

Université de Montréal

**La cohérence conceptuelle d'étudiants collégiaux en mécanique
newtonienne et en métrologie**

par

Martin Périard

Département de didactique

Faculté des sciences de l'éducation

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Ph. D.
en didactique

© Martin Périard, 2009

Université de Montréal

Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée :
La cohérence conceptuelle d'étudiants collégiaux en mécanique newtonienne
et en métrologie

présentée par :
Martin Périard

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Jesús Vazquez-Abad
président-rapporteur

Marcel Thouin
directeur de recherche

Martin Riopel
membre du jury

Frédéric Fournier
examineur externe

François Bowen
représentant du doyen de la FES

Thèse acceptée le : 2 décembre 2009

RÉSUMÉ

Cette thèse porte sur l'évaluation de la cohérence du réseau conceptuel démontré par des étudiants de niveau collégial inscrits en sciences de la nature. L'évaluation de cette cohérence s'est basée sur l'analyse des tableaux de Burt issus des réponses à des questionnaires à choix multiples, sur l'étude détaillée des indices de discrimination spécifique qui seront décrits plus en détail dans le corps de l'ouvrage et sur l'analyse de séquences vidéos d'étudiants effectuant une expérimentation en contexte réel. Au terme de ce projet, quatre grands axes de recherche ont été explorés. 1) Quelle est la cohérence conceptuelle démontrée en physique newtonienne ? 2) Est-ce que la maîtrise du calcul d'incertitude est corrélée au développement de la pensée logique ou à la maîtrise des mathématiques ? 3) Quelle est la cohérence conceptuelle démontrée dans la quantification de l'incertitude expérimentale ? 4) Quelles sont les procédures concrètement mises en place par des étudiants pour quantifier l'incertitude expérimentale dans un contexte de laboratoire semi-dirigé ? Les principales conclusions qui ressortent pour chacun des axes peuvent se formuler ainsi. 1) Les conceptions erronées les plus répandues ne sont pas solidement ancrées dans un réseau conceptuel rigide. Par exemple, un étudiant réussissant une question sur la troisième loi de Newton (sujet le moins bien réussi du *Force Concept Inventory*) montre une probabilité à peine supérieure de réussir une autre question sur ce même sujet que les autres participants. De nombreux couples de questions révèlent un indice de discrimination spécifique négatif indiquant une faible cohérence conceptuelle en pré-test et une cohérence conceptuelle légèrement améliorée en post-test. 2) Si une petite proportion des étudiants ont montré des carences marquées pour les questions reliées au contrôle des variables et à celles traitant de la relation entre la forme graphique de données expérimentales et un modèle mathématique, la majorité des étudiants peuvent être considérés comme maîtrisant adéquatement ces deux sujets. Toutefois, presque tous les étudiants démontrent une absence de maîtrise des principes sous-jacents à la quantification de l'incertitude expérimentale et de la propagation des incertitudes (ci-après appelé métrologie). Aucune corrélation statistiquement significative n'a été observée entre ces trois

domaines, laissant entendre qu'il s'agit d'habiletés cognitives largement indépendantes. Le tableau de Burt a pu mettre en lumière une plus grande cohérence conceptuelle entre les questions de contrôle des variables que n'aurait pu le laisser supposer la matrice des coefficients de corrélation de Pearson. En métrologie, des questions équivalentes n'ont pas fait ressortir une cohérence conceptuelle clairement démontrée. 3) L'analyse d'un questionnaire entièrement dédié à la métrologie laisse entrevoir des conceptions erronées issues des apprentissages effectués dans les cours antérieurs (obstacles didactiques), des conceptions erronées basées sur des modèles intuitifs et une absence de compréhension globale des concepts métrologiques bien que certains concepts paraissent en voie d'acquisition. 4) Lorsque les étudiants sont laissés à eux-mêmes, les mêmes difficultés identifiées par l'analyse du questionnaire du point 3) reviennent ce qui corrobore les résultats obtenus. Cependant, nous avons pu observer d'autres comportements liés à la mesure en laboratoire qui n'auraient pas pu être évalués par le questionnaire à choix multiples. Des entretiens d'explicitations tenus immédiatement après chaque séance ont permis aux participants de détailler certains aspects de leur méthodologie métrologique, notamment, l'emploi de procédures de répétitions de mesures expérimentales, leurs stratégies pour quantifier l'incertitude et les raisons sous-tendant l'estimation numérique des incertitudes de lecture. L'emploi des algorithmes de propagation des incertitudes a été adéquat dans l'ensemble. De nombreuses conceptions erronées en métrologie semblent résister fortement à l'apprentissage. Notons, entre autres, l'assignation de la résolution d'un appareil de mesure à affichage numérique comme valeur de l'incertitude et l'absence de procédures d'empilement pour diminuer l'incertitude. La conception que la précision d'une valeur numérique ne peut être inférieure à la tolérance d'un appareil semble fermement ancrée.

Mots clés : cohérence conceptuelle, incertitude expérimentale, laboratoires, mécanique newtonienne, métrologie, propagation des incertitudes, tableaux de Burt.

ABSTRACT

This thesis evaluates the coherence of the conceptual network demonstrated by college students in life and applied sciences. This evaluation was based on the analysis of Burt tables issuing from multiple choice questionnaires, on the creation and careful examination of a novel tool, the matrix of specific discrimination coefficients, which will be described in the main text, and on the qualitative analysis of actual laboratory work of students doing an experimentation. At the completion of this project, four research axis have been explored. 1) What is the conceptual coherence demonstrated in Newtonian mechanics? 2) Is the mastery of uncertainty quantification related to the development of logical thinking or to mathematical competency? 3) What is the conceptual coherence demonstrated in the quantification of experimental uncertainty? 4) What are the concrete procedures utilized by students to quantify experimental uncertainty in a semi-directed laboratory context? The main conclusions that emerged from each axis of research can be summerized as follow.

1) The most prevalent erroneous conceptions are not solidly set in a rigid conceptual network. For example, a student successful in a question about Newton's third law (the most difficult subject of the *Force Concept Inventory*) is just slightly more likely to succeed in another related question than the other participants. Many pairs of questions displays a negative specific discrimination coefficient demonstrating a weak conceptual coherence in pre-test and a somewhat ameliorated conceptual coherence in post-test. 2) If a small proportion of students has demonstrated marked deficiencies in questions related with control of variable and in those related to the relationship between the graphical display of experimental data and a mathematical model, the majority of students can be considered as adequately mastering those subjects. However, almost every student demonstrated a lack of mastery of concepts underlying the quantification of experimental uncertainty and the propagation of uncertainty (heretofore referred to as metrology). No statistically significant correlation has been observed between the three main topics suggesting that they are largely independent cognitive abilities. Burt table has demonstrated a greater degree of conceptual

coherence between control of variables questions than suggested by Pearson correlation coefficients. Equivalent question in the topic of metrology did not permit to demonstrate a clear conceptual coherence. 3) Analysis of a questionnaire entirely devoted to metrology has shown erroneous conceptions caused by prior learning (didactical obstacles), erroneous conceptions based on intuitive models and a lack of global comprehension of metrological concepts although some appear to be almost acquired. 4) When doing real experiments in semi-directed laboratory, students demonstrated the same difficulty identified in the questionnaire of 3) which could be interpreted as corroborating previously obtained results. However, many unanticipated behaviors related to measurement were observed that could not have been anticipated solely by analyzing answers in the multiple-choice questionnaire. Interviews immediately following each semi-directed laboratory permitted the participants to detail certain aspects of their metrological methodology. Most notably, the use of repeated measurement strategies, their « spontaneous » strategies to quantify uncertainty, and their explanation of numerical estimates of reading uncertainties. Overall, uncertainty propagation algorithms were adequately employed. Many erroneous metrological conceptions seem to resist strongly to be modified by learning. Among others, assignation of the resolution of a digital scale as the uncertainty value and the lack of stacking strategies to diminish uncertainty. The conception that a numerical value cannot be more precise than the tolerance of an instrument seems firmly set.

Key Words : Burt tables, conceptual coherence, experimental uncertainty, laboratories, metrology, Newtonian mechanics, uncertainty propagation.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.	vii
ABSTRACT.	vii
LISTE DES TABLEAUX.	xiv
LISTE DES FIGURES.	xvi
LISTE DES ÉQUATIONS.	xvii
LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS.	xviii
REMERCIEMENTS.	xx
AVANT-PROPOS.	xxi
INTRODUCTION.	1
CHAPITRE 1 - PROBLÉMATIQUE.	5
1.1 Cohérence conceptuelle.	6
1.2 Mécanique newtonienne.	11
1.3 Laboratoires d'enseignement.	16
1.3.1 Rôles des laboratoires selon divers auteurs.	16
1.3.2 Objectifs liés aux laboratoires de science et justification de notre choix restreint d'objectifs.	20
1.3.3 Lacunes dans le corpus des recherches portant sur les laboratoires.	23
CHAPITRE 2 - CADRE THÉORIQUE.	27
2.1 Contrôle des variables.	28
2.1.1 Modèle de Piaget.	28
2.1.2 Revue de la littérature.	33
2.2 Interprétation de graphiques.	36
2.2.1 Revue de la littérature.	38
2.3 Métrologie et incertitudes.	44
2.3.1 Métrologie.	44
2.3.2 Norme ISO.	48
2.3.3 Présentation de la méthode usuelle d'estimation de l'incertitude expérimentale.	50

2.3.4 Revue de la littérature.	51
2.4 Mécanique newtonienne.	60
2.4.1 Compétences attendues.	60
2.4.2 Revue de la littérature.	61
2.5 Cohérence conceptuelle.	66
2.5.1 Définitions opérationnelles.	68
2.5.2 Indice de discrimination spécifique.	72
2.5.3 Indices de discrimination spécifique pondérés.	74
2.5.4 Cohérences conceptuelles attendues.	77
2.5.5 Revue de la littérature.	79
CHAPITRE 3 - QUESTIONS DE RECHERCHE.	84
3.1 Type de recherche et questions principale.	84
3.2 Questions spécifiques.	85
3.2.1 Mécanique newtonienne (article 1).	85
3.2.2 Maturation de la pensée logique, de la pensée mathématique et quantification de l'incertitude expérimentale (article 2).	85
3.2.3 Étude détaillée des compétences en quantification de l'incertitude expérimentale (article 3).	85
3.3 Limites de cette recherche.	86
CHAPITRE 4 - MÉTHODOLOGIE QUANTITATIVE.	88
4.1 Processus itératif de confection des items.	88
4.1.1 Boucle itérative.	88
4.1.2 Études pilotes.	90
4.1.2.1 Jury d'experts.	91
4.1.2.2 Jury de novices.	91
4.2 Aspects docimologiques.	91
4.2.1 Validité de contenu.	92
4.2.2 Validité de forme.	92
4.2.3 Fidélité.	94
4.2.4 Analyse d'items	95
4.2.5 Conception d'un programme d'analyse (classique) d'items.	97
4.3 Clientèle visée et échantillonnage.	99
CHAPITRE 5 - MÉTHODOLOGIE QUALITATIVE.	100
5.1 Objectifs.	103
5.2 Aperçu méthodologique.	104
5.3 Entretiens d'explicitation.	108
5.4 Articulation des méthodes.	108
CHAPITRE 6 - ARTICLE 1.	110
Abstract.	111

Introduction.	112
The Force Concept Inventory.	113
Results.	119
Results explored through BT.	119
Inertia and circular impetus.	122
Parabolic flight.	126
Newton's third law.	129
Results explored through SDI and WDSI matrix.	131
Discussion.	134
Conclusion.	138
CHAPITRE 7 - ARTICLE 2.	140
Abstract.	141
Introduction.	142
Previous exposure to the three topics of the questionnaire.	148
Didactical treatment of uncertainty in the laboratory protocols.	148
Graphical display of a mathematical model.	151
Control of variables.	151
Population under study.	152
Validation studies.	153
Aggregated main results.	154
Conclusion.	167
CHAPITRE 8 - ARTICLE 3.	168
Abstract.	169
Introduction.	170
Previous studies on the quantification of uncertainty.	173
Operational definitions.	175
Methodology.	178
Demographics and description of students participating in this study.	179
Validation procedure.	180
Description of written questionnaire and general results.	181
Description of semi-directed laboratory.	183
Measurement uncertainty.	186
Propagation of uncertainties.	188
Budget uncertainty.	188
General discussion.	189
Measurement uncertainty.	191
Uncertainty propagation.	194
Uncertainty budget.	198
Educational implications.	200
Conclusion.	202
Acknowledgments.	203

CHAPITRE 9 - DISCUSSION GÉNÉRALE.	204
9.1 Mécanique newtonienne.....	204
9.2 Articles 2 et 3.....	208
9.3 Considérations didactiques.....	210
CHAPITRE 10 - CONCLUSIONS.	219
10.1 Retour sur les questions de recherche.	219
10.1.1 Question de recherche principale.	220
10.1.2 Mécanique newtonienne (article 1).....	221
10.1.3 Maturation de la pensée logique, de la pensée mathématique et quantification de l'incertitude expérimentale (article 2).. . . .	221
10.1.4 Étude détaillée des compétences en quantification de l'incertitude expérimentale (article 3).	222
10.2 Limites de cette recherche.	224
10.3 Directions possibles pour des recherches ultérieures.....	225
LISTE GLOBALE DES RÉFÉRENCES.....	229
Annexe 1 - Conventions et définitions.....	240
Annexe 2 - Test of Logical Thinking (TOLT).....	244
Annexe 3 - Cahier des charges de la macro d'analyse d'items.	252
Annexe 4 - Protocole qualitatif, version 1.....	255
Annexe 5 - Protocole qualitatif, version 2.....	257
Annexe 6 - FCI.....	259
Annexe 7 - Questionnaire quantitatif, article 2.	270
Annexe 8 - Questionnaire quantitatif, article 3.	276
Annexe 9 - Codes VBA de la version 74 de la macro d'analyse d'items.	279
Annexe 10 - Modifications aux codes VBA dans la version 75 (calculs des IDSP)...	320
Annexe 11 - Normes ISO pour l'écriture de l'évaluation des incertitudes.	322
Annexe 12 - Présentation usuelle des incertitudes dans un guide de l'étudiant.	325

Annexe 13 - Présentation usuelle de l'utilisation des graphiques dans un guide de l'étudiant.....	330
Annexe 14 - Tableaux complets des indices de discrimination spécifiques et pondérés pour les trois articles.	336

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I - Tableau de contingence pour deux items dichotomiques.	10
Tableau II - Buts poursuivis par les laboratoires selon Lazarowitz et Tamir.. . . .	17
Tableau III - Buts poursuivis par les laboratoires selon Hegarty-Hazel.. . . .	19
Tableau IV - Buts des laboratoires selon Welzel <i>et al.</i>	19
Tableau V - Questions de recherche selon Leach.. . . .	25
Tableau VI - Pensée opératoire concrète.	31
Tableau VII - Pensée opératoire formelle.	32
Tableau VIII - Principales fonctions mathématiques.. . . .	37
Tableau IX - Sujets couverts par le FCI.	62
Tableau X - Taxonomie des conceptions préalables rencontrées dans le FCI.	64
Tableau XI - Exemple des données brutes exprimées sous forme binaire.. . . .	70
Tableau XII - Exemple d'un tableau de Burt.. . . .	71
Tableau XIII - Tableau de contingence pour deux items dichotomiques (rappel).. . . .	74
Tableau XIV Classement des questions du questionnaire du second article.. . . .	77
Tableau XV Classement des questions du questionnaire du troisième article.. . . .	79
Tableau XVI - Modèles observés prétest/post-test.	83
Table XVII - Contingency table for two dichotomous items.. . . .	116
Table XVIII - Contingency table for two items.	117
Table XIX - Contingency table for two items.	118
Table XX - Burt table for questions 24 to 27 of the FCI.	122
Table XXI - Burt table for questions 4, 10, 24 and 27 of the FCI	124
Table XXII - Burt table for questions 4, 10, 16 and 23 of the FCI	129
Table XXIII - Specific discrimination index matrix.. . . .	131
Table XXIV - Weighted specific discrimination index matrix.. . . .	132
Table XXV - Objectives of the questionnaire.	147
Table XXVI - Topics covered in the questionnaire.. . . .	155
Table XXVII - Pearson Correlation Coefficients.. . . .	156
Table XXVIII- Overall and segmented results.. . . .	159
Table XXIX - Uncertainty topics.	177
Table XXX - Results of written questionnaire.. . . .	182
Table XXXI - Correlation coefficient matrix.. . . .	183
Table XXXII - Specific discrimination coefficients matrix.. . . .	190
Tableau XXXIII - Indices de discrimination spécifique pondérés FCI prétest.. . . .	338
Tableau XXXIV - Indices de discrimination spécifique FCI post-test.. . . .	339
Tableau XXXV - Indices de discrimination spécifique pondérés FCI post-test.	340
Tableau XXXVI - Indices de discrimination spécifique - article 2.. . . .	341
Tableau XXXVII - Indices de discrimination spécifique pondérés - article 2.. . . .	342
Tableau XXXVIII - Indices de discrimination spécifiques - article 3.. . . .	343

