



# **Évaluation de la maîtrise des concepts de la mécanique chez des étudiants et des professeurs<sup>1</sup>**

## **Evaluation of students' and teachers' mastery of mechanics concepts**

**J. Bernardino LOPES**

Secção de Física  
UTAD Quinta de Prados,  
5000 Vila Real, Portugal.

**Nilza COSTA**

Departamento de Didáctica e Tecnologia Educativa  
U. Aveiro  
3800 Aveiro, Portugal.

**Annick WEIL-BARAIS**

UFR SPSE, Université Paris X-Nanterre  
200, avenue de la République  
92001 Nanterre cedex 1, France.

**Andrée DUMAS-CARRÉ**

Institut Universitaire de Formation des Maîtres  
63, La Canebière  
13232 Marseille cedex 1, France.

## **Résumé**

*Cet article rend compte d'une étude de validité de quatre types d'épreuves composant un test d'évaluation des concepts en mécanique (TECM) : deux épreuves de jugement d'énoncés (dites épreuves déclaratives) avec ou sans contexte, une épreuve de type carte conceptuelle et une épreuve de modélisation. Les réponses fournies par sept groupes de sujets différenciés selon leur niveau de formation en physique (collège, lycée, université) et de pratique (élèves ou professeurs) ont été analysées selon la méthode par "cluster". Les résultats obtenus permettent de déterminer sur quels aspects des concepts les changements cognitifs interviennent et de discuter du choix des épreuves.*

**Mots clés :** *évaluation, mécanique, modélisation, étude transversale, analyse par "cluster".*

## **Abstract**

*This paper presents a study of the validity for four types of questions included in an Evaluation Test for Mechanics Concepts (TECM in French). The four questions are : a declarative question with or without context, a conceptual map question and a question asking the elaboration of a model for a physical situation. We analyse, by the cluster method, the answers given by seven groups differing by their level of training in physics (high school, college, university) and by the degree of practice (students or teachers). The results enable determination of which aspects of concepts are concerned by cognitive changes and discussion of how to choose questions in the context of evaluation.*

**Key words :** *evaluation, mechanics, modelling, transversal study, cluster analysis.*

## **Resumen**

*Este artículo trata de un estudio de validez de cuatro tipos de pruebas conteniendo un test de evaluación de los conceptos en mecánica (TECM) : dos pruebas de juicios de enunciados (es decir, pruebas declarativas) con o sin contexto, una prueba de tipo carta conceptual y una prueba de modelización. Las respuestas dadas por siete grupos de sujetos diferenciados según su nivel de formación en física (Básica, Media y Superior) y de práctica (alumnos y profesores) han sido analizados según el método « cluster ». Los resultados obtenidos permiten determinar cuáles aspectos de los conceptos y cambios cognitivos intervienen y discutir la selección de las pruebas.*

**Palabras claves :** *evaluación, mecánica, modelización, estudio transversal, análisis por cluster.*

## 1. INTRODUCTION

Grâce aux nombreux travaux qui ont été réalisés sur les conceptions et les raisonnements des élèves en mécanique (par exemple : Caldas & Saltiel, 1995 ; Viennot, 1979, 1996 ; Vasconcelos, 1987) ainsi que sur la résolution de problèmes (par exemple : Dumas-Carré et al., 1992 ; Dumas-Carré & Goffard, 1993 ; Goffard & Dumas-Carré, 1993) et les processus de modélisation mettant en œuvre les grandeurs fondamentales de la mécanique (Weil-Barais & Lemeignan, 1990 ; Lemeignan & Weil-Barais, 1993a, 1993b), on dispose maintenant d'un ensemble de données et d'analyses substantiel permettant d'appréhender l'évaluation des connaissances sur des bases nouvelles. Un certain nombre d'auteurs ont en effet mis en avant l'importance de concevoir des outils d'évaluation qui informent sur la structuration des connaissances des élèves ainsi que sur leur capacité à les mobiliser dans des tâches diverses (par exemple : Chauvet, 1996 ; Dumas-Carré, 1987 ; Grégoire, 1996 ; Levain, 1992 ; Saltiel, 1989 ; Wilson, 1994) et pas seulement sur leurs performances.

L'objectif du travail présenté dans cet article est d'étudier la validité d'épreuves d'évaluation conçues à partir d'analyses s'appuyant sur la théorie des champs conceptuels de Vergnaud (1987, 1993, 1994), utilisée par Lemeignan & Weil-Barais (1993a, 1993b) pour rendre compte du développement des compétences des élèves à modéliser, dans le domaine de la mécanique. Il s'agit, d'une part d'apprécier la capacité qu'ont ces épreuves à repérer des sujets de différents niveaux de formation en physique (du collège à l'université), d'autre part de rendre compte des changements cognitifs constatés d'un niveau de maîtrise à un autre.

## 2. CADRE THÉORIQUE ET PROBLÉMATIQUE

L'intérêt majeur du cadre théorique développé par Vergnaud (1987, 1993, 1994) est de prendre en considération, de manière centrale, la nature relationnelle des concepts scientifiques. Les concepts sont définis par les inter-relations qu'ils entretiennent les uns avec les autres. Par ailleurs, la construction des concepts est envisagée selon différents registres : celui des systèmes de représentation intervenant dans la communication et dans leur usage (langage naturel, graphiques, diagrammes, écritures mathématiques, etc.), celui des représentations et des activités mentales (invariants conceptuels, relationnels et opératoires) et celui des situations physiques, l'accent étant mis sur l'articulation et les correspondances entre ces différents registres.

Selon ce cadre théorique, la maîtrise des concepts ne se traduit pas seulement par un bon usage du langage et des systèmes de représentation symbolique, mais aussi par la capacité à les utiliser pour construire des représentations des situations pour des finalités diverses : expliquer ou prévoir un phénomène, contrôler l'évolution d'un dispositif, le fabriquer, le dépanner, etc. C'est donc la capacité à modéliser des situations physiques en vue de répondre à des questions à leur propos qui constitue le critère le plus accompli de la maîtrise des concepts. Ainsi Lemeignan & Weil-Barais (1994) considèrent-ils que la formation des concepts en mécanique relève d'un processus de développement que l'enseignement a pour fonction d'accompagner, en proposant des constructions progressives s'appuyant à la fois sur un enrichissement des invariants définissant les concepts, sur l'adoption de systèmes symboliques de plus en plus élaborés ainsi que sur une extension des classes de problèmes abordables à l'aide des concepts. Ils montrent, pour les différentes grandeurs étudiées [(E) = Énergie, (F) = Force, (P) = Quantité de mouvement], les filiations possibles entre les conceptualisations premières des élèves et les modélisations faisant appel à ces grandeurs ainsi que les ruptures cognitives à opérer. Dans leur perspective qui emprunte à Cassirer (1910), les concepts sont des constructions intellectuelles ayant un statut hypothétique et un statut d'outils cognitifs, au service de l'action et de l'intelligibilité du monde.

Partant des analyses détaillées des grandeurs fondamentales de la mécanique proposées par Lemeignan et al. (1988), Lemeignan & Weil-Barais (1993a, 1993b, 1994), qui explicitent les différents registres de définition des concepts, nous avons conçu un ensemble d'épreuves mobilisant ces registres à des degrés divers. Ces épreuves ont été présentées à différents groupes de sujets différenciés par leur niveau de formation en physique et par leur statut (élèves de l'enseignement obligatoire, étudiants d'université en physique, professeurs de lycée et d'université). Les questions que nous nous posons sont les suivantes. Ces épreuves sont-elles adaptées aux différentes catégories de sujets ? Qu'est-ce qui différencie les différents groupes de sujets du point de vue de la maîtrise des concepts ? Y a-t-il des épreuves plus adaptées que d'autres pour évaluer les connaissances des sujets ?

### **3. MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE**

#### **3.1. Description de l'instrument d'évaluation des connaissances**

Il s'agit de mettre en relation la maîtrise des concepts, évaluée par des

épreuves déclaratives, avec la maîtrise de ces concepts dans une activité de modélisation d'une situation.

