner en racontant est un mode inefficace d'enseignement pour la plupart des élèves.

*Les élèves doivent être intellectuellement actifs pour développer une compréhension fonctionnelle*

et la plupart des enseignants ont tendance à enseigner comme ils ont été enseignés.

*On devrait fournir aux enseignants l'opportunité d'apprendre le contenu qu'ils auront à enseigner de la manière dont ils devront l'enseigner.*

## Références

- Arons, A. (1977). *The Various Language: An Inquiry Approach to the Physical Sciences*. New York: Oxford University Press.
- Arons, Arnold (1994). *A Guide to Introductory Physics Teaching*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Beichner, R. (1994). Testing student understanding of kinematics graphs. *American Journal of Physics*, 62, 750-762.
- Bowden, J., G. Dall'Alba, E. Martin, D. Laurillard, F. Marton, G. Masters, P. Ramsden, A. Stephanou, E. Walsh (1992). Displacement, velocity and frames of reference: Phenomenographic studies of students' understanding and some implications for teaching and assessment. *American Journal of Physics*, 60, 262-269.
- Caramazza, A., M. McCloskey and B. Green (1981). Naive beliefs in 'sophisticated' subjects: Misconceptions about trajectories of motion. *Cognition*, 9, 117-123.
- Champagne, A., L. Klopfer, J. Anderson (1980). Factors influencing the learning of classical mechanics. *American Journal of Physics*, 48, 1074-1079.
- Chi, M.T.H., Feltovich, P.J. and Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5, 121-152.
- Clement, J. (1982). Students' preconceptions in Introductory Mechanics. *American Journal of Physics*, 50, 66-71.
- Clement, J. (1993). Using bridging analogies and anchoring intuitions to deal with students' preconceptions in physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 30, 1241-1257.
- Dykstra, D.I. (1992). Studying conceptual change: Constructing new understandings. In R.F. Duit, F. Goldberg and H. Niedderer (Eds.), *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies, Proceedings of an International Workshop*, Bremen, Germany, March 4-8, 1991 (pp. 40-58). (Kiel Germany: IPN).
- Eylon, B. and F. Reif (1984). Effects of knowledge organization on task performance. *Cognition and Instruction*, 1, 5-44.
- Finegold, M. and P. Gorsky (1991). Students' concepts of force as applied to related physical systems: A search for consistency. *International Journal of Science Education*, 31, 97-113.
- Goldberg, F.M. and J.M. Anderson (1989). Student difficulties with graphical representations of negative values of velocity. *The Physics Teacher*, 27, 254-260.
- Gunstone, R.F. and R. White (1981). Understanding of gravity. *Science Education*, 65, 291-299.
- Gunstone, R.F. (1987). Student understanding in mechanics: A large population survey. *American Journal of Physics*, 55, 691-696.
- Hake, Richard R. (1987). Promoting student crossover to the Newtonian World. *American Journal of Physics*, 55, 878-884.
- Hake, R.R. (1992). Socratic Pedagogy in the Introductory Physics Laboratory. *The Physics Teacher*, 33, 1-7.
- Hake, R.R. (1996). Interactive engagement vs. traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. (To be published.)

- Halloun, Ibrahim A. and David Hestenes (1985). The initial state of college physics students. *American Journal of Physics*, 53, 1043-1056.
- Heller, Patricia, Ronald Keith and Scott Anderson (1992). Teaching problem solving through cooperative grouping. Part 1: Group versus individual problem solving. *American Journal of Physics*, 60, 627-636.
- Heller, Patricia and Mark Hollabaugh (1992). Teaching problem solving through cooperative grouping. Part 2: Designing problems and structuring groups. *American Journal of Physics*, 60, 637-644.
- Hestenes, D., M. Wells and G. Swackhammer (1992). Force Concept Inventory. *The Physics Teacher*, 30, 141-158.
- Hestenes, D. and M. Wells (1992). A Mechanics Baseline Test. *The Physics Teacher*, 30, 159-166.
- Hewson, Peter W. and Mariana G. A'Beckett Hewson (1984). The role of conceptual conflict in conceptual change and the design of science instruction. *Instructional Science*, 13, 1-13.
- Laws, Priscilla W. (1991). Calculus-based physics without lectures. *Physics Today*, Dec. 1991, 24-31.
- Lawson, R.A. and L.C. McDermott (1987). Student understanding of the work-energy and impulse-momentum theorems. *American Journal of Physics*, 55, 811-817.
- Leonard, William J., Robert J. Dufresne and Jose P. Mestre (1996). Using qualitative problem-solving strategies to highlight the role of conceptual knowledge in solving problems. *American Journal of Physics*, (to be published 1996-1997).
- Maloney, David P., (1994). Research on Problem Solving: Physics. In Gabel, Dorothy L. (Ed.), *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*, New York: MacMillan Publishing Company.
- Mazur, Eric (1996). *Peer Instruction: A User's Manual*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- McDermott, L.C. (1984). Research on conceptual understanding in mechanics. *Physics Today*, 37 (7), 24-32.
- McDermott, L.C., M.L. Rosenquist and E.H. van Zee (1987). Student difficulties in connecting graphs and physics: Examples from kinematics. *American Journal of Physics*, 55, 503-513.
- McDermott, L.C. (1990). A perspective on teacher preparation in physics and other sciences: The need for special science courses for teachers. *American Journal of Physics*, 58, 734-742.
- McDermott, L.C. (1991). Millikan Lecture 1990: What we teach and what is learned—Closing the gap. *American Journal of Physics*, 59, 301-315.
- McDermott, L.C. (1993). Guest Comment: How we teach and how students learn—A mismatch? *American Journal of Physics*, 61, 295-298.
- McDermott, L.C., P.S. Shaffer and M.D. Somers (1994). Research as a guide for teaching introductory mechanics: An illustration in the context of the Atwood's machine. *American Journal of Physics*, 62, 46-55.
- McDermott, Lillian C. and the Physics Education Group at the University of Washington (1996). *Physics by Inquiry* Vols. 1 and II. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- McDermott, Lillian C., Peter S. Shaffer and the Physics Education Group at the University of Washington. (1991-present). *Tutorials in Introductory Physics*.
- Minstrell, J. (1982). Explaining the 'at rest' condition of an object. *The Physics Teacher*, 20, 10-14.
- Minstrell, J. (1992). Facets of students' knowledge and relevant instruction. In R.F. Duit, F. Goldberg and H. Niedderer (Eds.), *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies, Proceedings of an International Workshop*, Bremen, Germany, March 4-8, 1991 (pp. 110-128). Kiel Germany: IPN.
- Rosenquist, M.L. and L.C. McDermott (1987). A conceptual approach to teaching mechanics. *American Journal of Physics*, 55, 407-415.
- Reif, F., J.H. Larkin and B.C. Bracket (1976). Teaching general learning and problem solving skills. *American Journal of Physics*, 44, 212-217.
- Reif, F. (1981). Teaching problem solving—A scientific approach. *The Physics Teacher*, 19, 310-316.