Tableau XXXIX - Indices de discrimination spécifique pondérés - article 3.. 344

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Questions 4 et 10 du FCI..	14
Figure 2 Exemple de question du TUG - K..	38
Figure 3 Exemple de question du TOGS..	39
Figure 4 Exemple de question traitant du lien entre une fonction et un graphique.	41
Figure 5 Déclencheur de Allie <i>et al.</i>	54
Figure 6 Sonde RT de Allie <i>et al.</i>	56
Figure 7 Test/retest du FCI	66
Figure 8 Questions 5 et 6 du TOLT..	69
Figure 9 Processus itératif de construction de l'instrument de mesure..	89
Figure 10 Bulletin papillon.	93
Figure 11 Questions 24 to 27 of the original version of the FCI.	121
Figure 12 Questions 4 and 10 of the FCI	125
Figure 13 Question 16 and 23 of the FCI (original version).	128
Figure 14 Overall results distribution (absolute frequency vs. results in %)..	157
Figure 15 Results distribution by topics (absolute frequency vs. results..	158
Figure 16 Overall results histogram..	181
Figure 17 Semi-directed laboratory protocol..	184
Figure 18 Similarities between quantitative and qualitative instruments..	185
Figure 19 Question 1 of the Winter2008 version...	196
Figure 20 Cadran d'une montre sans graduation.	213

LISTE DES ÉQUATIONS

Eq. 1	Coefficient de corrélation pour des items dichotomiques.....	10
Eq. 2	Gain normalisé.....	35
Eq. 3	Propagation des incertitudes dans le cas d'un produit ou d'un quotient (ISO)..	49
Eq. 4	Méthode des règles simples (multiplication, division).....	51
Eq. 5	Indice de discrimination spécifique.....	74
Eq. 6	Indice de discrimination spécifique pondéré.....	75
Eq. 7	Facteur de concentration.....	80
Eq. 8	Coefficient de discrimination.....	96
Eq. 9	Specific discrimination Index (SDI).....	116
Eq. 10	Weighted specific discrimination coefficient (WSDI).....	118
Eq. 11	Écart-type.....	240
Eq. 12	Coefficient de facilité.....	240
Eq. 13	Coefficient de discrimination.....	240
Eq. 14	Corrélation bisériale de point par option.....	241
Eq. 15	Corrélation bisériale de point par item.....	241
Eq. 16	Coefficient alpha de l'examen si l'item est enlevé.....	242
Eq. 17	Coefficient KR21.....	242
Eq. 18	Erreur standard de mesure en pourcentage.....	242
Eq. 19	Erreur standard de mesure en valeur absolue.....	243
Eq. 20	Coefficient alpha de Cronbach-Guttman.....	243
Eq. 21	Écart-type estimé sur la moyenne (ISO).....	322
Eq. 22	Propagation des incertitudes (ISO).....	322
Eq. 23	Variance de la moyenne (ISO).....	322
Eq. 24	Covariance (ISO).....	323
Eq. 25	Écart-type estimé sur la moyenne (ISO).....	323
Eq. 26	Règles simples pour relation de puissance (ISO).....	323
Eq. 27	Incertitude absolue globale.....	325
Eq. 28	Méthode des extrêmes.....	327
Eq. 29	Méthode des dérivées partielles.....	327
Eq. 30	Méthode des règles simples (addition, soustraction).....	328
Eq. 31	Méthode des règles simples (multiplication, division).....	328
Eq. 32	Méthode des règles simples (puissance).....	328
Eq. 33	Méthode des règles simples (racine).....	328
Eq. 34	Pente de la droite.....	332
Eq. 35	Équation de la droite.....	332

LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS

AR	Modèle d'Anderson-Rasch
cégep	Collège d'enseignement général et professionnel
CTFR	<i>Classroom Test of Formal Reasoning</i>
disc.	Coefficient de discrimination
fac.	Coefficient de facilité
FCI	<i>Force Concept Inventory</i>
ICS	Classification internationale des normes
IDS	Indice de discrimination spécifique
IDSP	Indice de discrimination spécifique pondéré
ISO	Organisation internationale de normalisation
p-prim	Primitive phénoménologique
MCT	<i>Multiple-choice test</i>
TEIMS	<i>Tendances de l'enquête internationale sur les mathématiques et les sciences</i>
TOGS	<i>Test of Graphing in Science</i>
TOLT	<i>Test of Logical Thinking</i>
TRI	Théorie de la réponse aux items
TUG-K	<i>Test of Understanding of Graphs in Kinematics</i>
SCL	<i>Scientific community laboratory</i>
SDI	<i>Specific Discrimination Index</i>
SI	Système international d'unités
WSDI	<i>Weighted Specific Discrimination Index</i>

À Natalie, Vincent et Thomas

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier les professeurs Pierre Morin, Pierre Charbonneau, Julie Payot, Vincent Stelluti, Christian Gervais, Richard Beauchamp, Alain Ducharme, Luc Macot, Tommaso Donato, Olivier Major, Karine Aeschlimann et René Lafrance du collège de Bois-de-Boulogne ainsi que Jocelyne Legault, Sylviane Durocher et Ronald Ouellette du collège Montmorency pour leurs suggestions et leurs commentaires ou pour m'avoir gracieusement prêté du temps de classe pour que je puisse recueillir des données. De nombreux étudiants et étudiantes ont également contribué à cette thèse par leur participation active notamment : Mélissane Bourque, Stanley David Paul, Daryline Put, Waqas Salam, Susan Wakil, Alexandre Bougie, Simon Joly et Louis-Claude Malouin. Les personnes suivantes ont également contribué à divers titres : Raymond M. Lamothe, Nicole Gaboury, Diane Girard, Guy Chagnon, Stéphane Parent, Jeff Phillips et Vincent Coletta.

Les professeurs David Hestenes, Duane Deardorff, David Abbott, Michael Padilla, Priscilla Laws, Anton Lawson m'ont grandement aidé en me fournissant l'autorisation aimable d'utiliser des questions des instruments qu'ils ont développés.

Ma conjointe Natalie, mes soeurs Marie-Claude et André, ma mère Irène et mon ami Michael se sont risqués à l'exercice ardu de me relire pour dénicher fautes de style, de grammaire et d'orthographe. Leurs recherches furent malheureusement couronnées de succès.

Les cégeps de Bois-de-Boulogne et Montmorency ainsi que l'université de Montréal m'ont accordé leur soutien financier. Merci.

J'aimerais finalement remercier mon directeur de recherche, Marcel Thouin, pour son soutien constant.

AVANT-PROPOS

Comme il arrive fréquemment en recherche, cette thèse ne s'est pas déroulée selon le plan initialement établi. Des découvertes inattendues, des difficultés logistiques et d'autres imprévus ont fait apparaître des avenues insoupçonnées au départ. À la fin du parcours, il en ressort trois grands sujets de recherche qui ont un ancêtre commun mais qui ont tous suivi leur chemin sur les voies parallèles (et parfois perpendiculaires) de l'évolution des idées. Ainsi, s'il est généralement peu à propos dans une thèse de retracer a posteriori la trajectoire intellectuelle des idées jalonnant le produit final, il me semble pertinent de situer le lecteur ou la lectrice pour lui permettre une lecture plus circonstanciée et, je l'espère, plus satisfaisante.

Les circonlocutions précédentes se justifient si on analyse froidement la distance conceptuelle considérable séparant les deux grands pôles de cette recherche: la mécanique newtonienne et la métrologie. Il faudrait plus d'adresse que je n'en possède pour les lier de façon convaincante. En effet, ces deux grands domaines ne partagent pas les mêmes objets, les mêmes procédés et les mêmes méthodes. La métrologie est la « science de la mesure » (comme chacun le sait, mesurer relève aussi de l'art). Elle est, par nature, transdisciplinaire et universelle, bien que chaque discipline finisse par développer des spécialités qui lui sont propres. La mécanique newtonienne concerne la partie de la physique mécanique qui traite des conséquences de l'application de forces extérieures sur un système de particules.

L'intersection de ces deux champs conceptuels se manifeste toutefois de façon naturelle dans mon métier d'enseignant de physique au collégial. Je dois fréquemment enseigner le cours de physique mécanique dans lequel, bien évidemment, on retrouve des laboratoires destinés, entre autres, au développement des compétences métrologiques des étudiants.

Au départ, cette thèse devait vérifier l'hypothèse que les étudiants de niveau collégial manifestant des difficultés à maîtriser le calcul d'incertitude, une composante centrale de la métrologie, ne faisaient que manifester des carences dans le déploiement de la pensée

logique et/ou des lacunes dans la compréhension et l'application des mathématiques impliquées. Pour vérifier cette hypothèse, un instrument de mesure de nature quantitative, un questionnaire à choix multiples, fut conçu et raffiné par des cycles successifs de passation et d'évaluation des résultats ainsi par les commentaires des étudiants. Pour m'assister dans mon évaluation des résultats quantitatifs, je développai une macro d'analyse d'items avec le logiciel Microsoft Excel. Cette macro avait l'avantage d'être gratuite et flexible car s'adaptant parfaitement à mes besoins (en autant que je réussisse la programmation). Bien entendu, je vérifiai, autant que cela est possible les résultats générés en les analysant avec des logiciels commerciaux tels SPSS, mais ceux-ci ne me donnaient pas toutes les analyses qui me paraissaient pertinentes et n'étaient pas toujours d'utilisation aisée.

Une de ces analyses qui me semblèrent propre à faire émerger un tant soi peu la logique sous-tendant les choix de réponses fut de compiler, pour tous les couples de choix de réponses de toutes les questions différentes, quelle était la proportion d'étudiants qui les choisissaient successivement. Ainsi, il me sembla possible de faire émerger une certaine cohérence (ou incohérence) dans les choix. Par exemple, si le choix A de la question 1 fait appel à une conception fautive du calcul d'incertitude (par exemple, l'addition des incertitudes absolues des variables composant une multiplication pour obtenir l'incertitude du résultat final) et que l'option C de la question 13 fasse référence à la même erreur, il serait intéressant de connaître la proportion des étudiants choisissant et 1A et 13C. Ne trouvant pas de logiciel qui me paraissait faire cette comparaison, je programmai une option supplémentaire dans la macro d'analyse d'items. Devant l'intérêt des résultats obtenus après avoir réanalysé les choix bruts des étudiants, je montrai cet outil à plusieurs personnes actives en éducation et toutes m'ont affirmé y voir de grands bénéfices potentiels et n'avoir jamais vu de publications basées sur un tel outil. J'ai appris par la suite que, évidemment, une telle analyse était bien connue et ce depuis longtemps: l'analyse multiple des correspondances, un outil statistique similaire à l'analyse factorielle. L'analyse multiple des correspondances commence par une répartition des diverses options de réponses dans un

« tableau de Burt » qui correspond en tout points à l’outil que j’avais développé. Peut-être en raison de l’opacité du langage mathématique qui enrobe l’analyse des correspondances et peut-être par désir de ne pas être associé à Sir Cyril Burt de triste réputation¹, l’utilisation du tableau des tabulations croisées ou tableau de Burt demeura l’apanage des initiés et ne se répandit pas dans les publications en didactique (et en très peu de domaine, en fait, sauf peut-être en écologie).

Peu importe, il me semblait évident, et je n’étais manifestement pas le seul, que le monde de l’éducation et celui de la recherche en didactique pourraient faire bon usage de ce qui n’est en définitive qu’un outil de plus. Pour m’en assurer, je tirai profit de la banque considérable de réponses que j’avais compilée au fil de mes années professorales en faisant passer le *Force Concept Inventory* (FCI) à mes étudiants en prétest et en post-test. Ce test, qui a été développé aux États-Unis, et qui est stable depuis 1995, a permis la production, au fil des années, d’une base de données constituée des résultats de plusieurs dizaines de milliers d’étudiants et a fait l’objet d’une multitude de publications. Par intérêt personnel, j’avais conçu une traduction française et je l’utilisais pour vérifier « l’efficacité » de mon enseignement.

Fort de ma banque de données personnelle, je m’en servis pour analyser les réponses des étudiants en prétest et en post-test; les résultats rencontrèrent largement mes espérances. S’il était toujours impossible de percevoir un paysage conceptuel cohérent, il devint rapidement évident que de nombreux choix qui pouvaient être interprétés comme des conceptions erronées pouvaient être vus avec un autre éclairage en considérant les choix à des questions connexes. Pour situer la discussion, prenons le cas des faux négatifs, c’est-à-dire des choix qui pourraient, à prime abord, être considérés comme des mauvaises réponses, mais qui

¹Cyril Burt (1883-1971) est connu pour ses études de la transmission héréditaire de l’intelligence. De nombreux spécialistes doutent à présent de la validité de ses données expérimentales accusant Burt d’avoir inventé des collaborateurs et des sujets.

deviennent des réponses cohérentes si on fait l'association avec une réponse précédente. Par exemple, la grande majorité des étudiants répondant, erronément, qu'une fusée laissée à elle-même dans l'espace intersidéral subira un mouvement parabolique, comme si elle était encore soumise au champ gravitationnel de la Terre, indiquaient, à la question suivante, que la vitesse de la fusée allait décroître, devenir nulle puis s'inverser...choix absolument cohérent avec leur réponse précédente qui permet, peut-être, de mettre en lumière une ambiguïté potentielle dans l'énoncé de la question.

La bifurcation précédente de ma thèse s'avéra plus une bouture qui prit une vie indépendante qu'un changement dans la direction de la croissance du tronc principal. Mon sujet de recherche initial se poursuit en parallèle bien que maintenant enrichi d'un outil d'analyse. Si une thèse doit contribuer à faire avancer les connaissances, la diffusion de cet outil sera une contribution utile à la recherche.

Ma formation de scientifique étant garante de mon inclination naturelle vers le domaine des chiffres et du mesurable, je ne m'arrêtai pas en si bon chemin et mis un point final à la macro d'analyse d'items en développant un outil pour lequel je n'ai pas encore trouvé d'équivalent (cela viendra peut-être) et que je nommai « indice de discrimination spécifique » faute de meilleur terme. En analysant les résultats de la passation d'une des versions du questionnaire quantitatif relié à la métrologie, m'apparu une incongruité en comparant les coefficients de corrélation entre deux questions conceptuellement soeurs et l'analyse du tableau de Burt. En effet, si ce dernier montrait que 97 % des étudiants choisissant la bonne réponse à la question x étaient cohérents dans le choix à la question y , le coefficient de corrélation n'était que de l'ordre de 0,75 (ce qui était tout de même le plus élevé du questionnaire). De plus, le tableau de Burt montrait une belle cohérence conceptuelle chez les étudiants choisissant la mauvaise réponse à la question x et la justification proposée à la question y (respectivement 85% et 77% pour les deux choix erronés les plus populaires). Il m'apparut alors la possibilité d'exploiter les résultats bruts différemment: si les questions d'un outil quantitatif à choix de réponses portent sur

quelques sujets précis, il serait possible de faire apparaître une homogénéité conceptuelle en comparant les taux de réussite, question par question, entre les étudiants qui réussissent x et y et ceux des étudiants qui échouent x mais réussissent y . Autrement dit, est-ce que la réussite à une question donnée est un bon indicateur de la réussite à une question subséquente? Puisque ce concept s'apparente aux coefficients classiques de discrimination pour les résultats globaux de test, je propose de l'appeler indice de discrimination spécifique.