Nous avons conçu différents types d'épreuves visant à évaluer, chez les sujets, les invariants (conceptuels, relationnels, opératoires) afférents aux concepts, aux plans déclaratif et fonctionnel, les systèmes symboliques maîtrisés par les sujets ainsi que le champ expérimental qu'ils sont capables d'explorer avec les concepts. Ces différentes épreuves constituent le **TECM** (test d'évaluation des concepts en mécanique). La version du TECM présentée ici résulte d'une première étude au cours de laquelle on a contrôlé l'adéquation des formulations auprès de trois types de sujets : des élèves de lycée ayant eu une année d'enseignement de mécanique, un professeur de lycée et un professeur d'université.

### **3.1.1. Description des épreuves**

Deux types d'épreuve ont été conçues : d'une part des épreuves qui mettent en jeu les définitions des concepts et font donc surtout appel à des connaissances déclaratives, et d'autre part des épreuves impliquant leur utilisation pour rendre compte d'une situation physique, appelant ainsi une activité de modélisation.

#### **a) Au plan déclaratif, trois épreuves ont été conçues**

Deux épreuves proposent des énoncés (figures 2 et 3), le sujet devant choisir ceux qu'il considère comme pertinents pour définir différents concepts (F, P et E). Pour l'épreuve présentée en premier, on n'indique pas de situation physique particulière, alors que pour l'épreuve présentée en troisième position, une situation physique susceptible de mobiliser les trois grandeurs E, F et P est évoquée (figure 1). Dans la suite de l'article, la première épreuve est appelée « déclarative sans contexte » (« nonCUM »), la seconde « déclarative avec contexte » (« CUM »).

Les énoncés proposés (figures 2 et 3) ne correspondent pas aux énoncés définitoires que l'on trouve habituellement dans les livres scolaires et universitaires. Ils sont issus d'une analyse épistémologique des concepts ; du point de vue psychologique, ils ont, pour la plupart, un statut métacognitif<sup>2</sup> et font appel à des concepts très généraux comme « système », « état », « transfert », « conservation ». Si on considère que, dans la compréhension d'énoncés, les connaissances des sujets interviennent, les énoncés composant le test ne peuvent pas être considérés comme identiques du point de vue des significations qu'ils véhiculent pour tous les sujets. C'est à travers le choix des énoncés qu'ils retiennent que sont inférées les significations attribuées aux différents concepts.

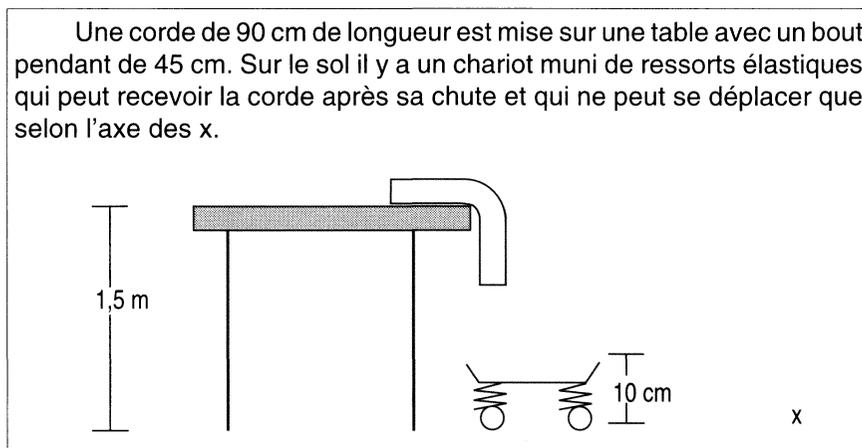


Figure 1 : **Situation «corde»**

Une épreuve demande d'exprimer des relations entre « concepts ». On donne aux sujets 22 étiquettes sur lesquelles sont écrits des mots désignant des grandeurs (force, quantité de mouvement, énergie, masse, vitesse, accélération, travail, puissance) ou des spécifications de grandeurs (énergie potentielle et cinétique, forces conservatives et non conservatives), une relation d'invariance (conservation), des entités (particules, systèmes isolé et non isolé), des relations (variation de, dégradation), des éléments descriptifs de phénomènes (frottement, déplacement, position), une entité mathématique (vecteur). On demande de disposer les étiquettes et de les relier par un trait de façon à exprimer des significations physiques. Cette épreuve s'inspire de la technique des cartes conceptuelles mise au point par Novak (1990). Dans la suite de l'article, cette épreuve sera désignée par « épreuve carte conceptuelle » (« CARTE »).

### **b) Épreuve de modélisation**

Plusieurs épreuves imposant la construction d'une représentation explicite des situations ont été conçues. Il s'agit d'épreuves de modélisation explicite. Les sujets sont interrogés sur des situations physiques particulières présentées sous forme d'énoncés écrits assortis d'un schéma de la situation évoquée. Dans le TECM, ces épreuves sont au nombre de quatre. La formulation des questions est telle qu'elle focalise plus ou moins l'attention du sujet sur la nécessité d'utiliser telle ou telle grandeur physique. Dans cet article, une seule de ces épreuves de modélisation explicite (appelée par la suite « Modélisation ») sera exploitée. Il s'agit de la situation « corde » déjà utilisée dans l'épreuve « CUM » (voir figure 1). La question posée est la suivante : « *Considérez la situation « corde ». Imaginez que vous vouliez connaître la position et la vitesse du point au milieu de la corde*

*pour tout instant dès qu'elle commence à chuter. Ce qu'on vous demande dans cette question ce n'est pas de résoudre mais de représenter ce qui arrive, de telle façon que cela vous permette de répondre à ce problème. Utilisez des dessins, des schémas, des diagrammes, des mots, des expressions mathématiques ou d'autres représentations que vous jugez appropriées. »*

L'intérêt de la situation « corde » réside dans le fait que l'objet « corde » ne remplit pas sa fonction habituelle de transmission et, par conséquent, sa conceptualisation pose problème, de même que la modélisation de l'ensemble de la situation. La corde doit être conceptualisée comme un objet déformable ayant une masse. Selon les instants, il est nécessaire de prendre en compte des systèmes en interaction et des événements différents. Au début de la chute, c'est l'ensemble des interactions entre la table, la corde et la Terre qui est à considérer ; elle peut s'analyser en termes de Force et/ou Énergie et/ou Quantité de Mouvement. Pendant la chute « libre » de la corde, c'est l'interaction corde - Terre qui doit faire l'objet d'une représentation en termes de force et d'énergie. Au moment de la collision entre la corde et le chariot, c'est l'interaction corde - chariot qui est à considérer, analysable en termes d'énergie et de quantité de mouvement. Au moment du déplacement du chariot, c'est l'interaction {corde - chariot} - sol - Terre qui est à prendre en compte en termes de force et/ou énergie et/ou quantité de mouvement. De fait, ce qui se passe pour le chariot est à inférer par le sujet. En effet, si tous les sujets prévoient bien que la corde va tomber sur le chariot et, considérant la hauteur de la table, celle du chariot et la longueur de la ficelle, ils prévoient aussi que la corde ne sera jamais à la fois en interaction avec la table et le chariot ; par contre, ils ont des difficultés à imaginer ce qui se passe pour le chariot après la chute de la corde. Ils doivent donc l'inférer et leur inférence est fonction de la conceptualisation qu'ils font de la corde et de sa chute. Si les sujets n'envisagent pas une composante horizontale de la vitesse de la chute de la corde, ils n'inféreront pas le déplacement horizontal du chariot mais un déplacement vertical et oscillant.

Les caractéristiques des questions extraites du TECM présentées dans cet article sont récapitulées dans le tableau 1.

Épreuves	Situation physique	Format de la question
nonCUM	non évoquée	Associer des énoncés aux grandeurs F, E, P.
CARTE	non évoquée	Construire une carte conceptuelle.
CUM	situation « corde »	Associer des énoncés aux grandeurs F, E, P.
Modélisation	situation « corde »	Représenter l'évolution de la situation physique.