- Reif, F. (1983). Understanding and teaching problem-solving in physics. In G. Delacote, A. Tiberghien, and J. Schwartz (Eds.), *Research on Physics Education: Proceedings of the First International Workshop*, La Londe les Maures, France, June 26-July 13, 1983 (pp. 15-53). Paris France: Éditions du CNRS.
- Reif, F. (1985). Acquiring an effective understanding of scientific concepts. In L.H.T. West and L. Pines (Eds.), *Cognitive Structure and Conceptual Change*. (pp. 133-151). Orlando, FL: Academic Press .
- Reif, F., and Sue Allen (1992). Cognition for interpreting scientific concepts: A study of acceleration. *Cognition and Instruction*, 9, 1-44.
- Reif, Frederick (1995). Millikan Lecture 1994: Understanding and teaching important scientific thought processes. *American Journal of Physics*, 63, 17-32.
- Saltiel, E. and J.L. Malgrange (1980). 'Spontaneous' ways of reasoning in elementary mechanics. *European Journal of Physics*, 1, 73-80.
- Sandin, T.R. (1985). On not choosing multiple-choice. *American Journal of Physics*, 53, 299-300 (letter).
- Shaffer, P.S. and L.C. McDermott (1992). Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part II: Design of an instructional strategy. *American Journal of Physics*, 60, 1003-1013.
- Thacker, Beth, Eunsook Kim, Kelvin Trefz and Suzanne M. Lea (1994). Comparing problem solving performance of physics students in inquiry-based and traditional introductory physics courses. *American Journal of Physics*, 62, 627-633.
- Thornton, R.K. and D.R. Sokoloff (1990). Learning motion concepts using real-time microcomputer-based laboratory tools. *American Journal of Physics*, 58, 858-867.
- Thornton, R.K. and D.R. Sokoloff (1996). Assessing and improving student learning of Newton's laws. Part I: The force and motion conceptual evaluation and active learning laboratory curricula for the first and second laws. (To be published.)
- Trowbridge, D.E., and L.C. McDermott (1980). Investigation of student understanding of the concept of velocity in one dimension. *American Journal of Physics*, 48, 1020-1028.
- Trowbridge, D.E., and L.C. McDermott (1981). Investigation of student understanding of the concept of acceleration in one dimension. *American Journal of Physics*, 48, 242-253.
- Touger, Jerold S. (1991). When words fail us. *The Physics Teacher*, 29, 90-95.
- Van Heuvelen, A. (1991a). Learning to think like a physicist: A review of research-based instructional strategies. *American Journal of Physics*, 59, 891-897.
- Van Heuvelen, A. (1991b). Overview, Case Study Physics. *American Journal of Physics*, 59, 898-907.
- Viennot, L. (1979). Spontaneous reasoning in elementary dynamics. *European Journal of Science Education*, 1, 205-221.

---

#### Notes du traducteur

<sup>i</sup>Aux USA la formation des maîtres a lieu à l'université, en France elle se passe dans les IUFM (Instituts Universitaires de Formation des Maîtres).

<sup>ii</sup> En France l'enseignement secondaire comprend deux types d'école : les collèges (4 ans, les élèves y entrent à la sortie de l'école primaire (5 ans)) puis les lycées (3 ans).

<sup>iii</sup> Ici et dans la suite du document, nous avons traduit "introductory physics" ou "introductory physics course" par introduction à la physique ou cours d'introduction à la physique. Il s'agit de cours de physique proposé en début d'université.

<sup>iv</sup> Le site correspondant à ces projets : <http://modeling.la.asu.edu/modeling/R&E/Research.html> est intéressant.

<sup>v</sup> Nous avons traduit "laboratory based" par "basé sur le laboratoire", cela signifie un enseignement tout au long duquel les élèves font des expériences, on pourrait dire des TP-cours.