Par exemple, supposons un test de français ne portant que sur l'accord des participes passés avec les auxiliaires avoir et être. Un étudiant méprenant la règle et accordant toujours les participes passés avec le sujet, aura systématiquement tort pour les questions se rapportant à l'auxiliaire avoir. L'indice de discrimination spécifique entre toutes les questions sera alors de 100% illustrant ainsi une belle cohérence conceptuelle, erronée dans le cas présent.

Cependant, et je n'en suis pas du tout chagrin, cette thèse n'est pas orientée vers la mesure et l'évaluation, comme en attesteraient les spécialistes du domaine. Les outils précédemment mentionnés vont servir à alimenter un regard didactique sur les deux principaux objets de la présente recherche: la mécanique newtonienne et la métrologie. Les spécialistes de la mesure et de l'évaluation peuvent naviguer avec aisance dans les arcanes des outils les plus modernes assurant un regard avisé sur la validité des caractéristiques psychométriques d'un test et j'éprouve le plus grand respect pour la haute voltige mathématique qui sous-tend les échafaudages théoriques étayant les développements les plus récents. Je ne m'y suis trempé que le bout du petit orteil et j'en suis bien conscient. Les paramètres quantitatifs m'ayant éclairé sur la « qualité » de mes questionnaires à choix de réponses (coefficient de facilité, coefficient de discrimination, coefficient alpha de Cronbach-Guttman et analyse des fréquences) ne pourront que paraître archaïques aux yeux du psychométricien actuel, mais ils demeurent la norme des publications actuelles en sciences de l'éducation et permettent de rester les yeux rivés sur ce qui importe le plus pour un didacticien: l'efficacité du système éducatif à faire apprendre. Ne m'étant jamais trop

éloigné des données brutes, qui représentent, après tout, le produit final des étudiants ayant passé un test, j'espère pouvoir les réinterpréter au travers des outils développés sans que ceux-ci ne deviennent un filtre dénaturant, ou à tout le moins masquant, la richesse de l'espace conceptuel que les étudiants ont eu l'amabilité de nous faire partager. J'espère toutefois que l'avenir me réservera de nombreuses possibilités de parfaire mon éducation en mesure et évaluation.

INTRODUCTION

« Soit cet homme est mort, soit ma montre s'est arrêtée »

Citation attribuée à Groucho Marx

A day at the races

Tout système éducatif est le résultat d'une transposition didactique d'un sous-ensemble des connaissances, des lois et des théories communément partagées par les membres d'une société en les adaptant aux capacités habituelles des étudiants d'un groupe d'âge donné. Pour que cette transposition soit réussie, en sciences à tout le moins, il est impératif de respecter le caractère syncrétique de l'organisation des savoirs qui forme un ensemble cohérent et organisé d'énoncés, de lois et de principes (Thouin, 2004). À cet égard, il serait pertinent de juger de l'efficacité d'un système éducatif à l'aune de sa capacité à faire assimiler les diverses notions enseignées tout autant que sur sa capacité à les relier, dans l'intellect des étudiants, en un réseau conceptuel riche et cohérent. Autrement dit, il apparaît judicieux de situer les apprentissages, au-delà du simple étalage de faits et de notions glanés aux quatre vents des contingences de l'interface entre les apprenants et l'univers académique, en les insérant dans un univers conceptuel riche et cohérent. Les apprentissages réalisés seraient ainsi plus significatifs; chaque petit quantum pouvant trouver sa place dans un édifice intellectuel harmonieux plutôt qu'être un autre caillou jonchant arbitrairement un terrain vague emplit de connaissances académiques éparpillées.

Toutefois, l'élaboration cognitive de l'édifice conceptuel chez les étudiants ne suit pas les mêmes étapes que le déroulement historique ayant mené aux savoirs actuellement codifiés par la communauté scientifique. Les savoirs durement acquis au fil des générations et des confrontations successives entre points de vue opposés d'hommes et de femmes de sciences entrent souvent en contradiction avec les représentations que tout un chacun a développé au cours de son existence en interagissant avec l'univers matériel. Ces confrontations fréquentes entre intuitions et savoirs codifiés peuvent poser obstacle tout autant qu'elles peuvent servir de conditions adjuvantes (Potvin, 2004). Il en ressort inévitablement que

l'appropriation du réseau conceptuel institutionnalisé ne se fait jamais sans heurts et que cette acquisition est nécessairement non linéaire.

Cependant, l'évaluation de cette appropriation, personnelle à chaque étudiant, par une instance extérieure, l'institution d'enseignement dans le cas qui nous intéresse, demeure spéculative. Le réseau conceptuel développé par les étudiants au fil du temps n'étant, pour ainsi dire, jamais formalisé, il demeure souvent implicite même pour la première personne concernée. Les moyens habituellement employés pour le mettre en lumière, questions à choix de réponses et questions à développement, étant considérés comme peu appropriés à cette fin, les chercheurs en didactique procèdent davantage par des entretiens d'explicitation lors desquels quelques étudiants pourront détailler les raisonnements les ayant mené à leur conclusions personnelles. Bien entendu, un tel mode d'évaluation ne peut se transposer à grande échelle et la finesse des informations obtenues se paye au prix d'un manque de représentativité.

La présente thèse se veut l'exploration de moyens pour mettre en lumière la cohérence d'un réseau conceptuel issu d'un apprentissage scolaire et exprimé par le biais des choix sélectionnés en répondant à des questions à choix multiples conventionnelles. Cette exploration se voulant nécessairement conjecturale, elle sera complétée par des outils plus qualitatifs tels des entrevues semi-dirigées et des analyses de comportements en situation réelle de mise en action des connaissances acquises.

Cet examen de la cohérence conceptuelle manifestée par des étudiants sera surtout effectué à l'aide de l'analyse détaillée des tableaux de Burt, une compilation des tabulations croisées entre les diverses combinaisons de choix de réponses, et par le développement des matrices des coefficients de discrimination spécifique et des coefficients de discrimination spécifique pondérés qui viendront établir une évaluation numérique de la probabilité de réussir un item étant donné la réussite à un autre. Trois grands domaines conceptuels seront ainsi évalués: la physique newtonienne, l'interaction supposée entre l'acquisition de compétences

centrales à la bonne conduite d'un laboratoire scientifiques [contrôle des variables-représentation graphique de fonctions-quantification de l'incertitude expérimentale] et la quantification de l'incertitude expérimentale en elle-même mais étudiée de manière plus approfondie.

La clientèle visée est constituée d'étudiants inscrits au cégep en sciences de la nature, tant en sciences de la santé qu'en sciences pures et appliquées.

La présente thèse étant une thèse par article et comportant trois grands pans conceptuels disjoints, sa structure sera nécessairement peu conventionnelle. Le premier chapitre exposera la problématique générale entourant l'acceptation du terme laboratoire, leur place présumée dans l'enseignement et leur statut selon les didacticiens.

Le second chapitre posera les assises du cadre théorique entourant chacun des thèmes retenus. Nous y poserons les diverses problématiques entourant l'acquisition des concepts de la physique newtonienne, ceux reliés à la métrologie puis nous compléterons avec une exploration des aléas de la mise en lumière de la cohérence conceptuelle.

Suivra, au troisième chapitre, les définitions opérationnelles de nos questions de recherche. Le quatrième chapitre sera consacré aux aspects méthodologiques qui vont baliser le dispositif quantitatif et le cinquième chapitre sera consacré au dispositif qualitatif mis en place pour répondre aux questions de recherche.

Les chapitres 6, 7 et 8 présenteront les articles proprement dits dans l'ordre chronologique de leur écriture. Pour s'homogénéiser davantage avec l'ensemble du texte, les figures et les tableaux y apparaissant poursuivent la numérotation précédemment définie et les références ont été regroupées dans une section spécifique à la fin du corps de l'ouvrage.

Puisque certains choix sont nécessaires pour limiter la longueur des articles, une discussion, qui sera l'objet du pénultième chapitre, permettra d'approfondir quelques aspects peu

élaborés dans le cadre des articles et présentera une articulation entre les résultats obtenus. Suivra une conclusion synthétisant les principaux résultats recueillis et présentant des avenues de recherche potentiellement productives.

Pour que le lecteur puisse être mieux à même de porter un jugement sur la pertinence des résultats ou des méthodes employées, une série d'annexes viendra présenter les principaux outils ayant servi à construire les instruments quantitatif et qualitatif et, dans la mesure du possible et selon la pertinence, leurs diverses versions. Puisqu'une bonne partie des analyses quantitatives s'est effectuée à l'aide d'une macro programmée avec le logiciel Excel, l'ensemble du code est présenté en annexe pour qu'un lecteur avisé puisse éventuellement s'en inspirer ou le réviser en profondeur.

CHAPITRE 1 - PROBLÉMATIQUE

*« Chacun a raison de son propre point de vue,
mais il n'est pas impossible que tout le monde ait tort. »*

Mahatma Gandhi
Lettres à l'Ashram

La problématique centrale de cette présente thèse est d'identifier et de valider des outils quantitatifs qui permettent d'évaluer la cohérence conceptuelle démontrée par la compatibilité de la séquence des choix de réponses propre à chaque individu répondant à un questionnaire à correction objective. Toutefois, la recension de cette cohérence hypothétiquement mise en lumière n'est pas une fin en soi; elle servira de point de départ à une analyse didactique qui tentera d'établir, autant que faire ce peu, des relations causales entre les difficultés conceptuelles observées et la structure curriculaire prétendument garante des apprentissages.

Deux grands champs conceptuels accapareront notre attention : la mécanique newtonienne et la métrologie en laboratoire. Le premier sujet sera abordé brièvement dans le cadre de ce chapitre car sa validité consensuelle n'est plus à établir. Nous nous contenterons de situer le lecteur face aux outils disponibles pour évaluer le degré d'acquisition des principaux concepts et au niveau de maîtrise attendu. Le second aspect, la métrologie en laboratoire, sera élaboré davantage étant donné son caractère moins universel. Bien que cela puisse surprendre, l'utilisation des laboratoires en enseignement des sciences fluctue largement tant au point de vue de leur fréquence que des concepts qui y sont abordés. Si la plupart des programmes scolaires exigent l'utilisation de laboratoire d'enseignement dès le secondaire, il n'est pas rare de rencontrer des étudiants arrivant au collégial sans avoir fait la moindre expérience concrète. De plus, et ne regardant que l'utilisation des laboratoires dans les cours de physique au niveau collégial québécois, on ne peut que constater une très grande disparité entre les exigences, ne serait-ce qu'au niveau de l'utilisation du calcul d'incertitude qui peut, selon l'institution d'enseignement, voire même le professeur, être

traité avec la plus grande rigueur ou être tout simplement mis à l'écart. Cependant, les laboratoires varient beaucoup également du point de vue de la liberté accordée aux étudiants pour définir leur propres protocoles ou quant à l'utilisation des outils informatiques. Vu cette variété, nous présenterons, dans le cadre de ce présent chapitre, le rôle des laboratoires tel que postulé par différents chercheurs en didactique des sciences et justifierons notre liste restreinte de concepts sur lesquels nous centrerons notre étude. Mais puisque le thème récurrent de cette thèse est la cohérence conceptuelle, nous présenterons tout d'abord la problématique touchant son évaluation. Nous présenterons par la suite, les principales problématiques concernant l'acquisition par les étudiants collégiaux des concepts et des définitions de la mécanique newtonienne.

1.1 Cohérence conceptuelle

Le domaine de la cohérence conceptuelle, vaste s'il en est un, a été initialement traité par la philosophie. En philosophie, la conceptualisation du monde des choses et des êtres est abordé par l'ontologie. Notre perception de l'univers nous amène à des classifications idiosyncratiques selon nos croyances en la nature fondamentale des phénomènes et des objets que nous y percevons. Les catégories ontologiques dans lesquelles se classent les objets et les êtres varient donc selon les conceptualisations de l'univers propres à chaque personne. Par exemple, la chaleur pourra être considérée comme un objet physique s'écoulant d'un corps à un autre, ou bien encore elle pourrait être considérée comme un agent de changement, les deux catégories ayant des attributs distincts. Un autre exemple serait la nature du vide. La question de savoir si une bouteille vide flotte davantage qu'une bouteille emplie d'air n'aurait aucun sens pour les gens considérant que le vide EST de l'air. L'air est ce que l'on remplit. Une question non résolue encore est de déterminer si les ontologies professées sont dynamiques ou statiques. Si elles sont dynamiques, elles sont dépendantes du contexte et une question de recherche pertinente serait de déterminer à quels contextes les diverses ontologies sont associées (Gupta, 2008). Par exemple, la troisième loi de Newton pourrait exister, dans l'intuition privée d'un sujet donné, en deux versions: la première s'appliquant aux objets animés et la seconde aux objets inanimés.

En didactique, la catégorisation des diverses croyances personnelles préalables à l'enseignement ainsi que leur relation et leur hiérarchisation en un réseau conceptuel hypothétique a été, et demeure, un domaine fertile de recherche. Cet ensemble de croyances personnelles, fréquemment appelées conceptions préalables ou conceptions naïves dans le cas où elle s'avèrent fausses, sont souvent résistantes à l'apprentissage académique. Cette résistance tire, hypothétiquement, son origine dans le refus implicite de remettre en question un ensemble de « connaissances » et de règles qui semblent régir notre interaction avec notre environnement physique et social. En physique, il ressort fréquemment la croyance que les objets, livrés à eux mêmes, tendent toujours vers le repos. Un sujet pourrait ainsi avoir de la difficulté à se convaincre de la validité de la première loi de Newton (« tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui, et ne le contraigne à changer d'état. ») s'il professe la croyance que les objets s'arrêtent spontanément sans aide extérieure. Toutefois, cette croyance est fréquemment latente et non formulée explicitement. Il est donc tout-à-fait possible qu'un étudiant l'exprime dans un contexte lié à la vie de tous les jours sur la planète Terre mais n'ait aucune difficulté à admettre un mouvement ininterrompu dans l'espace intersidéral. Comme nous l'avons mentionné, il est toutefois possible que la distinction présumée entre environnement terrestre et environnement intersidéral soit plutôt liée à la conception de la nature du vide. Il est aussi possible que cette croyance spontanée en la tendance aux objets à s'arrêter ne s'applique pas dans toutes les circonstances terrestres, par exemple les ballons gonflés à l'hélium en serait exemptés.

Présenté comme dans le précédent paragraphe, le réseau conceptuel des sujets serait sinon parfaitement cohérent, du moins parfaitement stable. Un sujet cohérent répondant à une sonde quantitative traitant de la première loi de Newton donnerait des réponses équivalentes à toutes les questions traitant de ballons d'hélium ou de rondelles glissant sur une patinoire en relation avec leur croyance personnelle en la première loi de Newton.

Cependant, la nature des conceptions préalables manifestées par un sujet est encore aujourd'hui controversée. Sont-elles le reflet de croyances personnelles ancrées dans le quotidien et imbriquées en un réseau plus ou moins cohérent ou ne sont-elles pas plutôt produites « sur le champ » à partir de quelques postulats intuitifs lorsque le sujet est sollicité pour fournir une explication à un phénomène ? Si la dernière hypothèse est valide, ces postulats seraient nécessairement moins nombreux que les conceptions préalables potentielles et pourraient servir de point de départ à un apprentissage réussi si le problème ne concerne pas leur existence mais plutôt leur sollicitation appropriée dans un contexte donné. La nature de cette épistémologie personnelle a donc une importance dans la construction de situations didactiques propices à faire apprendre (Elby et Hammer, 2003).

Traditionnellement, les recherches en didactique ont tenté de mettre en lumière ces conceptions préalables par des entrevues, par l'analyse de productions écrites produites par des étudiants résolvant des problèmes écrits, par l'analyse de séquences vidéos d'étudiants résolvant des problèmes écrits ou concrets et par la passation de questionnaires ouverts ou à correction objective. Toutefois, l'analyse agglomérée des réponses à un questionnaire à choix de réponses permet mal l'inférence de la cohérence conceptuelle individuelle. Par exemple, deux questions traitant de la première loi de Newton pourraient montrer une « déficience » dans le réseau conceptuel des répondants si leur taux de réussite est très différent alors que le niveau de difficulté est postulé équivalent. Toutefois si les taux de réussite sont comparables, la cohérence ne pourra qu'être postulée car il demeure possible que des étudiants différents aient réussi les questions. Les autres méthodes de recherche s'avèrent alors plus appropriées car elles permettent aux participants de faire part des raisonnements guidant leurs choix. Ces méthodes plus qualitatives souffrent toutefois de la lourdeur des analyses qui génèrent une abondance de données ce qui limite la représentativité des informations recueillies vu le nombre nécessairement restreints de sujets.