Tableau 1 : **Caractéristiques des épreuves**

### **3.1.2. Comparaison des épreuves par rapport aux dimensions d'analyse**

Nous nous attendons à ce que la diversité des épreuves permette de cerner les différents registres de fonctionnement des concepts mobilisés par les différents groupes de sujets. C'est donc la comparaison des réponses données aux différentes épreuves qui est susceptible de nous informer sur ce thème.

Dans le tableau 2 nous récapitulons les différences *a priori* (à partir d'une analyse experte) existant entre les épreuves prises deux à deux, selon les critères qui suivent.

**Le champ conceptuel** : c'est l'ensemble des concepts mobilisés ainsi que leurs relations. Si on compare l'épreuve « nonCUM » et « CARTE », le champ conceptuel est plus grand dans la seconde épreuve, puisque les sujets disposent de 22 « étiquettes conceptuelles » à relier, ce qui est noté par « + » dans le tableau. Si le champ conceptuel est identique, ce qui est le cas entre « CUM » et « nonCUM », on indique le signe « = ». Si le champ conceptuel est moindre, on indique « - ».

**Les invariants** : nous considérons ici à la fois la diversité des invariants (relationnels, conceptuels et opératoires) et leur nombre (l'analyse *a priori* a été faite item par item ; le tableau ne présente qu'une comparaison globale). Si la comparaison n'est pas possible il n'y a pas de signe.

**La modélisation** : elle est demandée explicitement dans l'épreuve « Modélisation » sous la forme d'une représentation mais elle est également requise pour traiter la situation « CUM », sans toutefois être demandée.

**L'usage de systèmes symboliques** de type diagramme ou de type mathématique : ils peuvent être utilisés dans la réponse à l'épreuve « Modélisation » sans être indispensables.

Le champ expérimental n'est pas spécifié dans le tableau parce que, lorsqu'il est explicité aux sujets, il est constant (« CUM » et « Modélisation »). En ce qui concerne les autres épreuves, nous ne sommes pas en mesure de connaître les situations auxquelles les sujets se réfèrent.

Comparaison entre épreuves	Champ conceptuel	Invariants	Modélisation	Systèmes symboliques
nonCUM → CUM	=	=	+	=
nonCUM → CARTE	+		=	
nonCUM → Modélisation	+	+		+
CUM → CARTE	+	=	-	
CUM → Modélisation	+	+	++	+
CARTE → Modélisation	=		+	

Tableau 2 : Comparaison des épreuves du TECM selon les registres de fonctionnement mobilisés (= identique ; + supérieur ; - moindre ; “sans signe” pas comparable)

### 3.2. Les sujets

Le TECM a été présenté, au cours de l'année scolaire 95 - 96, à 75 sujets appartenant à sept groupes : des élèves de collège et lycée, des étudiants et des professeurs de lycée et d'université du nord du Portugal. La version originale du TECM est écrite en langue portugaise. Les caractéristiques des différents groupes (qualifiés ultérieurement de « naturels » par opposition aux groupes de niveau issus de l'analyse des réponses) sont présentées dans le tableau 3.

Groupes de sujets	G1 élèves Collège	G2 élèves Lycée	G3 élèves Lycée	G4 étudiants 1 <sup>er</sup> cycle universitaire	G5 étudiants licence	G6 prof. de physique et chimie de lycée	G7 prof. de physique de l'université
Âge	14-15	16-17-	17-18				
Scolarité	9 <sup>ème</sup>	11 <sup>ème</sup>	12 <sup>ème</sup>	2 <sup>ème</sup> année université	4 <sup>ème</sup> année université	Formation niveau Licence	DEA ou Doctorat en Physique
Pratique en mécanique de mécanique	1 année d'enseignement de mécanique	2 années d'enseignement de mécanique	3 années d'enseignement en mécanique	2 modules semestriels de la licence	Tous les modules de mécanique au Lycée	Enseignement de mécanique en licence	Enseignement de mécanique
Nombre d'établissements concernés	4	2	2	3	2	4	3
Nombre de sujets	16	9	10	15	11	6	8

Tableau 3 : Caractérisation des sujets

Bien que nous nous soyons attachés à diversifier les établissements d'enseignement, les groupes de sujets ne peuvent pas être considérés comme représentatifs des populations de référence.

### 3.3. Administration du TECM

Les sujets étaient informés qu'il s'agissait d'un travail de recherche sur l'apprentissage de la physique s'appuyant sur des activités de résolution de problèmes, l'anonymat étant garanti. Les élèves ont répondu individuellement en présence de leur professeur (pour les collégiens et les lycéens), en présence d'un professeur non impliqué dans leur formation (pour les étudiants), sans cette présence pour les professeurs.

Aucune limite de temps n'a été imposée pour répondre au TECM. De façon générale, les temps de réponse et leur dispersion ont augmenté avec le niveau de formation des sujets : de 40 minutes en moyenne jusqu'à environ 120 minutes.

Tous les sujets pouvaient consulter des documents (livres scolaires ou cours), à leur convenance. Mais nous avons pu constater que les élèves et les étudiants n'y ont pas eu recours.

## 4. LE TRAITEMENT DES RÉPONSES AU TECM

Les réponses données aux quatre épreuves ont fait l'objet d'une exploitation, épreuve par épreuve, de façon à repérer s'il est possible de définir des catégories hiérarchisées de sujets à partir de l'ensemble des unités de réponses données à chaque épreuve. Sur la base de ce premier ensemble d'analyse, on a procédé à une analyse globale et à des mises en relation entre épreuves pour tenter de valider les analyses *a priori* qui en furent faites.

### 4.1. Épreuves « nonCUM » et « CUM »

L'exploitation des réponses est similaire pour ces deux épreuves. La démarche suivie pour l'analyse est illustrée par l'exploitation des réponses à la question « nonCUM ». Quatorze énoncés présentés dans la figure 2 ont été proposés aux sujets.

- 1 – La force est une propriété des corps : ils l'ont ou ils ne l'ont pas.
- 2 – Elle\* n'existe pas mais elle décrit des interactions entre systèmes.
- 3 – Elle ne s'utilise que quand il y a des chocs.
- 4 – Elle n'agit que quand il y a des variations de vitesse ou des déformations.
- 5 – Si le système est isolé elle se conserve.
- 6 – Elle se conserve, pourtant elle se dégrade quand il y a des transferts.
- 7 – C'est une grandeur qui aide à caractériser l'état d'un système.
- 8 – Elle peut se transformer d'une forme à une autre.
- 9 – Plus on l'utilise moins il y en a.
- 10 – Elle est nécessaire pour qu'un corps ait une vitesse constante.
- 11 – Elle augmente quand la vitesse augmente.
- 12 – Sa conservation sous la forme strictement mécanique est associée à des forces conservatives.
- 13 – Pour l'utiliser correctement il est nécessaire de définir le système physique à considérer.
- 14 – Avec elle on peut prévoir l'accélération qu'un système acquiert.

Figure 2 : **Énoncés de l'épreuve « nonCUM »**

(\*) Dans le questionnaire il est dit explicitement que « elle » désigne une grandeur physique qui peut être E et/ou P et/ou F.

Comme les sujets avaient le choix d'associer à chaque énoncé une ou plusieurs des grandeurs E, F et P, ou de rejeter l'énoncé ou de douter (ce qui fait 10 réponses possibles), on a théoriquement 140 variables dichotomiques (10 x 14) pour rendre compte des réponses émises.

Le tableau 4 explicite le codage effectué pour chaque énoncé. Cet extrait de protocole de données (tableau disjonctif) est relatif à trois sujets (S) et à un seul énoncé.

On note :

F1 : réponse Force à l'énoncé 1 ;

P1 : réponse Quantité de mouvement à l'énoncé 1 ;

E1 : réponse Énergie à l'énoncé 1, et toute combinaison de F, P et E ;

R1 : refus de l'énoncé 1 ;

D1 : doute quant à l'énoncé 1 ;

?1 : non réponse.

Énoncé 1										
	F1	P1	E1	FP1	FE1	PE1	FPE1	R1	D1	?1
S1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
S3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Tableau 4 : **Illustration de la forme de construction des tableaux de données pour les épreuves « nonCUM » et « CUM »**

En ce qui concerne l'épreuve « CUM », les énoncés (présentés dans la figure 3) ont fait l'objet du même codage.

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1 – Elle* aide à caractériser l'état du système à un moment donné.</li> <li>2 – Elle peut être transférée au système chariot.</li> <li>3 – Elle peut être transférée au système chariot et changer de forme.</li> <li>4 – Elle n'aide pas à caractériser l'état du système corde à un moment quelconque.</li> <li>5 – Elle ne peut être utilisée que dans l'espace vectoriel.</li> <li>6 – Elle décrit l'interaction du système corde et d'autres systèmes.</li> <li>7 – En étant transférée, elle ne peut apparaître que sous une forme.</li> <li>8 – En étant transférée, elle peut apparaître sous diverses formes</li> <li>9 – Elle se conserve pour le système corde.</li> <li>10 – Elle se conserve si nous considérons le système corde - table - Terre.</li> <li>11 – Elle se conserve dans l'interaction corde - chariot.</li> <li>12 – Elle ne peut pas être transférée au système chariot ni changer de forme.</li> <li>13 – En étant transférée, elle obéit à des règles de conservation selon chacune des trois dimensions de l'espace vectoriel.</li> </ol> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Figure 3 : **Énoncés de l'épreuve « CUM »**

(\*) Dans le questionnaire il est dit explicitement que « elle » désigne une grandeur physique qui peut être E et/ou P et/ou F.

#### 4.2. Épreuve « CARTE »

Les réponses à cette épreuve ont été analysées selon les critères suivants :

- le nombre d'ensembles isolés de mots<sup>3</sup>,

- le caractère exhaustif ou non de l'utilisation des mots,
- l'adjonction ou la non adjonction de mots aux 22 mots fournis,
- le nombre de liaisons entre mots réalisées indépendamment de leur pertinence,
- le type d'organisation des concepts autour de F (catégorielle ou relationnelle ou complexes de style structure en étoile ou structure en chaîne),
- le type d'organisation des concepts autour de E (idem),
- les liaisons entre les trois grandeurs E, F et P et les autres mots, par exemple avec vecteur, puissance, masse, accélération, vitesse, position, travail, etc.

Les sujets ayant fait peu de regroupement avec P, il n'a pas été utile de caractériser l'organisation autour de cette grandeur.

Au total, 88 variables dichotomiques (présence/absence) ont été nécessaires pour exploiter les réponses à cette épreuve donnant lieu à l'établissement d'un tableau similaire en construction au tableau 4.

### 4.3. Épreuve « Modélisation »

Les réponses à cette épreuve ont été analysées en prenant en compte les aspects suivants :

- le type de représentation de la situation (figuratif, bande dessinée, schématique, ou mathématique) ;
- la complétude générale de la description ;
- les événements modélisés (le début de la chute, la chute de la corde, la collision de la corde avec le chariot, le mouvement du chariot) ;
- l'examen des conditions expérimentales (explicitation ou non des conditions expérimentales : présence de l'air, existence de frottements, caractère déformable ou non de la corde, etc.) ;
- les grandeurs physiques utilisées dans la modélisation (F, E, P) ;
- la conceptualisation des objets (corde et chariot) ; par exemple la corde peut être conçue comme un point de masse constante, ou comme un point de masse variable, ou comme un corps avec des dimensions ;
- la conceptualisation des événements ; par exemple, la chute de la corde peut être conçue comme une chute libre, ou comme une chute à

accélération variable uniquement dans la direction verticale, ou comme une chute à accélération variable selon les composantes verticale et horizontale, ou comme une chute à accélération variable à cause du frottement, etc. ;

– le type d’expression de la modélisation (qualitatif - par exemple si la corde tombe, sa vitesse augmente - ou quantitatif - par exemple  $v = g.t^4$ ) ;

– la cohérence de la modélisation (évaluée par le chercheur d’après l’adéquation entre la description phénoménologique fournie par le sujet et la conceptualisation de la situation – par exemple un sujet qui considère la corde comme un point de masse constante et qui envisage un mouvement dans la direction horizontale produit une modélisation incohérente de la situation) ;

– les invariants opératoires dont on trouve la trace dans les réponses (découpage temporel, choix d’un référentiel, sélection des événements, constitution de systèmes, décomposition des grandeurs vectorielles, etc.) ;

– les invariants conceptuels mobilisés pour chaque grandeur (force, quantité de mouvement, énergie) ;

– le caractère adéquat ou non de l’utilisation des invariants eu égard à la conceptualisation de la situation (par exemple un système peut être considéré comme isolé, ce qui peut être inadapté compte tenu des conditions expérimentales indiquées) ;

– les caractéristiques des différents systèmes symboliques de représentation utilisés ; on a différencié les différents usages du langage naturel - descriptif, dénotatif, explicatif, les types de graphiques – figuratif, schématique –, et d’expressions mathématiques - arithmétiques, algébriques, géométriques, calculs vectoriels, infinitésimal ;

– les raisons de non réponse (ne sait pas, difficile).

Au total, 100 variables dichotomiques ont été nécessaires pour coder les réponses à l’épreuve de modélisation.

#### 4.4. Technique d’analyse

Les tableaux disjonctifs ont été soumis à une classification automatique de type « *tree clustering* » (logiciel “Statistica”). La classification est basée sur les co-occurrences de réponses et des mesures de proximité entre réponses. L’analyse fournit une structure arborescente dont les branches peuvent être des sujets ou des variables. On peut ainsi procéder à une classification des sujets ou des variables selon les besoins.

## 5. ANALYSE DES RÉPONSES PAR ÉPREUVE

### 5.1. Épreuve « NonCUM »

La classification des sujets prenant en compte l'ensemble des variables descriptives des réponses à cette épreuve est indiquée dans la figure 4.

Pour obtenir les catégories de sujets, on a choisi une distance raisonnable dans les graphiques obtenus telle que le nombre de catégories de sujets homogènes ne soit ni trop petit (trop fort regroupement) ni trop grand. Pour cette question, la distance retenue, dans la méthode statistique utilisée est de 0,7. Les sous-catégories retenues correspondent aux premiers embranchements situés à une distance plus faible.

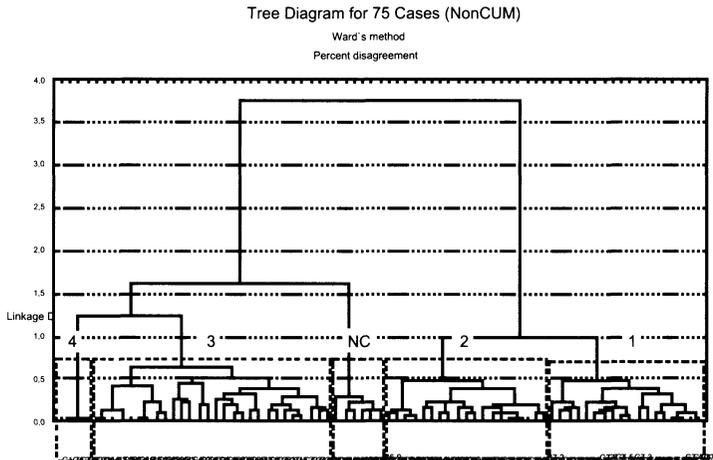


Figure 4 : Classification des sujets d'après l'épreuve « nonCUM »

Pour chacun des regroupements, nous recherchons les caractéristiques générales de l'ensemble des réponses. Par comparaison de ces caractéristiques, et en respectant la structure arborescente des regroupements, nous établissons ainsi une hiérarchie entre quatre catégories de sujets. Nous attribuons arbitrairement le nombre 1 à la catégorie qui correspond à la meilleure maîtrise des concepts<sup>5</sup>. La cinquième catégorie (NC) concerne des sujets qui s'abstiennent de répondre à la majorité des énoncés. La répartition des sept groupes « naturels » dans les catégories ainsi obtenues (voir tableau 5) fait apparaître une grande dispersion des individus, avec une tendance à ce que les élèves faiblement expérimentés en mécanique soient plus nombreux dans les catégories 3 et 4 et les plus expérimentés, dans la catégorie 1. La catégorie 2 n'est pas discriminante.