Pour remédier à ces difficultés, des questionnaires à choix multiples à deux paliers ont été conçus. Leur particularité se trouve dans l'association systématique entre chaque question traitant d'un construit quelconque et une question subsidiaire la suivant directement proposant un choix de justifications. Un exemple d'un tel questionnaire est présenté à l'annexe 2. Il s'agit du *Test of Logical Thinking* de Tobin et Capie (1981). Ce questionnaire a pour but de vérifier le degré d'acquisition de la pensée formelle. Pour qu'une question soit considérée réussie, il faut que la réponse à la question et la justification sélectionnée soient justes.

Toutefois, si cette méthodologie pallie à une des principales limitations de l'utilisation de questionnaire à choix multiples - la sélection d'un choix pour des raisons totalement différentes de celles présumées par les concepteurs du test - elle demeure confinée à la dichotomie réussite - échec. Une deuxième limitation provient de la nécessaire sélection de raisonnements en fonction du nombre limité de choix disponibles (cinq, typiquement). Un répondant peut alors très bien choisir un distracteur non en fonction de son adhésion personnelle et sans ambage mais, plutôt soit par proximité sémantique avec ses conceptions personnelles.

Une deuxième catégorie de familles de solutions au problème de l'évaluation de la cohérence du réseau conceptuel par le biais de questionnaires à choix multiples consiste à développer des méthodes d'analyses numériques des réponses les liant les unes aux autres. La plus commune de ces solutions est le coefficient de corrélation de Pearson (et ses autres synonymes en analyse d'items dichotomiques: coefficient bi-sériel de point et coefficient de corrélation ϕ) qui permet de lier la réussite à un item soit à la réussite globale à l'examen (coefficient bi-sériel de point) soit à la réussite à un autre item. Dans ce dernier cas, et seulement pour deux items à correction binaire, le tableau de contingences des fréquences de réussite permet aisément de calculer le coefficient de corrélation de Pearson (tableau I).

Tableau I - Tableau de contingence pour deux items dichotomiques

		Item y	
		raté	réussi
Item x	raté	a	b
	réussi	c	d

a = nombre des répondants ayant raté les items x et y .

b = nombre des répondants ayant raté l'item x et réussi l'item y .

c = nombre des répondants ayant réussi l'item x et raté l'item y .

d = nombre des répondants ayant réussi les items x et y .

Le coefficient de corrélation de Pearson est alors donnée par:

$$r = \frac{ad - bc}{\sqrt{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)}}$$

(Eq. 1 Coefficient de corrélation pour des items dichotomiques)

Toutefois, lorsque les répondants sont massivement en accord, des résultats surprenants peuvent être obtenus. Par exemple, si sur 500 répondants, tous réussissent à la fois les items x et y ($a = b = c = 0, d = 500$) le coefficient de corrélation devient non défini (0/0). Ainsi une cohérence conceptuelle parfaite (en autant que les deux items soient liés au même concept) ne pourrait pas être détectée.

Si l'unanimité n'est pas atteinte, des taux de réussite élevés génèrent encore des coefficients dont la valeur numérique peut sembler problématique. Par exemple, si la quasi unanimité des répondants a réussi à la fois les items x et y sauf un répondant qui les a raté tous les deux ($a = 1, b = c = 0, d = 499$), le coefficient de corrélation devient égal à l'unité ($r = 1$). Sauf que si l'on change les réponses de deux répondants ($a = 0, b = c = 1, d = 498$), le coefficient de corrélation change considérablement ($r = -0,002$).

Supposons maintenant que tous les répondants réussissent x mais que seulement la moitié réussissent y ($a = b = 0, c = d = 250$). La cohérence conceptuelle pourrait ainsi être postulée imparfaite. Toutefois, le coefficient de corrélation demeure également indéfini ($0/0$)

L'interprétation des coefficients de corrélation doit donc être sujette à caution. D'autres outils statistiques seront présentés dans le cadre théorique mais, pour l'instant, il est clair que le principal outil statistique habituellement employé pour analyser les réponses à un questionnaire à correction objective ne permet pas de mettre en lumière la cohérence conceptuelle manifestée par les répondants. Bien entendu, une telle démonstration de la cohérence démontrée ne pourrait pas être considérée comme un reflet fidèle des théories personnelles, mais l'établissement d'une cartographie des associations récurrentes serait une contribution utile aux chercheurs en didactique qui pourraient ainsi disposer d'un outil d'analyse de l'efficacité d'un dispositif d'enseignement ou d'illustration des conceptions résistantes aux apprentissages.

1.2 Mécanique newtonienne

Si la classification des composantes perçues de l'univers matériel en catégories ontologiques distinctes s'avère idiosyncratique, dans le sous-domaine restreint de la physique newtonienne les épistémologies personnelles semblent présenter des récurrences prototypiques. Nous en avons donné un exemple avec la conception erronée fréquemment énoncée de la tendance naturelle des corps à s'arrêter - en violation avec la première loi de Newton. Bien entendu, il est difficile de donner tort à ceux professant une telle opinion en raison de son grand degré de réalisme dans notre environnement quotidien. On pourrait également, tel Poincaré dans *La science et l'hypothèse*, rappeler que la première loi de Newton, ou principe d'inertie, ne représente pas une loi de la nature mais un postulat qui, par conséquent, ne pourra jamais être pris en défaut (Poincaré, 1943).

L'enseignement de la physique newtonienne souffre ainsi de cette interaction constante entre les savoirs enseignés, souvent comme des dogmes, et les théories personnelles qui émergent spontanément, et souvent implicitement, en réaction à nos expériences

quotidiennes perçues par nos organes sensoriels de sensibilité limitée et réinterprété par nos capacités cognitives. Comme le rapporte Thomas Gilovich « *it's not what you don't know that messes you up, it's what you know that isn't so* » (Gilovich, 1991). La psychologie cognitive a ainsi étudié de nombreux exemples de perceptions erronées comme la croyance en séries de paniers au basketball, de nombreux joueurs et entraîneurs croyant que la probabilité de réussir un panier est plus élevée si le lancer précédent a été couronné de succès. La psychologie béhavioriste attribue ces comportements superstitieux au renforcement opérationnel d'un comportement étant donné le succès ayant récompensé son émission. La psychologie cognitive y voit plutôt une asymétrie dans notre processus de traitement de l'information. Un événement passe à la mémoire à long terme plus aisément s'il est accompagné par une charge émotionnelle forte. De multiples événements bénins passent ainsi inaperçus mais un événement désagréable, ou agréable, demeure gravé en mémoire pour une durée beaucoup plus longue faussant ainsi notre mémorisation.

Naturellement, la mécanique newtonienne ne fait pas exception, à plus forte raison que tous les humains vivent dans un environnement physique contraignant et omniprésent. On pourrait donc s'attendre à ce que cette similitude des contraintes physiques vécues par tous génère des théorisations personnelles assez proches les unes des autres. Andrea diSessa postule ainsi qu'il existe un petit nombre de primitives phénoménologiques (p-prims) qui représentent des quanta cognitifs indépendants et activés selon le contexte. Une de ces p-prims serait « *plus proche = plus fort* » (diSessa, 1993). Des personnes interrogées sur la rue et auxquelles on demande d'expliquer pourquoi il fait plus froid l'hiver que l'été, répondent fréquemment que la raison se trouve dans l'éloignement plus grand entre la Terre et le Soleil durant la saison froide (dans l'hémisphère Nord, la Terre est plus près du Soleil l'hiver). Il est toutefois possible que les gens ne s'étaient jamais posé la question auparavant et ont inventé une explication plausible sur le champ en se basant sur ce qui leur semble raisonnable.

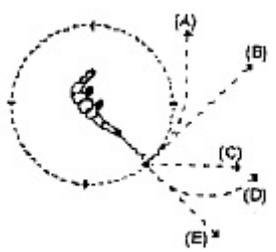
Toutefois, les assises théoriques sur lesquelles reposent les p-prims ne sont pas partagées par tous les chercheurs en didactique des sciences. Certains leur reprochent leur caractère trop général; puisqu'elles ne sont jamais directement évoquées par le sujet mais plutôt inférées par le chercheur, elles ne pourront jamais être montrées fausses. Certains leur prêtent plutôt un statut identique aux conceptions préalables erronées. Elby et. al (2003) répliquent à cela que les p-prims diffèrent des conceptions préalables car elles ne sont ni vraies ni fausses, seule leur activation dans une situation inappropriée est problématique.

Toutefois, et ce principalement dans les recherches en didactique de la physique, le paradigme dominant en recherche demeurent celui des conceptions préalables. Ces conceptions préalables sont postulées constituer un réseau cohérent, ou à tout le moins stable, de croyances faisant partie du bagage intellectuel d'un étudiant (Vosniadou, 1994). Il a été maintes fois démontré, par des entrevues entre autres moyens, que les réponses données à, par exemple, une question sur la troisième loi de Newton, tombent généralement en quelques catégories. Ainsi, une population de plusieurs milliers d'étudiants semble partager une poignée de conceptions préalables récurrentes. Ces conceptions préalables ressemblant fréquemment à la physique postulée par Aristote ou à la physique du Moyen-Âge (physique de Buridan), il est naturel d'émettre l'hypothèse que les connaissances intuitives des étudiants se sont développées par une évolution parallèle ou ont été acquises par « contamination » culturelle. En tout état de cause, on peut présumer que le réseau conceptuel est cohérent.

Cette recension d'un nombre restreint de conceptions préalables a permis la création de questionnaire à choix de réponses dont les distracteurs (choix de réponses erronés mais plausible) sont issus des opinions émises par des étudiants lors d'entrevues. Puisque l'adhésion à l'une ou l'autre conception est assez largement répandue, l'analyse des réponses fournies à ce type de questionnaire peut permettre un diagnostic sur la nature de la connaissance qu'une population donnée a de la physique newtonienne. Un exemple d'un tel test est le *Force Concept Inventory* (FCI) (Hestenes, Wells et Swackhammer, 1992).

Dans sa version initiale, le FCI comporte 29 questions traitant des trois lois de Newton et de la cinématique. Pour vérifier la cohérence conceptuelle démontrée par les étudiants, le même concept est abordé par plusieurs questions. Par exemple, les questions 4 et 10 traitent de la continuation d'un mouvement circulaire lorsque l'on cesse d'appliquer une force centripète tel que l'illustre la figure 1.

4. Une balle massive est attachée à une corde et tourne en rond dans un plan horizontal tel qu'illustré sur la figure. Au point illustré sur la figure, la corde se brise au niveau de la balle. Si on observait ces événements depuis un point d'observation situé directement au-dessus, indiquez la trajectoire de la balle après que la corde se soit brisée.



10. La figure accompagnant ce problème représente un canal semi-circulaire fermement ancré à une **table horizontale**. Une balle pénètre dans le canal au point 1 et ressort au point 2. Quelle trajectoire représente le plus fidèlement la direction de la balle après qu'elle soit sortie et qu'elle roule sur la table.

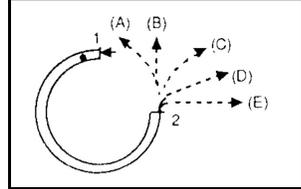


Figure 1 Questions 4 et 10 du FCI.

On pourrait supposer que les étudiants sélectionnant le distracteur A de la question 4 (4A) ont une croyance intuitive en la doctrine moyenâgeuse de l'impetus circulaire et il serait logique de supposer que les mêmes étudiants qui choisissent 4A sélectionnent également 10A. Une même cohérence conceptuelle devrait aussi mener à la sélection concomitante de 4B - 10B ou 4E - 10E. Malheureusement, les études publiées ne comportent que des résultats agglomérés qui dissipent la cohérence interne des choix. Bien entendu, un taux de réussite différent et/ou des fréquences de réponses variables pour chaque distracteur indiquent clairement que des étudiants différents ont choisi des ensembles de distracteurs

donnés, donnant déjà une indication précieuse que la conception naïve n'est pas émise de manière cohérente. Par exemple, dans l'article original de Hestenes, Wells et Swackhammer, pour un groupe donné d'étudiants, les proportions d'entre eux choisissant 4A et 10A sont respectivement de 27 % et 38 %. Cependant, même si les taux de réussite et la fréquence de sélection de chaque distracteur eurent été identiques, il eut été impossible de savoir si ce sont les mêmes étudiants qui ont sélectionné les différents choix.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, il existe des outils statistiques qui permettent des inférences sur la cohérence conceptuelle démontrée mais ces inférences demeurent spéculatives et sujettes aux caprices des indéterminations mathématiques. Outre le coefficient de corrélation de Pearson, on peut souligner l'analyse des facteurs qui tente de grouper les items selon leur proximité corrélative et l'analyse des correspondances. Toutefois, ces méthodes sont complexes, d'interprétation peu aisée et n'apportent aucunement une identification fine et sans équivoque de la variabilité conceptuelle démontrée par la séquence des choix de réponses.

L'intérêt didactique d'une telle identification va au-delà de la physique newtonienne et pourrait servir à l'analyse de tout questionnaire à choix de réponses, en autant que les questions partagent une proximité conceptuelle. Dans la présente thèse, si l'identification du réseau conceptuel relié à la physique newtonienne sera établi, du moins les groupements conceptuels marqués ou les incohérences prononcées, à partir d'un instrument de mesure validé (le FCI), nous désirons nous intéresser aux laboratoires dans l'enseignement des sciences et à leur efficacité à faire acquérir un réseau conceptuel cohérent par rapport à trois sujets précis : le contrôle des variables, la représentation graphique d'un modèle mathématique et la quantification de l'incertitude expérimentale. Vu l'importance didactique des laboratoires et la controverse entourant leur rôle ou leur efficacité, nous allons justifier le choix restreints d'objectifs que nous allons cibler.

1.3 Laboratoires d'enseignement

Les laboratoires occupent une place privilégiée dans l'enseignement des sciences en général et de la physique en particulier. Idéalement, selon la didactique des sciences, ils sont le lieu de rencontre entre les conceptions des apprenants et la «réalité» expérimentale. Du point de vue cognitif, les laboratoires devraient donc jouer un rôle important dans la structuration du réseau de concepts des apprenants, car ils constituent une arène idéale pour générer des conflits cognitifs aptes à faire évoluer les conceptions initiales. Mais leur rôle ne s'arrête pas à ce seul aspect.

1.3.1 Rôles des laboratoires selon divers auteurs

Les laboratoires (selon la terminologie nord-américaine) ou les travaux pratiques (selon la terminologie européenne) ont un rôle très variable dans la formation scientifique primaire et secondaire selon les divers systèmes éducatifs. Par exemple, les jeunes Grecs arrivent à l'université sans avoir fait la moindre expérience (Psillos et Niedderer, 2002) alors que les Québécois devraient connaître les bases du calcul d'incertitude et la manipulation des chiffres significatifs à la fin du secondaire. Il est alors difficile de parvenir à discerner le rôle exact des laboratoires dans l'apprentissage des sciences en général. Résumons donc simplement l'opinion des principaux chercheurs du domaine, sur le rôle que les laboratoires devraient (ou pourraient) jouer.

Selon une synthèse très fouillée et largement citée, celle de Lazarowitz et Tamir (1994), les rôles des laboratoires peuvent se décrire ainsi:

Tableau II - Buts poursuivis par les laboratoires selon Lazarowitz et Tamir.