Groupes \ Catégories	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2	4	NC
G1, Collège					2	9	4	1
G2, Lycée			1		6			2
G3, Lycée			5	1	3			1
G4, Université (premier cycle)	2		3	2	7			1
G5, Université licence	3	4	3	1				
G6, Professeur Lycée	2		2		1			1
G7, Professeur Université	7		1					
Ensemble	14	4	15	4	19	9	4	6

Tableau 5 : Répartition des sujets selon les catégories de réponses pour l'épreuve « nonCUM » (NC = non classable)

Si on examine les réponses qui caractérisent chaque catégorie de sujets (tableau 6), il apparaît que c'est à propos de la force et de l'énergie que les catégories de sujets se différencient le plus ainsi que sur l'extension du champ expérimental appréhendable par les grandeurs.

Catégorie 1	Catégorie 2	Catégorie 3	Catégorie 4
La force n'est pas une propriété des corps.	idem	F est une propriété des corps	idem
Toute grandeur peut être utilisée pour toute situation.	idem	L'utilisation de P est limitée aux situations de chocs	doute
E est la seule grandeur qui peut changer de forme.	idem	idem	doute
E ou P décrivent les systèmes et leurs transformations.	indéfini	indéfini	doute
F n'est pas nécessaire pour qu'un corps ait une vitesse constante.	idem (catégorie 2.1) F est nécessaire... (catégorie 2.2)	P est nécessaire pour qu'un corps ait une vitesse constante	idem
Toute grandeur a besoin, pour être bien utilisée, de la définition du système en étude.	Seulement E (catégorie 2.2)	Seulement F (catégorie 3.2)	Seulement E
La conservation de E sous la forme strictement mécanique est associée à des forces conservatives.	idem	idem	doute
L'utilisation de F permet de prévoir l'accélération d'un système sous certaines conditions.	idem	idem (catégorie 3.1) C'est P qui permet... (catégorie 3.2)	C'est E qui permet...
F associée aussi à des situations sans variation de vitesse ni déformation (seule catégorie 1.1).	Seulement avec variation de vitesse déformation	idem	doute
E et P sont conservées dans un système isolé (seule catégorie 1.1).	Seule E	Idem, mais l'énergie utilisée diminue	E se perd
P augmente quand la vitesse augmente.	idem	idem	F augmente ...

Tableau 6 : Réponses par catégories (épreuve « nonCUM »)

On retrouve l'association force - vitesse comme caractérisant un faible niveau d'expertise, mais pas seulement. Les différences entre catégories, qui peuvent être considérées comme correspondant à des niveaux différents d'appréhension du champ conceptuel, ne s'expriment pas entièrement en termes d'accumulation de propositions valides. Si on compare les groupes de sujets, il semble que la formation contribue à des réorganisations conceptuelles assez locales, différentes selon les sujets. Par exemple, un sujet peut accepter de considérer que l'énergie soit associée à un transfert sans pour autant remettre en cause que la force soit une propriété des objets. Chez les sujets, peuvent coexister des propositions contradictoires, sans qu'ils en aient forcément conscience. Il semble que la formation provoque des modifications locales du concept d'énergie mais n'en provoque pas dans le concept de force. Pour ce dernier concept, les modifications sont globales et apparaissent seulement chez des sujets ayant un niveau élevé de formation. Pour les catégories 3 et 4, il arrive que des propriétés caractéristiques de F soient attribuées à P ou à E.

Dans l'ensemble, la complexité de la structure des données traduit la variabilité des propositions retenues par les sujets, pour la définition des trois grandeurs.

## 5.2. Épreuve « CUM »

La classification des sujets qui prend en compte l'ensemble des variables descriptives des réponses à cette épreuve (selon la même technique que celle utilisée pour l'épreuve « nonCUM ») fait ressortir six catégories hiérarchisées de sujets. Leur répartition dans les groupes naturels est indiquée dans le tableau 7.

Groupes \ Catégories	1	2.1	2.2	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	5	6	NC
G1, Collège				1			4	2	4	1	2
G2, Lycée					1	2	2	1		3	2
G3, Lycée				3		1	3			1	2
G4, Université (premier cycle)	1	2	1	4	2	3		1		2	
G5, Université licence	2	2	2	1	3	1					
G6, Professeur Lycée	1	1	1					1			2
G7, Professeur Université	8										
Ensemble	12	5	4	9	6	7	9	5	4	7	8

Tableau 7 : Répartition des sujets selon les catégories de réponses pour l'épreuve « CUM » (NC = non classable)

Comparativement à l'épreuve « nonCUM », pour laquelle, rappelons-le, aucun contexte expérimental n'était évoqué, les réponses à cette épreuve discriminent mieux les sujets selon leur niveau d'expertise en mécanique, avec quelques nuances. Les groupes homogènes sont uniquement les professeurs d'université (catégorie 1). Les élèves (G1, G2 et G3) se répartissent dans les catégories 3 à 6. Les étudiants de 2<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> année d'université (G4 et G5 respectivement) sont aussi dispersés. Ceux qui sont en 2<sup>ème</sup> année d'université (G4) sont très hétérogènes et appartiennent aussi bien à des catégories représentatives des lycéens (catégories 4, 5 ou 6) que des catégories représentatives des professeurs d'université (catégorie 1). Les catégories 1 et 2 ne comportent que des étudiants et les professeurs (G4 à G7).

Catégorie 1	Catégorie 2	Catégorie 3	Catégorie 4	Catégorie 5	Catégorie 6
Toute grandeur aide à caractériser l'état du système à un moment donné	Seule E ou F	combinaisons de F, P, E	E ou P (4.1) Doute (4.2)	Seule F	Indéfini
P et E peuvent être transférées au système chariot	Idem	P ou F	E (4.1) doute (4.2)	E	F
Il n'y a que E qui puisse changer de forme	Idem	Idem	Idem	Idem	Idem
Seules P et F peuvent être travaillées dans l'espace vectoriel	P (2.1) P et F (2.2)	Refuse (3.1) Doute (3.2) F et/ou P (3.3)	F	F	Indéfin
Il n'y a que F qui décrive l'interaction du système corde avec d'autres systèmes	Idem	Idem	F ou P (4.1) Non réponse. (4.2)	P	E
Ce n'est que E, qui étant transférée, peut apparaître sous diverses formes	Idem (2.1) Doute (2.2)	Idem	F ou P (4.1) Non rép. (4.2)	P	P
Aucune grandeur ne se conserve pour le système corde	Doute	F, P ou E se conserve...	E se conserve...	P se conserve...	F se conserve
E et P se conservent pour le système corde – table – Terre	Idem (2.1) Doute (2.2)	E se conserve	E ou F (4.1) Doute (4.2)	F	Non réponse
Dans l'interaction corde – chariot, E se conserve et change de forme	Idem pour P	Doute Doute (4.2)	F (4.1)	P	Non réponse
Seule la grandeur P, en étant transférée, obéit à des règles de conservation selon chacune des trois dimensions de l'espace vectoriel	Idem	Non reconnu (3.1,3.2) E (3.3)	F	F	Non réponse

Tableau 8 : Réponses par catégories (épreuve « CUM »)

Si on examine les réponses qui caractérisent chaque catégorie de sujets (tableau 8), il semble que la spécification d'une situation et de systèmes conduise les sujets à être moins assurés quant à la conservation

des grandeurs, excepté chez les professeurs d'université pour qui les propriétés des concepts semblent être stables. Pour les sujets de la catégorie 2, il semblerait que les doutes concernant la définition des concepts soient liés à leur incertitude quant à la modélisation de la situation, dans l'hypothèse où ils admettraient une permanence de la définition des concepts. Quant aux sujets des catégories 3 à 6, il semblerait qu'ils n'aient pas la moindre idée de la permanence des concepts et leurs réponses semblent liées à leur représentation personnelle de la situation.

### 5.3. Épreuve « CARTE »

La classification des sujets, à partir des variables descriptives (dichotomiques) des réponses, a fait ressortir six grandes catégories de sujets se différenciant par des organisations des concepts particulières (tableau 9).

Groupes \ Catégories	1.1	1.2	2	3.1	3.2	4	5.1	5.2	6	NC
G1, Collège					1	1	4	4	4	2
G2, Lycée					1	2				6
G3, Lycée		3	1	3		1	1			1
G4, Université (premier cycle)		3	2	3	1	3	2		1	
G5, Université licence	1		1	3	2	3				1
G6, Professeur Lycée		2	2		1		1			
G7, Professeur Université	3	4								1
Ensemble	4	12	6	9	6	10	7	4	5	11

Tableau 9 : Répartition des sujets selon les catégories de réponses pour l'épreuve « CARTE » (NC = non classable)

Dans les catégories de sujets (tableau 10) qui manifestent un bon niveau d'expertise au plan conceptuel (catégories 1 et 2), on trouve, bien entendu, des professeurs d'université mais aussi des lycéens (G3), des étudiants d'université et des professeurs de lycée. Cette épreuve discrimine bien les sujets de faible niveau d'expertise en physique (G1 et G2) et ceux de haut niveau (G7) mais peu les autres.

Indépendamment des liaisons particulières que les différentes catégories de sujets privilégient, les catégories se différencient par le nombre de regroupements de mots effectués<sup>6</sup> : un seul regroupement pour les catégories 1 et 2, deux ou plus pour les autres catégories. Ceci est associé à un nombre plus ou moins grand de liaisons entre concepts. C'est dans les catégories 1 et 2 que ces liaisons sont les plus nombreuses, avec, chez les sujets de la première catégorie, une organisation relationnelle

autour de F et E, chez ceux de la seconde catégorie, une organisation uniquement autour de E, comme dans l'épreuve « nonCUM ». De manière générale, on observe une relation inverse entre le nombre de mots considérés et le nombre de regroupements. Ceci est sans doute lié à une représentation plus ou moins unifiée du champ conceptuel de la mécanique.

De manière générale, le nombre d'ensembles isolés de concepts diminue avec le niveau de formation en physique : les sujets bien formés procèdent à un seul groupement de concepts alors que les sujets les moins formés constituent des ensembles séparés pour chacun des concepts.

Catégorie 1	Catégorie 2	Catégorie 3	Catégorie 4	Catégorie 5	Catégorie 6
Nombre de regroupement de tous les mots : 1	Idem	2 ou plus	idem	idem	3
Utilisation de tous les mots	idem	Presque tous	Il n'utilisent pas beaucoup de mots	Idem	Idem
Ils ajoutent d'autres mots (1.1)	Ils n'ajoutent pas	Idem	Idem	Idem	Idem
Grand nombre de liaisons	Nombre moyen	Petit nombre	Idem	Idem	idem
Organisation autour de F : relationnelle	Catégorielle	Catégorielle ou complexe associative	Indéfini	Catégorielle (5.1) Non utilisation (5.2)	En chaîne
Organisation autour de E : relationnelle	Idem	Non classable (3.1) Relationnelle ou catégorielle (3.2)	Non classable	Catégorielle	En chaîne
Établissement liaison directe entre F, P et/ou E	Non établissement	Idem	Idem	Idem	Idem
Liaisons qui indiquent relation de transfert (F ~ variation de, E, P)	Indéfini	Non liaisons	Idem	Idem	Idem
Liaisons qui indiquent relations de conservation (P et E ~ conservation, système isolé)	(E ~ F conservatives, conservation, système isolée)	(E ~ conservation, système isolé) (3.1) Non liaisons (3.2)	Non Liaisons	Idem	Idem
Existence de liaisons de F avec m et/ou a	Idem	Idem	Idem	Non existence	Idem
Existence de liaisons de P avec m et/ou v	Idem	Idem	Idem	Non existence	Idem
Existence de liaisons de E avec Ec (m, v) et/ou avec Ep (m, position)	Indéfini	Non liaisons	Idem	Idem	Idem

Tableau 10 : Réponses par catégories (épreuve « CARTE »)

## 5.4. Épreuve “Modélisation”

La classification qui prend en compte l'ensemble des variables descriptives des réponses à cette épreuve fait ressortir cinq grandes catégories de sujets qui se répartissent différemment selon les groupes (tableau 11).

Groupes \ Catégories	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2	4.1	4.2	5	NC
G1, Collège							2		14	
G2, Lycée							1		8	
G3, Lycée		2		1	1	3		2	1	
G4, Université (premier cycle)				5	1		2	2	5	
G5, Université licence			1	5			2		3	
G6, Professeur Lycée		1	1	2	2					
G7, Professeur Université	3	2	2							1
Ensemble	3	5	4	13	4	3	7	4	31	1

Tableau 11 : Répartition des sujets selon les catégories de réponses pour l'épreuve « Modélisation » (NC - non classable)

La formation en physique, dans l'épreuve « Modélisation », joue un rôle plus important (tableau 12) que dans les autres épreuves : aucun élève débutant ne se trouve dans les catégories correspondant au plus haut niveau d'expertise, et la catégorie 1 est pratiquement spécifique des professeurs d'université. Beaucoup de sujets ne répondent pas parce qu'ils ne savent pas répondre ou qu'ils considèrent l'épreuve comme trop difficile (catégorie 5). On trouve, dans tous les groupes, des sujets qui traitent la situation : donc l'épreuve est adaptée aux différents niveaux de formation.

Les sujets des groupes G3 à G6 sont dispersés dans plusieurs catégories. Le niveau de formation en physique n'est pas suffisant pour prévoir la capacité à modéliser, mais il détermine cependant la limite supérieure que peuvent atteindre les sujets. La plus forte dispersion s'observe pour le groupe G3 (élèves préparant le baccalauréat) dans lequel quelques sujets ont un niveau d'expertise équivalent à celui des professeurs d'université.

Catégorie 1	Catégorie 2	Catégorie 3	Catégorie 4	Catégorie 5
Ils explicitent les conditions expérimentales	Ils envisagent la situation comme si la conceptualisation était déjà faite	Envisagent différentes éventualités événementielles	D'emblée	Pas réponse : difficile
Conceptualisation de la corde : objet avec dimensions	Un point, sans justification	Idem	Pas de conceptualisation	--
Conceptualisation de la chute : mouvement avec accélération variable	Mouvement avec accélération constante	Idem	Pas de conceptualisation	--
Conceptualisation du choc : le choc s'effectue en plusieurs phases (1.1) ; ne disent rien (1.2)	Pas de conceptualisation	Le choc s'effectue en plusieurs phases (3.1)	Pas de conceptualisation	--
Relations entre variables : relations qualitatives entre variables	Ils écrivent des relations par rapport à position et vitesse en partant de $a = g$	Ils écrivent des relations quantitatives	N'existe pas	--
Type de prévision : ils prévoient de façon qualitative la position et la vitesse...	Ils font aussi des descriptions qualitatives (2.1) Ils font seulement des calculs (2.2)	Pas de prévisions	Idem	--
Invariants afférents aux F, P, E : ils justifient des invariants afférents aux grandeurs par référence aux conditions expérimentales	Ils n'explicitent pas les conditions d'utilisation des invariants	Indéfini	Pas d'utilisation d'invariants	-- --
Cohérence entre les conceptualisations	Idem	Pas de cohérence	Indéfini	--
Considération du système corde : ils considèrent le système corde et des interactions de ce système avec d'autres systèmes mais de manière non exhaustive	Ils n'explicitent pas les interactions du système corde avec d'autres	Idem	Idem	--
Ils font un découpage temporel	Ils ne le font pas	Idem	Idem	--

Tableau 12 : Réponses par catégories (épreuve « Modélisation »)

En résumé, les différents niveaux d'expertise repérés, à partir de l'épreuve de modélisation explicite, se caractérisent par des différences importantes quant à la manière d'aborder la situation physique et par l'usage qui est fait des invariants relationnels. Seuls les sujets de la première catégorie manifestent une véritable démarche de modélisation en spécifiant les conditions expérimentales, en discutant de la meilleure façon de se représenter les différents objets et les interactions. Ceux de la troisième catégorie en présentent les prémices puisqu'ils interrogent la

situation physique, ce que ne font pas les sujets de la seconde catégorie. Pour ceux-ci, tout se passe comme s'il y avait à déterminer la situation en fonction d'une formule connue, ce qui, comme on le sait, est une pratique scolaire fréquente. Ceci se trouve de manière encore plus manifeste chez les sujets de la catégorie 4.