- | | |
|----|--|
| 1. | Fournir des expériences concrètes et une opportunité de faire évoluer les conceptions préalables erronées des étudiants. |
| 2. | Manipuler des données à l'aide d'outils informatiques. |
| 3. | Développer des habiletés intellectuelles de raisonnements logiques et d'organisation, par exemple par la triade science-technologie-société (STS). |
| 4. | Construire et communiquer des valeurs propres à la nature de la science. |

Selon Lazarowitz et Tamir, les laboratoires sont des lieux (ou un moment) où les étudiants peuvent constater directement l'adéquation de leurs conceptions préalables en manipulant des objets concrets dans un but particulier (e.g. «*c'est bizarre que l'accélération vers le bas du plan incliné soit la même pour toutes les masses!*»). Ainsi, les laboratoires peuvent servir à identifier les réseaux conceptuels alternatifs (*alternative frameworks*) de deux façons. Premièrement, en observant, écoutant et questionnant les étudiants en situation d'action et deuxièmement en conduisant, a posteriori, des entrevues structurées basées sur leurs observations et leur choix de manipulations.

Sur le deuxième rôle (manipuler des données à l'aide d'outils informatiques), il semble, à priori, évident que l'avènement massif de la micro-informatique dans les laboratoires a eu des effets didactiques indéniables que l'on peut résumer de la manière suivante. 1) Cela procure des occasions de percevoir la globalité d'un processus expérimental plutôt que des portions discontinues en raison de la rapidité avec laquelle les données peuvent être cumulées. 2) La représentation graphique instantanée des données est l'occasion de tracer des parallèles avec les notions théoriques. 3) Le même phénomène peut être analysé de différentes manières (e.g. la vitesse en fonction de la position plutôt que le sempiternel vitesse en fonction du temps). 4) La mesure simultanée à l'aide de différents capteurs augmente les capacités d'observations (mesurer le pH, la température et la concentration en oxygène sur une période de 24 heures). 5) Le rôle des étudiants s'approche de celui des

chercheurs véritables. 6) La motivation des étudiants peut être accrue lorsqu'un laboratoire s'éloigne de la norme.

L'absence d'habiletés psychomotrices constitue cependant un aspect contestable, comme nous le verrons bientôt, de ce choix pointu de limiter la prise de données à la micro-informatique.

En relation avec le troisième rôle, si, a priori, les liens STS se tissent aisément dans un cours de science on voit moins bien comment ils s'imbriquent dans un laboratoire et encore moins en quoi ces liens viennent bonifier les habiletés intellectuelles de raisonnement. Pourtant, un regard plus attentif montre qu'au-delà des concepts, les étudiants doivent aussi former leur système de valeurs et leur esprit de décision. Les laboratoires de sciences sont une occasion privilégiée de manipuler du matériel concret qui donne un sens à leur apprentissage (recyclage de l'aluminium, fabrication de robots, de lentilles, etc.) tout en leur fournissant l'opportunité de défendre un point de vue avec des arguments logiques et empiriques. On a qu'à penser à la popularité des expos-science pour s'en convaincre.

Le dernier rôle contient un élément controversé, soit la définition de la «nature de la science», qui est encore objet d'un vif débat (voir Alters, 1997 et la réplique de Eflin, Glennan et Reisch, 1999, pour un exemple). Il existe néanmoins un consensus: lors de la réalisation d'un laboratoire, les étudiants peuvent vivre une expérience ressemblant au mode (ou à un mode) de fonctionnement de la science. Un des objets de la controverse évoquée en début de paragraphe est de savoir si la démarche expérimentale proposée dans les laboratoires est un reflet fidèle du déroulement d'un «vrai» laboratoire dans un milieu de recherche. Par exemple, le prix Nobel Peter Medawar a écrit un article intitulé: «Est-ce que l'article scientifique est une fraude ?» (Medawar, 1963). Le modèle OHERIC (Observations - Hypothèses - Expérimentation - Résultats - Inférences - Conclusion) traditionnellement présenté aux étudiants comme étant LA méthode scientifique s'écarte bien souvent du véritable processus ayant mené à une découverte.

Les buts préalablement exposés ne sont pas universellement partagés. À titre de comparaison, voici, selon Elizabeth Hegarty-Hazel (1990, p.15), les buts que les laboratoires devraient viser:

Tableau III - Buts poursuivis par les laboratoires selon Hegarty-Hazel.

1.	Enseigner les habiletés psychomotrices (manipulation d'appareils) et améliorer la compréhension des appareils de la part des étudiants.
2.	Induire la compréhension d'une investigation scientifique et l'expérimenter concrètement.
3.	Se pratiquer à concevoir et mettre à exécution des expériences qui génèrent des données à analyser et à interpréter.
4.	Développer des attitudes utiles dans un laboratoire de science: créativité et débrouillardise.
5.	Introduire une nouvelle discipline, tenir compte des différences individuelles, fournir des expériences d'apprentissage concrètes.
6.	Placer les étudiants en situation de succès et de contrôle face à la science (motivation).

On peut remarquer la quasi-absence complète de buts cognitifs. Les laboratoires semblent ici isolés et poursuivant des buts parallèles à ceux de la partie magistrale du cours. Il faut aussi souligner l'absence d'habiletés de communication des résultats.

Lors du «European Labwork in Science Education project », Welzel *et al.* (1998) ont identifié les buts suivants comme étant ceux poursuivis par les professeurs de science en Europe.

Tableau IV - Buts des laboratoires selon Welzel *et al.*

1.	Lier la théorie à la pratique.
2.	Apprendre des habiletés expérientielles (sic).
3.	Apprendre les méthodes d'un raisonnement scientifique.

Comme cette énumération de buts divergents l'illustre sans ambage, il n'existe pas de consensus sur les rôles des laboratoires dans l'enseignement. On peut toutefois remarquer que les quelques niveaux de lecture mentionnés dans l'introduction s'y retrouvent (faire apprendre, développer les habiletés psychomotrices, expérimenter un mode de fonctionnement propre aux disciplines scientifiques, susciter des passions propres à augmenter la motivation des étudiants). Comme mentionné précédemment, d'autres lectures sont également possibles (développement de la créativité et de la débrouillardise, par exemple) (Kirschner et Meester, 1988).

Pour mieux cibler notre instrument de mesure, il convient d'établir des objectifs opératoires plus concrets et circonscrits. Bien entendu, une liste complète et universellement acceptée des objectifs liés aux laboratoires n'existe pas, cependant deux chercheurs hollandais se sont attelés à cette tâche de recension.

1.3.2 Objectifs liés aux laboratoires de science et justification de notre choix restreint d'objectifs

L'université libre de Hollande (Open Universiteit Nederland) est une institution offrant des cours à distance dans plusieurs disciplines dont des disciplines scientifiques (sciences de l'environnement, nutrition et toxicologie). La portion laboratoire des cours de science représente donc un défi puisque l'environnement éducatif est décentralisé et doit le rester, la présence physique des étudiants sur les différents campus devant être minimale. Afin de concevoir une structure didactique appropriée à de telles contraintes, les chercheurs Paul Kirschner et M.A.M. Meester (1988) ont fait une revue de la littérature pour en dégager quels étaient les objectifs que devraient viser les laboratoires dans un cours de science. Leur catalogue collige plus de 120 objectifs ! Selon leur taxonomie, les objectifs peuvent se classer en deux grandes catégories: I) développement d'attitudes positives face à la science; II) comprendre la méthode scientifique (sic).

La première rubrique de classification, le développement d'attitudes positives face à la science, regroupe les habiletés générales considérées utiles dans toutes les disciplines

scientifiques. Voici une liste partielle des objectifs publiés dans l'étude. Pour des raisons qui seront explicitées après l'énumération suivante, les objectifs récurrents et liés à cette présente thèse sont mis en relief par l'utilisation de caractères gras.²

1. Formuler des problèmes.
2. Faire une revue de la littérature.
3. Prendre des décisions.
4. **Appliquer des raisonnements logiques rigoureux.** (cv)
5. **Interpréter la fiabilité et la validité de résultats dans un contexte global.** (inc.)
6. **Formuler des modèles et des généralisations.** (mg)

La seconde rubrique, comprendre la méthode scientifique, est subdivisée en objectifs généraux et en huit sous objectifs centrés sur les étudiants. En voici une liste partielle (mise en gras personnelle):

Objectifs généraux

7. **Relier la théorie à l'expérience en cours.** (mg)
8. Vérifier les faits et les lois.
9. Vivre les défis intellectuels de la méthode expérimentale.
10. Démontrer de l'intérêt à propos de la matière à l'étude ou de la science en général.
11. Expérimenter les joies et les peines de l'expérimentation.

Objectifs liés aux étudiants

12. Formuler des hypothèses.
13. Formuler des hypothèses fondées sur des théories.
14. Traduire une définition conceptuelle en un ensemble de procédures expérimentales.
15. Résoudre des problèmes.
16. **Dériver et évaluer des relations.** (mg)
17. Utiliser des données expérimentales pour résoudre des problèmes spécifiques.
18. **Comprendre ce qu'est une expérience, ce qui doit être mesuré et pourquoi.** (mg, cv)
19. Utiliser des connaissances et des habiletés dans des situations non familières.
20. Reconnaître et définir un problème.
21. **Construire de nouveaux modèles qui s'accordent aux données.** (mg)
22. **Appliquer les principes fondamentaux ainsi que le bon sens.** (inc. cv)

² Légende : inc. = incertitude, mg = mise en graphique, cv = contrôle des variables.

23. **Concevoir des expériences (simples) pour tester des hypothèses.** (cv)
24. Concevoir un devis d'observations.
25. Concevoir un devis de mesures à prendre.
26. Reconnaître les sources de danger et les mesures adéquates de sécurité.
27. Utiliser des habiletés de laboratoires lors d'une expérience (simple).
28. Comprendre et suivre un protocole.
29. Démontrer des habiletés psychomotrices.
30. Connaître le bon usage des appareils de mesure.
31. **Connaître des techniques pour améliorer la fiabilité et la précision des données.** (inc.)
32. **Observer qualitativement et quantitativement.** (inc.)
33. Interpréter des données expérimentales.
34. **Recueillir et interpréter des données.** (inc., mg)
35. **Appliquer des définitions opérationnelles pour relier des concepts symboliques aux observations.** (mg)
36. Appliquer des notions élémentaires de statistique (erreurs aléatoires, erreurs systématiques, moyenne, écart-type, incertitude et intervalle de confiance).
37. **Comprendre comment des incertitudes sur des données affectent l'incertitude de résultats dérivés.** (inc.)
38. Faire des estimations et des calculs d'ordre de grandeur.
39. Décrire clairement l'expérience.
40. Résumer les aspects importants de l'expérience en se basant sur les observations et les données recueillies.
41. **Définir la portée et les limites d'une expérience, de la théorie sous-jacente et des méthodes employées.** (mg)
42. Communiquer par écrit.
43. Communiquer oralement.
44. Tenir un journal de laboratoire.
45. Discuter des résultats et proposer des expériences subséquentes.
46. Se souvenir de l'idée centrale d'une expérience pour un intervalle de temps significatif.
47. Présenter sous forme écrite l'essence d'une expérience effectuée préalablement sans avoir recours à ses notes personnelles.
48. Concevoir des expériences futures dans le même champ de recherche.

Comme nous l'avons vu, la liste des objectifs des laboratoires est longue. On peut cependant identifier trois thèmes récurrents. Les laboratoires devraient, idéalement donner aux étudiants l'occasion de: 1) parfaire leur compréhension de la qualité des données (inc.); 2) interpréter des données et des résultats à la lumière d'un modèle théorique (mg) et; 3) concevoir des expériences simples (cv). Il apparaît donc que quantifier la qualité de la

maîtrise de ces trois outils intellectuels par des étudiants de niveau collégial peut servir de postulat à un jugement positif (ou négatif) sur la qualité didactique des laboratoires de sciences qu'ils auraient rencontrés dans leur cursus. Cependant, ce choix de limiter notre regard à ces trois seuls aspects peut sembler arbitraire, outre leur large représentativité au vu des objectifs recensés, dans une certaine mesure et maints autres objectifs auraient pu être ciblés. Des motivations théoriques qui seront détaillées dans le prochain chapitre viennent également appuyer cet ensemble d'objet de recherches. De plus, une problématique propre à la didactique des sciences vient également conforter notre choix restreint d'objectifs: si de nombreuses études issues de la psychologie génétique du développement de Piaget ont porté sur le contrôle des variables, elles sont nettement moins nombreuses sur l'emploi concret de cette méthodologie générale (le contrôle des variables) dans une situation didactique concrète (laboratoires de science au collégial). Deuxièmement, les deux autres aspects ciblés (interpréter des données et des résultats à la lumière d'un modèle théorique et parfaire leur compréhension de la qualité des données) ont été encore moins couverts par des recherches en didactiques des sciences.

1.3.3 Lacunes dans le corpus des recherches portant sur les laboratoires

Si les laboratoires occupent une place centrale en science et en didactique des sciences, ils n'ont pas obtenu toute l'attention qu'ils méritent dans la recherche. Par exemple, Lilian McDermott et Edward Redish écrivent dans un compendium annoté d'articles de recherche consacrés à l'enseignement de la physique: «*Laboratory instruction and demonstrations have traditionally been considered by physicists to be very important for teaching physics. Yet, as the list of references below suggests, there have been relatively few systematic efforts to assess their effectiveness.*» (McDermott et Redish, 1999, p. 13).

Selon Lazarowitz et Tamir (1994), il subsiste les zones grises suivantes dans les recherches portant sur les laboratoires (les commentaires suivant les lacunes identifiées - soulignées pour les placer en évidence - sont des paraphrases de l'article original) : 1) Certains points fondamentaux tel l'intégration ou la séparation des contenus et des processus demeurent

controversés. Il n'y a pas actuellement de consensus à propos de la légitimité didactique d'intégrer les laboratoires en tant que composante à part entière d'un cours de science. La raison de cette controverse est que les études n'ont pas montré d'avantages indéniables dans les résultats obtenus lors d'examens internationaux par les étudiants ayant suivi des méthodes pédagogiques dites intégratives. Les étudiants au secondaire aiment bien les travaux pratiques mais cela ne semble pas se refléter dans la qualité de leurs apprentissages. 2) Il est essentiel d'utiliser de meilleurs protocoles expérimentaux (designs de recherches) qui répondent plus adéquatement à des questions plus précises. Si des interrogations subsistent, c'est peut-être en raison de la piètre qualité de certaines recherches. 3) Il demeure nécessaire de fournir des validations empiriques solides pour conforter le rôle des laboratoires et bien comprendre les étapes requises pour atteindre leur plein potentiel.

Hofstein et Lunetta (1982) abondent dans le même sens: des recherches mieux ficelées sont nécessaires pour pallier aux principales lacunes dans le corpus de recherches. Citons Vincent Lunetta, qui, dans un article de suivi, a écrit, (2003, p. 260) :

«[...] We are at the early stages of understanding how teachers can help to promote a student's conceptual development, and we still have much to learn about how experiences with laboratory materials influence that process. The need for pedagogical research and development on the laboratory and on related technologies that inform the development of teaching models and practices continues to be an important challenge and opportunity.»

John Leach (2002) propose les questions de recherche suivantes :

Tableau V - Questions de recherche selon Leach.

- | | |
|----|---|
| 1. | Quelle est la compréhension des étudiants sur la qualité des données expérimentales? |
| 2. | Font-ils la distinction entre précision et incertitude ? |
| 3. | Voient-ils les procédures expérimentales, telles tracer la meilleure droite, comme des heuristiques de routine ou comme des modèles explicatifs hypothétiques? |
| 4. | Reconnaissent-ils la différence entre preuve et falsification? |
| 5. | Pensent-ils que les théories scientifiques jaillissent des données? |
| 6. | Perçoivent-ils les laboratoires comme des lieux de reproduction de résultats connus d'avance ou comme des lieux de découverte? |
| 7. | Voient-ils les théories comme un reflet fidèle de la réalité ou comme des modèles? |
| 8. | À partir de quel âge les étudiants distinguent les différents modes d'explications des phénomènes naturels (téléologiques, causales, descriptives, modèles)? |
| 9. | Est-ce que les étudiants reconnaissent que différentes séquences d'actions sont plus ou moins appropriées selon le statut de l'objet d'étude (<i>scientific knowledge claim</i>)? |

Bref, nous sommes loin de connaître l'impact réel des laboratoires, non seulement sur la qualité de l'acquisition de concepts académiques, mais également sur la compréhension que se font les étudiants des concepts transdisciplinaires que sont les notions d'incertitudes, de la représentation graphique de fonctions et du contrôle des variables. En fait nous ne savons pas grand chose sur l'impact didactique des laboratoires. Par exemple, Frederick Reif et Mark St. John (1979) s'interrogent....

«What do students actually learn in the laboratory portion of an introductory college-level physics course ? When we investigated this question in some of the introductory physics courses taught at a major university, our observations suggested some sobering answers. ... despite

several hours spent working with laboratory apparatus, many students seem to learn from this experience little of lasting value.»

Ayant établi les trois grandes problématiques abordées par cette présente thèse, le prochain chapitre servira à poser les bases théoriques des outils qui seront développés.

CHAPITRE 2 - CADRE THÉORIQUE

*«Ce que les hommes veulent en fait, ce n'est pas la connaissance,
c'est la certitude»*
Bertrand Russell
The Listener

La revue de la littérature précédente a illustré que la communauté des chercheurs en didactique n'a pas encore amassé suffisamment de données pour porter un jugement éclairé sur l'efficacité des laboratoires de science à rencontrer les buts qui leurs sont associés. Nous avons vu également qu'il existe un débat assez large sur la nature des conceptions erronées manifestées en regard de la mécanique newtonienne et la difficulté d'établir si elles sont intégrées au sein d'un réseau conceptuel cohérent, intégrées au sein de réseaux notionnels cohérents mais fragmentés et parallèles ou si elles représentent des instanciations de primitives phénoménologiques évoquées par la situation en cours.

Pour mieux spécifier nos objets d'étude et permettre la mise en branle de l'arsenal de la recherche scientifique, nous allons poser, dans le présent chapitre, les définitions opérationnelles qui nous guideront dans l'élaboration des outils quantitatif et de l'outil qualitatif; définitions qui seront situées au sein du paradigme pragmatique et du paradigme didactique. Le paradigme pragmatique étant la recension des « réalités de terrain », c'est-à-dire l'ensemble des méthodes, des procédures et des termes techniques enseignés aux étudiants. Le paradigme didactique sera quant à lui défini par l'apport des chercheurs ayant publié des articles ou des ouvrages importants en didactique des sciences spécifiquement en lien avec nos objets d'étude.

2.1 Contrôle des variables

Le contrôle des variables est en science une précaution méthodologique capitale pour quiconque désire convaincre ses pairs de la validité de ses résultats. Malheureusement, si le contrôle des variables semble simple en apparence, la réalité rattrape rapidement tout chercheur: il est strictement impossible de tout contrôler en même temps ! On peut postuler que la science serait depuis longtemps parvenue à une description parfaite et intime du fonctionnement de la nature ou de l'univers social s'il était parfaitement possible d'isoler les variables expérimentales de toute influence extérieure entravant la bonne marche d'une expérience.

La notion de contrôle des variables possède une importance en soi dans une validation scientifique mais elle s'inscrit également dans une théorie du développement cognitif. Une recension des articles publiés sur la qualité de l'appropriation du contrôle des variables chez les étudiants du primaire et du secondaire indique clairement que le modèle théorique le plus largement adopté pour étudier cet aspect est celui développé par Jean Piaget et ses collaborateurs à Genève entre les années 1910 et 1960. Selon Piaget et ses collaborateurs, le contrôle des variables représente un des points culminants du développement de la pensée et ne se manifeste que chez les individus ayant acquis des schémas de pensée abstraits.

2.1.1 Modèle de Piaget

Selon ce modèle, que l'on qualifie parfois de constructiviste, l'apprentissage se fait par l'intermédiaire d'un processus d'assimilation - accommodation dans lequel les stimuli environnementaux sont peu à peu intégrés à notre structure cognitive. Cependant, notre compréhension du monde extérieur ne s'effectue qu'à l'intérieur de stades de développement qui semblent liés à la construction de notre structure neurologique. Selon le modèle élaboré par Piaget, on peut décrire quatre grandes étapes dans le développement de la pensée chez l'enfant: le stade sensori-moteur (de la naissance à deux mois), la pensée pré-opératoire (de deux ou trois ans à sept ou huit ans), la pensée opératoire concrète (7-8 à 12-14 ans) et la pensée opératoire formelle (14 ans et plus).

De la naissance à l'âge de deux ans environ, le premier stade, **sensori-moteur**, est caractérisé par des activités perceptuelles et motrices. Tôt dans ce stade de développement, si un objet est retiré du champ visuel de l'enfant, celui-ci semble oublier son existence (absence de la permanence de l'objet). Plus tard cependant, si on retire un objet avec lequel l'enfant jouait, celui-ci se met à sa recherche (Goldhaber, 1988).

Depuis sa naissance, l'enfant est un agent de son développement cognitif. Piaget décrit que le jeune enfant entreprend de contrôler son environnement pour obtenir et organiser ses expériences (qui n'a pas vécu la phase du bébé laissant tomber sa cuillère à répétition sur le plancher de la cuisine du haut de sa chaise haute ?). Les enfants en bas âge suivent des yeux, explorent avec leur mains et avec leur bouche. Ils découvrent les mouvements de leur corps et entreprennent d'explorer des combinaisons de mouvements et diverses coordinations d'actions musculaires. De ces explorations initiales, l'enfant, selon Piaget, développe des schèmes mentaux basés sur ses expériences. Si celles-ci sont particulièrement agréables, elles seront répétées par l'enfant (par exemple, frapper avec un hochet ou une cuillère sur le plateau de la chaise haute semble un expérience agréable pour l'enfant. On ne peut en dire autant pour le parent). Par le processus d'assimilation - accommodation, l'enfant se construit un réseau conceptuel; il s'adapte au monde. Vers la fin de ce stade, les expériences de l'enfant sont enrichies par le jeu imaginaire et la capacité de parler. Ceci mène l'enfant au stade suivant: la **pensée pré-opératoire**.

À ce stade (de deux à sept ans), les habiletés intellectuelles de l'enfant s'accroissent. L'enfant peut aller au-delà de l'expérience directe avec des objets même si les pensées de l'enfant sont surtout fondées sur l'apparence des choses (comme l'adulte tentant d'expliquer à un enfant de quatre ans qu'un «biscuit brisé contient autant de biscuit que quand il était entier», en a déjà fait l'expérience (Goldhaber, p.146)). Il peut se représenter des objets en leur absence; il développe son aptitude à manipuler par l'esprit. L'enfant peut, par conséquent, faire du jeu symbolique et représenter par le dessin son imagerie mentale.

Selon Piaget, les caractéristiques générales de la pensée pré-opératoire sont: 1) la *non-conservation*, transvaser le contenu en liquide d'un verre large et court dans un verre long et étroit est interprété comme une augmentation du niveau de liquide par l'enfant. 2) La *centration*, la pensée se limite à une partie de l'information disponible, par exemple, la ligne du niveau de l'eau. 3) L'*absence de réversibilité*, c'est-à-dire, l'impossibilité de se livrer à des opérations mentales réciproques. Par exemple, faire l'expérience par la pensée de transvider le contenu du verre étroit dans le verre large.

Au stade la pensée pré-opératoire, l'enfant semble incapable de pensée logique du type «Si X, alors Y» ou encore «Si ce n'est pas X, alors ce n'est pas Y» Par contre, il saisit de façon générale des relations fonctionnelles élémentaires entre les choses et les événements. Par exemple, il comprend que l'action de basculer l'interrupteur allume ou éteint la lumière. (Berger, 2000). Son mode de raisonnement est qualifié de transductif. Chez l'adulte, un raisonnement peut être déductif (du général au particulier) ou inductif (du particulier au général). L'enfant, au stade pré-opératoire, énonce des conclusions illogiques souvent fondées sur une forme d'égoïsme : «Il fait noir parce que c'est l'heure de mon dodo». (Goldhaber, 1988).

Vers l'âge de six ou sept ans, la pensée de l'enfant évolue vers le **stade de la pensée opératoire concrète**. Plutôt que de se fier à leurs intuitions, les enfants d'âge scolaire tentent de trouver des explications cohérentes. C'est à ce stade que se met véritablement en place la pensée logique chez l'enfant. Celui-ci possède la *réversibilité* (l'enfant comprend que l'addition est la même opération que la soustraction mais en sens inverse). Il manifeste une *décentration* (il peut considérer un phénomène dans sa globalité). Il accède à la notion d'*identité* (tout objet conserve certaines caractéristiques invariables même si on le transforme en apparence). Le tableau VI résume les principales caractéristiques du stade de la pensée opératoire concrète.

Tableau VI - Pensée opératoire concrète (selon Bell-Gredler, 1986).

Catégories	Explications et exemples. L'enfant...
<i>Décentration</i>	considère un phénomène dans sa globalité, il ne limite pas son attention à un détail spécifique.
<i>Classification</i>	classifie et organise en fonction de caractéristiques observables. (Classe des liquide entre acide et base selon la couleur du papier tournesol. Reconnaît que tous les chiens sont des animaux mais que tous les animaux ne sont pas des chiens.)
<i>Sérialisation</i>	arrange un jeu d'objets en fonctions de caractéristiques observables et établit une liaison univoque (un pour un) entre deux ensembles. (De petits animaux ont un rythme cardiaque élevé et de gros animaux ont un rythme cardiaque lent.)
<i>Réversibilité</i>	inverse, par la pensée, les étapes pour retourner aux conditions initiales depuis le résultat final d'une procédure. (Retracer ses pas après que quelqu'un nous eu montré le chemin.)
<i>Conservation (identité)</i>	réalise qu'une chose reste la même si on ne lui enlève ni ajoute rien même si son aspect extérieur change. (Une motte d'argile mise en boule contient la même quantité de matière.)

Vers l'âge de 14 ans, selon le modèle de Piaget, l'enfant atteint le stade de la **pensée opératoire formelle**. Ce n'est qu'à ce stade qu'il peut penser scientifiquement. Il peut tirer des conclusions et construire des tests pour valider des hypothèses. La maîtrise de la logique permet l'analyse combinatoire, le raisonnement théorique, la pensée proportionnelle et la pensée probabiliste. Le tableau VII illustre les principales caractéristiques de la pensée opératoire formelle.

Tableau VII - Pensée opératoire formelle (selon Bell-Gredler, 1986).

Catégories	Explications et exemples. Le jeune adolescent...
<i>Raisonnement théorique</i>	applique des classifications multiples, une logique de conservation, et d'autres formes de raisonnements à des relations et des propriétés qui ne sont pas observables directement. (Différencier l'oxydation et la réduction sur la base de la conservation de l'énergie, classer des plantes selon leur position dans une séquence évolutive, faire des inférences à partir de la théorie de la tectonique des plaques, accepter une hypothèse pour les besoins d'un argument.)
<i>Raisonnement combinatoire</i>	considère toutes les combinaisons possibles d'objets tangibles ou abstraits. (Dédire des caractéristiques potentielles du phénotype à partir du génotype.)
<i>Raisonnement proportionnel</i>	établit et interprète des relations fonctionnelles sous une forme mathématique. (Le taux de diffusion d'une molécule est inversement proportionnel à la racine carrée de son poids moléculaire. Le taux de radioactivité est directement proportionnel à la demi-vie.)
<i>Contrôle des variables</i>	reconnaît la nécessité d'un protocole expérimental qui contrôle toutes les variables sauf celle à l'étude. (Lors d'une expérience destinée à trouver quels facteurs affectent la période d'un pendule, les étudiants vont garder une variable constante - si la masse est à l'étude, la longueur et l'angle de départ demeurent fixes.)
<i>Raisonnement probabiliste et corrélational</i>	interprète des observations qui montrent une variabilité aléatoire et reconnaît des relations entre des variables en dépit de variations qui les masquent. (Dans une expérience en biologie, ne pas laisser des spécimens démontrant des caractéristiques exceptionnelles invalider les conclusions générales.)

À l'adolescence, le raisonnement hypothétique se combine au raisonnement déductif. C'est ce qu'on appelle la pensée hypothético-déductive. Les adolescents peuvent tirer des

conclusions logiques d'une prémisse ou d'une théorie générale puis en vérifier la validité. Cependant, de nombreuses études ont montré que ce ne sont pas tous les adolescents qui manifestent tous ces traits utiles au raisonnement hypothético-déductif (Berger, 2000, p. 313).

2.1.2 Revue de la littérature

Pour évaluer le stade auquel est parvenu un enfant, le mode d'investigation privilégié par Piaget et ses collaborateurs est l'entrevue clinique dans laquelle des questions et des problèmes sont posés à un enfant. Ses réponses à ces questions préalables et aux questions subséquentes de l'examineur permettront de porter un jugement éclairé sur les processus cognitifs mis en oeuvre par l'enfant pour répondre à la question ou pour résoudre le problème.

Une de ses tâches célèbres est l'épreuve de la balance qui consiste à équilibrer les plateaux en accrochant des poids de chaque côté du fléau. Alors que les enfants de sept ans réussissent en plaçant des poids égaux à des distances égales, les enfants de 10 ans saisissent l'importance de la position des poids en explorant par tâtonnement. Vers 13 ou 14 ans, les enfants comprennent intuitivement qu'il existe un lien arithmétique entre la distance et le poids et entreprennent de l'expérimenter systématiquement en ne faisant varier qu'un paramètre à la fois. Keating (1990) a toutefois montré que le développement formel est beaucoup plus lent et beaucoup moins complet que ne le laisse entendre le modèle théorique, en documentant que de nombreux adultes font piètres figures à la tâche de la balance.

La relation existant entre la pensée opératoire formelle mesurée et celle requise pour comprendre les concepts formels d'un cours de physique de niveau collégial fut examinée par Boram et Renner (1985). À l'aide d'entrevues cliniques individuelles, 49 étudiants inscrits dans un cours de physique pour des futurs professeurs de l'école primaire furent évalués selon leur capacité d'utiliser: (1) l'analyse combinatoire, (2) la séparation et le contrôle des variables, (3) le raisonnement proportionnel, et (4) les implications

réciroques. Durant tout un semestre, les étudiants se voyaient imposer des expériences sur 30 concepts de physique; six de ces concepts traitant des notions de moment de force, de l'électricité, de l'optique et de la chaleur ont été analysés dans la recherche. La compréhension de ces concepts impliquait une ou plusieurs des caractéristiques de la pensée formelle.

L'analyse des données a mené les chercheurs à la conclusion qu'une relation non-significative existe entre les caractéristiques de la pensée formelle requise pour résoudre un problème et la manifestation de ces caractéristiques lors de l'entrevue clinique. C'est-à-dire que la réussite à une épreuve clinique demandant de mettre en oeuvre une des composantes de la pensée formelle ne garantissait pas la réussite à un problème de physique dont la résolution impliquait l'utilisation de la même composante. Les corrélations établies entre la réussite d'une épreuve clinique et la réussite des autres épreuves étaient toutefois modérées mais statistiquement significatives. Les chercheurs en concluent que la réussite à un problème requérant une pensée formelle dépend de la structure globale de la pensée et non de la maîtrise particulière de chacune des habiletés cognitives liées au déploiement de la pensée formelle.

Gipson et Abraham (1985) ont étudié le lien entre la pensée opératoire formelle et les difficultés conceptuelles en résolution de problèmes de génétique. Plus de 70 étudiants collégiaux de biologie générale reçurent un enseignement sur la génétique mendélienne par la méthode traditionnelle des exposés magistraux, en insistant sur la formation méiotique des gamètes, la dominance, la ségrégation et les assortiments indépendants. Des exercices d'entraînement avec la grille de Punnett étaient utilisés (établissement des probabilités d'obtenir divers phénotypes selon la combinaison d'allèles des deux parents en établissant un tableau où les allèles des géniteurs sont positionnés sur les têtes de lignes et de colonnes. Les cellules du tableau représentant les diverses combinaisons possibles d'allèles des descendants et, par conséquent, les génotypes possibles). Un prétest suivi, huit semaines plus tard, d'un post-test qui venaient évaluer les habiletés à résoudre un problème. Les deux

tests demandaient d'utiliser des raisonnements proportionnels, des analyses combinatoires et des raisonnements probabilistes. L'évaluation du stade de développement des étudiants s'est faite par l'intermédiaire de trois tâches piagétienne. Aucun lien statistiquement significatif n'a pu être établi entre la réussite aux tâches piagétienne et leur équivalent dans les problèmes correspondants de génétique.