## 6. ANALYSE GLOBALE

Nous avons procédé à une analyse globale à partir d'un tableau de données dans lequel chaque sujet est caractérisé par le niveau atteint à chacune des épreuves, à partir des analyses précédentes. On a procédé également à une analyse en "clusters" faisant ressortir neuf catégories de sujets inégalement répartis selon les niveaux de formation (tableau 13). On remarque qu'il n'y a pas de liaison stricte entre le niveau de formation et les compétences manifestées.

Groupes \ Catégories	1	2	3	4	5	6	7	8	9	NC
G1, Collège					1		3	7	4	1
G2, Lycée					1	1	1	3		3
G3, Lycée			1	3		4				2
G4, Université (premier cycle)		1	2	3	4	1	3	1		
G5, Université licence		1	5	1	1	1	2			
G6, Professeur Lycée		1	3	1						1
G7, Professeur Université	5	2	1							
Ensemble	5	5	12	8	7	7	9	11	4	7

Tableau 13 : Répartition des catégories de sujets selon l'analyse globale relative à l'ensemble des épreuves (NC - non classable)

La différenciation des catégories est imputable, en premier lieu, à l'épreuve de « Modélisation » et, en second lieu, à l'épreuve « CUM ». Les épreuves « NonCUM » et « CARTE » ont un statut équivalent. Elles ne sont pas prédictives de la réussite aux autres épreuves. Très généralement les épreuves « Modélisation » et « CUM » discriminent mieux les sujets selon leur niveau de formation que les épreuves « NonCUM » et « CARTE ». Il convient de noter que l'épreuve « Modélisation » conduit à discriminer les sujets d'un bon niveau de formation alors que l'épreuve « CUM » discrimine les sujets en début de formation. Par conséquent, ces deux types d'épreuves sont nécessaires si l'on veut rendre compte de la transformation des compétences d'un niveau à l'autre.

## 7. CONCLUSIONS ET DISCUSSION

La construction des épreuves d'évaluation des concepts de la mécanique présentées dans cet article s'appuie sur la théorie des champs conceptuels développée par Vergnaud ainsi que sur les analyses des concepts et des activités de modélisation proposées par Lemeignan & Weil-Barais (1993a, 1993b). Ce cadre théorique conduit à envisager l'évaluation des connaissances, en prenant en compte des ensembles structurés de concepts permettant de traiter des ensembles de situations. Pour des raisons de place, nous nous sommes contentés dans cet article de ne présenter qu'une seule situation, mettant plutôt l'accent sur un autre aspect intéressant de la théorie de Vergnaud, à savoir l'articulation entre les trois registres nécessaires à la construction des concepts : celui des situations, celui des systèmes de représentations symboliques et celui des représentations mentales.

Les quatre types d'épreuves mises à l'étude étaient supposés, à des degrés divers, évaluer des connaissances conceptuelles chez des sujets (élèves, étudiants et professeurs de différents niveaux) ainsi que leur évolution. Pour deux de ces épreuves, il s'agissait uniquement de tester la connaissance des propositions définitoires de concepts (épreuve « NonCUM ») ou d'explicitier des liens entre les « étiquettes verbales » des concepts relevant du champ conceptuel de la mécanique (épreuve « CARTE »). Ces deux épreuves évaluent donc l'articulation entre le registre langagier et le registre des représentations mentales afférents aux concepts. Deux autres épreuves font appel à la conceptualisation, soit qu'il s'agisse de choisir des énoncés appropriés pour rendre compte d'une situation physique (épreuve « CUM »), soit qu'il s'agisse de construire un modèle de la même situation de façon à pouvoir en prévoir l'évolution dans le temps (épreuve « Modélisation »).

Plutôt que d'établir un score global, nous avons effectué des analyses fines des réponses, dans la perspective d'identifier les caractéristiques des réponses qui différencient les niveaux d'expertise. Ceux-ci ont été estimés en considérant différents groupes de sujets : des collégiens, des lycéens, des étudiants et des professeurs (en tout sept groupes). En procédant à des analyses en "*cluster*", nous avons pu identifier des catégories d'expertise à l'intérieur de chaque épreuve et pu ensuite construire une typologie des sujets sur l'ensemble des épreuves. Nous avons ainsi mis en évidence que les épreuves ne mesuraient pas la même chose, ce qui conforte notre analyse *a priori* des épreuves. L'épreuve « Modélisation » s'avère être la plus difficile : elle n'est réussie que par une minorité de sujets, la connaissance des invariants définitoires des concepts (évaluée par les épreuves « CARTE » et « NonCUM ») n'étant pas suffisante pour assurer la réussite

à cette épreuve. L'épreuve de modélisation qui nécessite une articulation entre les différents registres évoqués permet donc d'apprécier le plus haut niveau de maîtrise des concepts. Il apparaît ainsi que l'évaluation des connaissances nécessite des épreuves diversifiées prenant en compte la complexité des concepts et de leur usage.

De manière assez évidente, il existe une liaison entre le niveau de formation des sujets et la maîtrise des concepts, quelles que soient les épreuves. Toutefois, on observe des différences inter-individuelles importantes qui ne sont pas moindres chez les professeurs de lycée que chez les élèves débutants en physique. Si cela peut sembler normal pour les élèves, ce l'est moins pour les professeurs de physique. Pour beaucoup d'entre eux, comme pour les étudiants d'université ou les lycéens, la modélisation pose problème, alors qu'ils sont plutôt à l'aise dans les épreuves qui évaluent un savoir déclaratif (la connaissance de définitions). Ceci peut tenir au fait qu'ils ont coutume de travailler sur un ensemble restreint de situations qu'ils savent d'emblée représenter, perdant ainsi de vue un des aspects essentiels de la démarche scientifique : la conceptualisation des situations qui ne se réduit pas à un choix de relations entre grandeurs descriptives. La plus grande expertise des professeurs d'université se manifeste essentiellement par le soin qu'ils accordent à l'examen de la situation, au découpage des événements en phases, aux questions qu'ils se posent quant à la meilleure manière d'idéaliser les objets, démarches beaucoup plus rares chez les sujets des autres groupes ayant pourtant une formation avancée en physique.

Puisqu'il s'agit d'une étude transversale, il serait bien entendu illégitime de considérer nos résultats comme rendant compte d'une évolution. Cependant, ils confortent l'idée de la complexité de la transformation des connaissances. Cette complexité est d'autant mieux mise en évidence que nous avons utilisé des épreuves diversifiées. Si nous n'avions proposé que des épreuves de type « résolution de problèmes » comme l'est l'épreuve « Modélisation », nous aurions un tableau assez sombre de la situation car peu de sujets proposent une solution adéquate. Par contre, si l'on examine les invariants conceptuels et relationnels qui sont maîtrisés ainsi que les réseaux conceptuels que les sujets sont capables de produire, on trouve une gradation de niveaux assez complexe entre le collège et l'université. Les points de rupture entre les catégories, qui ont été repérés, correspondent à des changements touchant aux différents registres évoqués : meilleure connaissance et structuration du champ conceptuel, changement de point de vue sur la situation physique et mobilisation d'invariants opératoires. Selon les grandeurs considérées (force, énergie, quantité de mouvement), ces changements interviennent à des moments différents de la formation et de manière plus ou moins globale. C'est pour la grandeur force qu'ils sont

les plus tardifs puisqu'ils nécessitent des changements de points de vue importants.

Les résultats obtenus sont à considérer en relation avec les enseignements dont les sujets ont bénéficié. Le fait que les élèves et étudiants privilégient une approche quantitative au détriment d'une approche qualitative (Dillon, 1994) de la situation physique évoquée dans l'épreuve « Modélisation » est sans doute à mettre en rapport avec le fait que l'entraînement à l'usage des formules prend une grande place dans l'enseignement habituel au lycée. Dans ce type d'épreuve, le fait de s'engager d'emblée dans une démarche quantitative, sans examen des conditions expérimentales, constitue sans aucun doute un obstacle à la réussite.