Dans une recherche portant sur des étudiants universitaires dans un cours d'introduction à la physique, Vincent Coletta et Jeff Phillips (2005) ont fait passer concurremment le *Force Concept Inventory* (FCI) (Hestenes, Wells et Swackhammer, 1992) et le *Classroom Test of Scientific Reasoning* (CTSR) d'Anton Lawson (1978) à 65 étudiants. Le CTSR étant un examen papier-crayon testant diverses composantes de la pensée formelle piagétienne tel le contrôle de variable ou la pensée combinatoire. Une corrélation significative ($r = 0,51$) a été observée entre le gain normalisé,

$$\langle\langle g \rangle\rangle = \frac{\text{note au post-test} - \text{note au prétest}}{100 - \text{note au prétest}}$$

et le résultat au CTSR. Les auteurs en concluent, de concert avec Arons et Karplus (1976) que de nombreux étudiants universitaires ne sont pas encore parvenus au stade de la pensée formelle mais qu'il existe un lien entre l'acquisition du stade de pensée formelle et la capacité à apprendre les principes de la mécanique newtonienne.

Le CTSR est un des tests purement quantitatifs issus de la méthodologie qualitative des entretiens cliniques que Piaget et ses collaborateurs ont utilisé pour faire émerger les conceptions des enfants dans leur laboratoire de Genève. Naturellement, une telle méthodologie « papier-crayon » risque de masquer l'intentionnalité des sujets. Pour pallier à cette contrainte, le CTSR fait suivre chaque question d'une relance logique offrant l'occasion au sujet de choisir parmi une liste de choix celui décrivant le mieux son raisonnement. L'annexe 2 présente un test similaire, le *Test of Logical Thinking* (TOLT)

de Tobin et Capie (1981), qui servira de modèle pour quelques-unes des questions du volet quantitatif de la présente thèse.

2.2 Interprétation de graphiques

« In science, more than any other subject, students should be involved in predicting relationships between variables and attempting to quantify these relationships. Graph construction and interpretation are very important to science instruction because they are an integral part of experimentation, the heart of science. » (McKenzie et Padilla, 1986)

L'utilisation de graphiques pour visualiser des données est une compétence importante en sciences expérimentales, mais l'utilisation des outils graphiques est souvent inadéquate chez les étudiants. À ce sujet, Marie-Geneviève Séré a constaté que les étudiants n'utilisaient pas spontanément des représentations visuelles pour s'aider dans l'interprétation de données (Séré, Journeaux et Larcher, 1993). Cependant, comme pour les laboratoires qui visent plusieurs buts pédagogiques, le même constat s'applique pour les graphiques. Si ces derniers rendent possible une visualisation directe des données, ils permettent également de relier les données à une théorie ou à un modèle mathématique en s'interrogeant sur la qualité de l'accord entre la prédiction et les résultats expérimentaux. C'est à ce titre qu'ils sont indicateurs du développement de la pensée logique.

Pour des raisons qui seront évoquées en détail à la section suivante, nous avons choisi d'étudier la capacité des étudiants à reconnaître, dans un graphique, un modèle mathématique représenté par une équation. Cette modélisation graphique d'une relation théorique est une étape essentielle dans une expérience dont le but est d'apporter des éléments de validation à une théorie hypothétique. Ceci implique de reconnaître des graphiques présentant des relations directement proportionnelles (de pente positive, nulle ou négative), inversement proportionnelles, polynomiales, exponentielles, logarithmiques, sinusoïdales ou autres.

Typiquement, un étudiant de niveau secondaire est appelé à tracer des graphiques de fonctions linéaires; cependant, au fil de ses études, il aura à modéliser des données issues

de laboratoires avec des modèles théoriques de complexités croissantes. Les principaux types de fonctions mathématiques qu'un étudiant en sciences de la nature va rencontrer dans ses cours de science sont les suivants:

Tableau VIII - Principales fonctions mathématiques.

Type	Équation	Exemple
Proportionnelle	$y = mx + b$	Deuxième loi de Newton : $F_{nette} = ma$
Inversement proportionnelle	$y = a/x$	Loi des gaz parfaits : $PV = nRT$
Polynomiale	$y = ax^m + bx^{m-1} + \dots + c$	Équation d'un mouvement rectiligne uniformément accéléré : $x = x_0 + v_{0x}t + \frac{1}{2}a_x t^2$
Exponentielle	$y = ae^{bx+c}$	Taux de croissance d'une colonie bactérienne : $N = N_0 e^{kt}$
Sinusoidale	$y = C \sin(ax + b)$	Position d'un système masse-ressort : $x = A \sin(\omega t + \phi)$

Pour que le lecteur ou la lectrice puisse disposer des mêmes références conceptuelles que celles imparties de manière typique à des étudiants de niveau collégial, l'annexe 12 présente la reproduction de la section d'un manuel de laboratoire traitant de l'utilisation des graphiques. Le lecteur ou la lectrice pourra y constater la dominance (parfaitement légitime) des fonctions polynomiales.

Regardons maintenant les résultats d'études préalables ayant porté sur le lien entre les graphiques et les modèles théoriques tels que se le représentent les étudiants des niveaux secondaire à universitaire.

2.2.1 Revue de la littérature

Les graphiques sont un intermédiaire commode, et souvent obligé, entre des résultats expérimentaux et une modélisation de la situation physique, chimique, biologique ou autre. L'interprétation correcte d'un graphique implique l'invocation d'une structure logique sous-jacente.

C'est en ce sens qu'ils ont souvent été étudiés en didactique: est-ce que les étudiants interprètent adéquatement la signification d'une pente dans un graphique de la vitesse en fonction du temps? Est-ce que les étudiants interprètent adéquatement la signification de l'aire sous la courbe dans un graphique de la force en fonction de la position ? (Beichner, 1996).

La figure 2 présente un exemple de la première question d'un test développé par Robert Beichner (1994). Il s'agit d'un test d'interprétation de graphiques de cinématique, le *Test of Understanding Graphs in Kinematics* (TUG-K).

Des graphiques de l'accélération en fonction du temps sont illustrés pour cinq objets. Tous les graphiques ont la même échelle. Quel objet a vécu la plus grande variation de la grandeur de sa vitesse ?

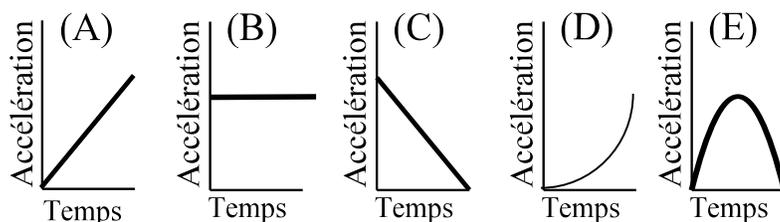


Figure 2 Exemple de question du TUG - K.

L'intérêt d'une telle question réside en sa capacité de discerner des conceptions cinématiques fausses. Par exemple, le choix A, choisi par la majorité des étudiants, ressemble à un graphique typique de la vitesse en fonction du temps lorsque l'accélération

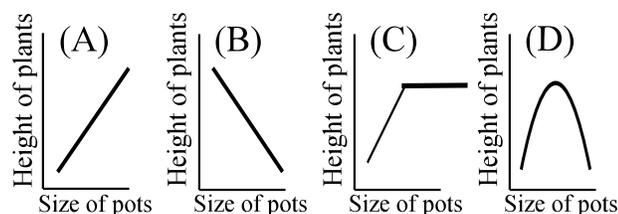
est constante; choisir ce distracteur peut refléter une remémoration visuelle plutôt qu'une interprétation réfléchie.

Un autre test bien documenté et abondamment cité est le *Test of Graphing in Science* (TOGS) de Danny McKenzie et Micheal Padilla (1994). Ces auteurs ont développé un test de 26 questions à choix de réponses sur l'interprétation de graphiques cartésiens (*line graphs*) qu'ils ont fait passer à des étudiants de secondaire un (*grade seven*) à la première année de cégep (*grade twelve*). Selon les auteurs, neuf objectifs ont guidé la rédaction des questions:

1. Choisir des axes appropriés à des données ou à une description;
2. Localiser des points sur un graphique à partir de coordonnées;
3. Identifier le graphique dont les axes sont correctement étiquetés pour correspondre à une description ou à des données;
4. Choisir le graphique présentant la meilleure courbe de tendance;
5. Identifier le graphique illustrant une description ou des données;
6. Associer une valeur X (ou Y) à Y (ou X) sur un graphique;
7. Interpoler à partir d'un graphique;
8. Associer une description à un graphique (linéaire ou courbe);
9. Identifier les inter-relations entre deux graphiques.

La figure 3 illustre un exemple de question de ce test:

Dick plans to study the effect of growing sunflowers in different size pots. The graphs below show four possible outcomes of his experiment.



Which graph is *best* described by each of the following statements.

16. As the pot size increases, the plant height decreases.
17. As the pot size increases, the plant height increases up to a certain pot size. With larger pots, plant height remains the same.

Figure 3 Exemple de question du TOGS.

Les résultats ont montré une amélioration graduelle des résultats avec l'âge des répondants (de 47 % à 13 ans à 57 % à 18 ans). Toutefois, ce test, s'il rencontre bien les objectifs fixés, ne permet pas de vérifier les conceptions des étudiants sur le lien entre un modèle mathématique représenté par une équation et la représentation graphique de celle-ci.

En effet, au laboratoire, la représentation graphique de données ou de résultats dépasse la simple visualisation de données. Si les représentations graphiques des données permettent de répondre à des questions très pointues sur la théorie, les graphiques servent, au préalable, de supports visuels et quantitatifs à un modèle (est-ce que l'accélération du glisseur est constante vers le haut du plan incliné? Donc, est-ce que le graphique *vitesse* vs *temps* peut-être représenté par une fonction linéaire du type $y = mx + b$? Si c'est effectivement le cas, que vaut l'accélération du glisseur ?). Aucun graphique ne peut être interprété correctement sans une compréhension de la structure logique d'un modèle interprétatif. C'est à ce sens qu'ils nous intéresseront; en tant que vecteurs de compréhension d'une structure logique.

Cette dialectique entre théorie et expérience est mise en relation par l'intermédiaire des représentations formelles de relations, sous forme de fonctions mathématiques, entre la variable dépendante et la variable indépendante. Il peut sembler naturel qu'il y ait co-évolution conceptuelle chez les apprenants des concepts de variables et de fonctions.

« It can be argued that knowledge of the concept of variable is a prerequisite to a full understanding of functions, particularly when such an understanding includes functions defined as the relationship between an independent and a dependent variable. On the other hand, an individual's understanding of variable may deepen as he or she comes to know functions. » (Leinhardt, Zaslavski et Stein, 1990)

Les études sur l'évolution de l'appropriation du concept de fonction mathématique par les étudiants se retrouvent principalement dans les publications spécialisées en didactique des mathématiques. Que pouvons-nous y apprendre ? Qu'il existe généralement un grand écart entre les réponses des étudiants à des questions formelles sur des fonctions lors d'examen et leur compréhension réelle, profonde dirions-nous.

Intéressons nous plus particulièrement à la représentation graphique de fonctions. La figure 4 illustre le genre de question étudiée par Eric Knuth (2000). Cette question fait partie d'une étude menée auprès de 284 étudiants américains suivant un cours d'algèbre préparatoire à l'université. Chaque étudiant recevait dix questions sur le lien unissant graphiques et fonctions linéaires.

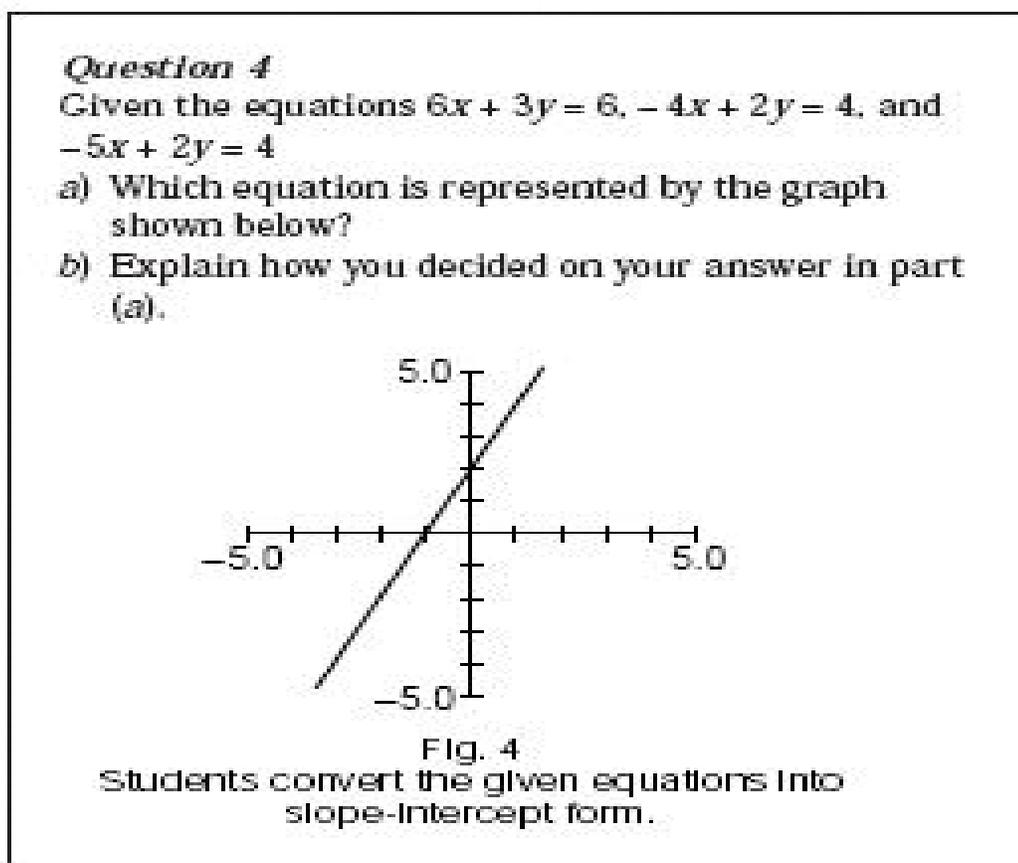


Figure 4 Exemple de question traitant du lien entre une fonction et un graphique.

Contrairement à ce qu'un professeur aurait pu présumer, étant donné le faible niveau de difficulté apparente des questions, les étudiants montrèrent des lacunes évidentes de compréhension du lien entre une fonction et un graphique. L'auteur remarque «... *given the level of the students, the number of responses that did not make sense was alarming*». Cette dernière étude corrobore en tous points les résultats d'étude de synthèse de Leinhardt, Zaslavsky et Stein (1990) bien que celle-ci se soit surtout attardée aux étudiants des niveaux secondaire trois (*grade 9*) et moins.

Revenons à l'interprétation de graphique mais cette fois lue selon le cadre de la théorie des stades piagétien, de nombreuses études viennent appuyer la co-évolution de la capacité à interpréter correctement un graphique et la progression vers la pensée formelle (par exemple, Wavering, 1989). Dans une étude plus raffinée, Berg et Phillips (1994) ont utilisé la méthodologie des entrevues cliniques pour analyser finement les conceptions des étudiants sur différents aspects des graphiques en relation avec des éléments constitutifs de la pensée formelle (et non simplement leur appartenance dichotomique à un stade ou un autre). Leurs conclusions soutiennent celles de Wavering: l'interprétation de graphiques est corrélée à la pensée logique. Toutefois, les auteurs vont encore plus loin et suggèrent qu'il ne sert à rien de pénaliser un adolescent qui peine à décoder un graphique s'il ne possède pas encore les outils intellectuels pour le faire.

Cette interprétation est contestée par Wolff-Micheal Roth qui considère que l'interprétation d'un graphique ne peut se faire sans un modèle interprétatif bien assimilé de la part du lecteur du graphique. Des chercheurs de renommée internationale se sont avérés impuissants à décoder correctement un graphique classique présent dans un texte d'introduction propre à leur discipline simplement parce qu'ils ne pouvaient retrouver le bon cadre interprétatif. Des entrevues avec ces scientifiques, dont la réputation n'est plus à établir, ont révélé le même type d'erreurs identifiées auprès d'étudiants du secondaire, par exemple, la confusion entre pente et hauteur (*slope/height confusion*). Roth en déduit que

ce type d'erreur est davantage de nature iconographique qu'issu d'une incapacité intellectuelle (*mental deficiency*) (Roth, 2003).