La méthodologie d'analyse employée n'a de sens que dans une démarche de recherche où il s'agit de valider des épreuves et de caractériser différents niveaux de maîtrise des concepts. Le caractère non représentatif des échantillons de sujets considérés n'a sans doute pas d'incidence sur la détermination des différents niveaux que nous avons pu repérer. Par contre, s'il s'agissait d'une évaluation ayant une visée de généralisation, il serait important de constituer des échantillons représentatifs. Bien entendu, le codage des réponses devrait être allégé, en prenant en compte les aspects qui se sont avérés discriminants des différentes catégories de sujets.

En ce qui concerne les pratiques d'évaluation dans l'enseignement de la physique, le travail présenté met en évidence l'importance d'une diversification des épreuves et surtout la nécessité d'utiliser des situations requérant une modélisation des situations physiques. L'épreuve inspirée de la technique des cartes conceptuelles, parfois utilisée comme unique moyen d'évaluation (Wilson, 1994), s'avère insuffisante pour rendre compte de la maîtrise des concepts. Si dans certaines recherches, on a pu établir que ce type d'épreuve était prédictive de la réussite aux problèmes (par exemple, la recherche d'Okebukola, 1992, en biologie), c'est que, de fait, les problèmes utilisés impliquent, à un degré moindre que dans notre étude, une activité de modélisation. Au vu des résultats obtenus, les épreuves qui apportent les informations les plus intéressantes dans une perspective d'évaluation sont les épreuves « CUM » et « Modélisation » puisqu'elles permettent à elles seules de discriminer l'ensemble des sujets des différents groupes que nous avons considérés.

Les conclusions d'ordre pédagogique qui se dégagent de ce travail concernent, d'une part, les caractéristiques des épreuves d'évaluation des connaissances ainsi que les modalités d'analyse des réponses. À côté de la diversification des épreuves, il s'avère nécessaire de conduire des

analyses descriptives susceptibles de mettre en évidence les progrès des élèves. Par ailleurs, ce travail met en relief des différences importantes concernant l'apprentissage des différents concepts : c'est pour la grandeur force que les obstacles sont les plus importants. Il faudrait en tenir compte aux différents niveaux d'enseignement. On peut également interroger les modalités de l'enseignement de la physique qui conduisent à ce que des élèves sachant assez bien définir des concepts ne soient pas en mesure de les utiliser pour traiter des situations physiques. L'étude ayant été conduite au Portugal, il pourrait être intéressant de la reprendre dans d'autres pays ayant des modalités d'enseignement différentes (en explicitant bien les différences) pour étudier dans quelle mesure celles-ci affectent la maîtrise des concepts. On pourrait ainsi apprécier ce qui relève de contraintes d'ordre cognitif et de caractéristiques de l'enseignement.

## NOTES

1. Cet article a pu être réalisé grâce à une bourse de doctorat accordée à J. Bernardino Lopes par la « Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica », Portugal.

2. Par exemple l'énoncé « c'est une grandeur qui aide à caractériser l'état d'un système » (cf. fig.2) n'est pas présenté habituellement comme définitoire de P et/ou E.

3. De fait, c'est à partir de la carte conceptuelle établie entre les mots que nous pouvons inférer si les mots sont effectivement utilisés pour exprimer certains aspects des concepts.

4. Une expression quantitative peut être fautive par rapport aux conditions expérimentales d'une situation physique comme dans l'exemple cité.

5. Cette méthode d'obtention des catégories de sujets a été utilisée pour toutes les épreuves.

6. Le centre de ces groupements peut être F, P, E ou une combinaison de deux de ces grandeurs ou une seule grandeur.

## BIBLIOGRAPHIE

CALDAS E. & SALTIEL E. (1995). Le frottement cinétique. Analyse des raisonnements des étudiants. *Didaskalia*, n° 6, pp. 55-71.

CASSIRERE. (1910). *Substance et fonction - éléments pour une théorie du concept* (traduction de P. Caussat, 1977). Paris, Les Éditions de Minuit.

CHAUVET F. (1996). Un instrument pour évaluer un état conceptuel : exemple du concept de couleur. *Didaskalia*, n° 8, pp. 61-79.

- DILLON C. (1994). Qualitative reasoning about physical systems-an overview. *Studies in Science Education*, vol. 23, pp. 39-57.
- DUMAS-CARRÉ A. (1987). *La résolution de problèmes au lycée ; le procédural : apprentissage et évaluation*, Thèse d'État, Université Paris 7.
- DUMAS-CARRÉ A., GOFFARD M. & GIL-PEREZ D. (1992). Difficultés des élèves liées aux différentes activités cognitives de résolution de problèmes. *Aster*, n° 14, pp. 53-75.
- DUMAS-CARRÉ A. & GOFFARD M. (1993). Des activités de résolution de problèmes pour l'apprentissage. *Les sciences de l'éducation*, vol. 4-5, pp. 9-32.
- GOFFARD M. & DUMAS-CARRÉ A. (1993). Le problème de physique et sa pédagogie. *Aster*, n° 16, pp. 9-28.
- GRÉGOIRE J. (1996). *Évaluer les apprentissages - Les apports de la psychologie cognitive*. Paris - Bruxelles, De Boeck.
- LEMEIGNAN G., WEIL-BARAIS A., GOFFARD M. & CHAVY F. (1988). Enseignement et apprentissage d'un concept par les élèves : la quantité de mouvement en classe de seconde. *Bulletin de L'Union des Physiciens*, n° 716, pp. 1013-1030.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1993a). Gestion d'activités de modélisation en classe. *Aster*, n° 7, pp. 121-141.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1993b). *Construire des concepts en Physique*. Paris, Hachette.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1994). A developmental approach to cognitive change in mechanics. *International Journal of Science Education*, vol. 16, n° 1, pp. 99-120.
- LEVAIN J.-P. (1992). La résolution de problèmes multiplicatifs à la fin du cycle primaire. *Educational Studies in Mathematics*, n° 23, pp. 139-161.
- NOVAK J.-D. (1990). Concept mapping : a usefull tool for science education. *Journal of Research in Science Teaching*, n° 27, pp. 937-949.
- OKEBUKOLA P.-A. (1992). Can good concept mappers be good problem solvers in science ? *Educational Psychology*, vol. 12, n° 2, pp.113-129.
- SALTIEL E. (1989). Les exercices qualitatifs fonctionnels. In *Actes du colloque sur les finalités des enseignements scientifiques*. Marseille, CCSTI Provence Méditerranée et groupe de recherche en didactique de la physique, pp. 113-121.
- VASCONCELOS N. (1987) *Motion and Forces : a view of student's in relation to physics teaching.*, PhD Thesis, University of London.
- VERGNAUD G. (1987). Les fonctions de l'action et de la symbolisation dans la formation des connaissances chez l'enfant. In J. Piaget, P. Mounoud & J.-P. Bronckart (Éds), *Encyclopédie de la Pléiade Psychologie*. Paris, Gallimard, pp. 821-844.
- VERGNAUD G. (1993). Signifiants et signifiés dans une approche psychologique de la représentation. *Les sciences de l'éducation*, vol. 1-3, pp. 9-16.
- VERGNAUD G. (1994). Homéomorphismes réel-représentation et signifié-signifiant. Exemples en Mathématique. *Disdaskalia*, n° 5, pp. 25-34.
- VIENNOT L. (1979). Spontaneous learning in elementary dynamics. *European Journal of Science Education*, vol. 1, n° 2, pp. 205-221.
- VIENNOT L. (1996). *Raisonnement en physique : la part du sens commun*. Paris - Bruxelles, De Boeck.
- WEIL-BARAIS A. & LEMEIGNAN G. (1990). Apprentissage de concepts en mécanique et modélisation de situations expérimentales. *European Journal of Psychology of Education*, vol. 5, n° 4, pp. 391-415.
- WILSON J.-M. (1994). Network representations of knowledge about chemical equilibrium : variations with achievement. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 31, n° 10, pp. 1133-1147.