Cette dernière critique rejoint, en partie, une étude menée au collège Jean-de-Brébeuf à Montréal où Margot de Serres et ses collaborateurs ont évalué l'impact de séquences didactiques basées sur le modèle de la maîtrise des trois langages: naturel, graphique et symbolique. Selon ce modèle, les étudiants doivent apprendre à naviguer intellectuellement dans un univers qui leur est familier et dans lequel ils ont appris à utiliser une forme de communication basée sur l'échange de mots (parlés ou écrits). Ce langage est appelé naturel et sert de substrat pour tout apprentissage ultérieur. En science, comme en musique, s'ajoute à ce langage un univers de signes conventionnels et plus ou moins standardisés servant à véhiculer des concepts sous une forme compacte. L'articulation de ces symboles dans une grammaire particulière constitue une des principales difficultés rencontrées par les étudiants qui doivent apprendre une nouvelle langue, le langage symbolique. À cette langue, s'ajoute une troisième forme conventionnelle de communication: le langage graphique qui est constitué d'une infinité de modalités différentes pour illustrer des relations spatio-temporelles entre des concepts ou des variables. La maîtrise de ces trois langages constituerait la clé, selon ces auteurs, pour réussir en sciences (De Serres, 2003). Ils ont fait passer de nombreux tests de dépistage à des étudiants de niveau collégial et ils ont remarqué l'universalité de corrélations marquées entre le résultat aux prétests axés sur la maîtrise des langages et le résultat final obtenu dans les cours de science.

Selon ce modèle des trois langages, l'aptitude à traduire une relation symbolique donnée par une équation mathématique en un tracé graphique fait fonctionner en parallèle deux univers cognitifs et peut donc être postulée comme difficile à mettre en oeuvre pour quiconque ne maîtrisant pas l'un ou l'autre de ces langages.

2.3 Métrologie et incertitudes

Les laboratoires au niveau collégial (et même au niveau secondaire) visent, entre autres, à faire comprendre que tout résultat de mesure est entaché d'une incertitude. La prochaine section présente les notions de métrologie et d'incertitude tel que présentées aux étudiants québécois de niveau collégial et celles plus élaborées respectant les normes de l'Organisation Internationale de Standardisation (ISO) qui seront plus vraisemblablement apprises à l'université. Il importe toutefois de les présenter les deux pour bien illustrer la transposition didactique de la norme internationale à la méthode simplifiée présentée aux étudiants québécois lors de leur passage au collégial.

2.3.1 Métrologie

La méthode scientifique est basée sur la mesure de quantités diverses et la recherche de régularités et de relations. La métrologie, science de la mesure, se trouve donc au coeur de l'activité scientifique. Toutefois, la métrologie se retrouve plus largement dans de multiples sphères de l'activité humaine et n'est pas cantonnée à des applications scientifiques. Qu'il s'agisse de penser à l'influence indirecte qu'elle a pu avoir dans la révolution française tel que l'attestent les cahiers de doléance de 1789 qui enregistrent fréquemment la demande « *un seul poids, une seule mesure* ». Les citoyens manifestaient ainsi un raz-le-bol généralisé face à la multiplication des unités de mesure régionales. Bien entendu, un tel état de fait n'a pas provoqué la révolution et diverses tentatives d'uniformisation avaient tentées auparavant, sans succès évidemment, mais cet exemple illustre bien le rôle central de la mesure dans le fonctionnement de la société.

La métrologie peut globalement être subdivisée en trois grands champs d'application. La métrologie scientifique vise le développement de systèmes d'unités, d'étalons de mesure et de méthodes de mesures qui permettent la reproductibilité des mesures effectuées par des groupes de recherche indépendants. La métrologie appliquée vise le développement de méthodes et de standards communs aux industries de manière à assurer l'uniformité des mesures et le contrôle de la qualité. La métrologie légale vise le développement

d'instruments, standards et méthodes pour la protection de la santé et de la sécurité de la société et de l'environnement. Dans tous ces champs d'application, un concept central de la métrologie est la traçabilité qui est une caractéristique fondamentale de toute mesure. Le traçabilité est garante de la reproductibilité des résultats obtenus et de l'identification de problèmes dans la méthode employée.

Vue l'importance sociale énorme que revêt la métrologie, la communauté internationale s'est dotée d'un organisme de standardisation garant des standards, des méthodes et des normes d'écriture techniques. L'organisation internationale de normalisation (ISO) est un réseau d'instituts nationaux de normalisation de 162 pays, selon le principe d'un membre par pays, dont le Secrétariat central, situé à Genève (Suisse) assure la coordination d'ensemble. Cet acronyme ne réfère pas à des termes spécifiques mais tire son étymologie du grec *isos*, signifiant « égal ». La norme ISO 1000 (ICS 01 060) définit les sept unités fondamentales du système international d'unités (SI), soit la seconde (s), le mètre (m), le kilogramme (kg), l'ampère (A), le Kelvin (K), la mole (mol) et la candela (cd). De ces unités de base découlent toutes les quantités dérivés tels le joule ($\text{kg m}^2/\text{s}^2$) ou le newton ($\text{kg m}/\text{s}^2$). Les pays, tels les États-Unis, ne faisant pas partis de la convention du mètre et qui, par conséquent, n'utilisent pas les unités SI comme références définissent néanmoins leurs étalons à partir des conventions du SI.

De manière générale, mesurer est une procédure expérimentale qui consiste à attribuer une valeur numérique à une quantité. Cette mesure est directe si on compare directement la quantité à mesurer avec une quantité de même espèce appelée unité de mesure ou étalon de référence. On peut ainsi mesurer une longueur par comparaison avec une règle graduée ou mesurer une masse sur une balance à plateaux en ajoutant sur le plateau témoin le nombre requis de masses de référence. La mesure est indirecte si elle est issue de la combinaison de plusieurs mesures directes, par exemple en évaluant la distance d'une étoile par des mesures angulaires séparées dans le temps et la mesure d'une distance où encore la mesure de la température à l'aide d'un thermomètre (la mesure directe est celle d'une distance qui

est par la suite convertie en température. Les graduations sont dans ce cas toujours préalablement adéquatement converties).

Lors d'une mesure indirecte, le résultat final est obtenue au travers ce qu'il est convenu d'appelé une chaîne de mesures. Par exemple, lors d'une mesure d'une masse à l'aide d'une balance numérique, la balance doit préalablement être calibrée. L'objet que l'on pèse est alors déposé sur le plateau ce qui comprime un cristal piézoélectrique induisant une différence de potentiel à ses bornes. Cette différence de potentiel est amplifiée pour agir sur un afficheur préalablement ajusté. Les chaînes de mesure ne sont toutefois pas réservées aux instruments numériques. Par exemple lors d'une mesure d'une longueur avec une règle, celle-ci doit avoir au préalable fait l'objet d'une calibration (par le manufacturier). L'expérimentateur doit par la suite utiliser son jugement pour trouver le meilleur ajustement possible entre le "zéro" de la règle et une partie de l'objet à mesurer. La mesure à l'autre extrémité est alors évaluée et l'instrument de mesure est reporté au besoin (ce qui naturellement introduit une incertitude supplémentaire).

Les instruments de mesure ont tous certaines caractéristiques. Ils ont d'abord un *registre* ou une *portée* qui est définie par la différence entre les valeurs maximales et minimales de l'échelle. Un mètre est gradué de 0 à 100 cm, un thermomètre peut n'afficher que des valeurs allant de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les instruments sont dits *linéaires* si la relation entre la quantité à mesurer et la valeur de la mesure est linéaire. Toutefois, un instrument de mesure n'a pas besoin d'être linéaire pour faire efficacement son travail, l'affichage peut être calibré en conséquence d'une relation dont l'évolution est connue ou il est possible d'utiliser des tables ou des graphiques de conversion. Une autre caractéristique d'un instrument de mesure est sa *sensibilité* définie comme le rapport entre la variation de la mesure et la variation de la quantité mesurée. Par exemple, un thermomètre à colonne d'alcool peut avoir une sensibilité de $0,33\text{ cm}/^{\circ}\text{C}$ (Fornasini, 2008, p. 32). Un appareil de mesure possède une *résolution* qui correspond à la plus petite variation observable sur l'instrument de mesure. Pour un appareil à affichage numérique, cela correspond à la valeur

de l'unité du plus petit chiffre affiché. Pour un instrument analogique, la résolution est fréquemment définie comme la distance minimale entre les graduations. Toutefois, il est toujours possible, si l'objet mesuré est suffisamment bien défini de prendre une mesure de précision supérieure à la valeur de la graduation la plus fine. Finalement, l'instrument de mesure est dit *transparent* s'il n'affecte pas la valeur de la quantité mesurée.

Comme aucun instrument n'a une précision infinie et que les expérimentateurs doivent fréquemment utiliser leurs organes percepteurs pour faire une mesure, cette dernière est inévitablement entachée d'incertitude. La quantité mesurée X sera alors dite située au sein d'un intervalle centré autour d'une quantité numérique X_0 . On écrira alors $X = X_0 \pm \delta X$, où δX représente l'incertitude absolue sur la mesure (l'incertitude relative se trouvera alors par $\delta X/X_0$). Lors d'une mesure directe, cette incertitude peut correspondre à la moitié de la plus petite division de l'instrument de mesure mais peut aussi valoir toute autre valeur jugée appropriée par l'expérimentateur. Lors d'une mesure indirecte, l'incertitude doit être évaluée selon des règles de propagation des incertitudes qui seront énoncées sommairement dans les sections suivantes et plus en détails dans les articles 2 et 3 ainsi que dans les annexes 11 à 13. Les principales sources d'incertitudes sont (Fornasini, 2008, p. 45) :

- Difficultés liées à la définition de l'objet à mesurer;
- Caractéristiques d'opération de l'appareil;
- Interactions entre l'instrument de mesure et le système sous mesure;
- Interactions entre l'instrument et l'expérimentateur;
- Méthodologie expérimentale;
- Conditions ambiantes.

Il ne faut pas confondre incertitude et erreur. Si l'incertitude entache inévitablement tout acte de mesure et est impossible à quantifier de manière absolue et sans équivoque, l'erreur est définie comme la différence entre le meilleur estimé de la mesure et la valeur vraie de la quantité mesurée lorsqu'une telle chose est connue et peut donc être évaluée

numériquement sans ambiguïté en autant que les caractéristiques physiques de l'objet de référence fassent consensus.

Selon une classification conventionnelle, les incertitudes sont de deux natures. Les incertitudes aléatoires sont inévitables. Elles sont issues de l'imperfection de nos sens et des interactions complexes entre l'environnement, l'instrument de mesure et l'objet mesuré. Elles sont parfois en excès, parfois en défaut, d'où leur nom. Les incertitudes systématiques surviennent lorsque l'instrument de mesure ou la méthode expérimentale employés causent des mesures qui sont toujours en excès ou en défaut. Cette dernière source d'incertitude ne peut pas être détectée par un examen de données recueillies et ne peut être débusquée que par un dispositif expérimental indépendant utilisant des méthodes et des instruments différents.

2.3.2 Norme ISO

Les normes industrielles universellement acceptées aujourd'hui sur l'estimation et les normes d'écriture de l'incertitude sont basées sur la norme ICS (classification internationale des normes) 17.020 : Métrologie et mesurage en général (ISO, 1994). Ce standard international est assez peu connu dans les milieux de l'enseignement, mais il commence à faire son chemin et il est donc important d'en tenir compte.

Selon la terminologie ISO, toute évaluation de l'incertitude par des méthodes statistiques (échantillonnage multiple) est considérée de type A. Toute autre méthode d'estimation de l'incertitude est de type B (jugement scientifique, incertitudes tirées d'un manuel de référence, spécifications du manufacturier, etc.). Il n'y a pas d'incertitude de type A ou B, mais des méthodes diverses d'évaluation de l'incertitude. Lorsque plusieurs types de méthodes sont employées, le cumul des incertitudes se fait au moyen de la somme quadratique. Par exemple si une balance précise à 4g pèse plusieurs objets dont l'écart-type de la moyenne vaut 4g, l'incertitude globale sera de $(4^2 + 4^2)^{1/2} = 5,66$ g que l'on arrondira à 6 g.

Lors de l'évaluation statistique de l'incertitude sur un ensemble de données Y , avec un intervalle de confiance à 68%, l'incertitude sur l'ensemble de moyenne y et d'écart-type estimé sur la moyenne, $u_c(y)$, s'écrit : $Y = y \pm u_c(y)$, où $u_c(y)$ est l'écart-type estimé sur la moyenne. Pour des explications plus techniques, le lecteur ou la lectrice pourra consulter l'annexe 11.

Pour certains domaines, il peut être nécessaire de jouer de prudence et d'augmenter l'intervalle de confiance d'un facteur k appelé facteur de couverture. Pour obtenir un intervalle de confiance de plus de 95% , on utilise $k = 2$ et pour obtenir un intervalle de confiance de plus de 99,7% , on utilise $k = 3$. On écrit alors le résultat final sous la forme $Y = y \pm U(y)$, où $U = ku_c(y)$. Les paramètres k et $u_c(y)$ doivent apparaître séparément pour que le facteur de couverture utilisé soit clairement connu.

Lors de l'utilisation de données entachées d'incertitude dans une opération mathématique pour déterminer une quantité dérivée, il est naturel de concevoir que la quantité dérivée sera également incertaine. L'attribution de l'incertitude issue d'un calcul se nomme la propagation des incertitudes.

On peut montrer alors que dans le cas où les variables x_1, x_2, \dots, x_N ne sont pas corrélées, la formule pour trouver l'incertitude dans le cas d'une multiplication ou d'une division ($z = xy$ ou $z = x/y$) s'écrit de la manière suivante,

$$\frac{u_c(z)}{z} = \sqrt{\left[\frac{u(x)}{x}\right]^2 + \left[\frac{u(y)}{y}\right]^2} \quad (\text{Eq. 3 Propagation des incertitudes dans le cas d'un produit ou d'un quotient (ISO)}).$$

Ces relations prendront leur importance dans la conception des distracteurs (ou leurres) de certaines des questions de l'instrument de mesure élaboré dans ce présent travail.

2.3.3 Présentation de la méthode usuelle d'estimation de l'incertitude expérimentale

La méthode précédente (ISO) demeure largement ignorée dans les institutions d'enseignement collégial québécoises car jugée trop complexe. En lieu et place, des méthodes simplifiées par diverses couches de transpositions didactique sont employées.

La première méthode consiste à attribuer à l'incertitude la valeur du dernier chiffre significatif d'une mesure et de ne tenir compte que de ceux-ci lors de l'évaluation de l'incertitude d'une quantité dérivée. Cette méthode demeure toutefois une simple estimation grossière et est généralement remplacée par la méthode des extrêmes. L'importance de l'évaluation des chiffres significatifs ne devrait pas être cependant négligée toutefois car lors de l'estimation de l'incertitude d'une mesure effectuée avec un instrument analogique, tel un mètre, le jugement de l'observateur est mis à contribution pour déterminer la valeur numérique associée à l'interpolation de la mesure sur l'échelle de l'instrument. Si généralement, cette incertitude représente la moitié de la plus petite division, il arrive fréquemment que l'observateur doive poser un regard critique basé sur l'analyse simultanée de l'instrument en lui-même et de l'objet mesuré. Par exemple, la mesure du diamètre d'une bille avec une simple règle pose un problème d'estimation de l'incertitude liée à la parallaxe car les portions de l'objet servant de balises à la mesure ne sont pas en contact intime avec l'échelle graduée. Il arrive ainsi que l'incertitude soit estimée à une fraction de la plus petite division. De même, lors de la mesure d'un objet bien défini, il peut arriver que l'observateur puisse l'interpoler à l'intérieur de la plus petite division de l'instrument. Il faut aussi tenir compte des capacités intrinsèques des organes sensoriels de l'observateur et de ses capacités de traitement de l'information. L'écriture conventionnelle d'une quantité x dont la mesure a donnée a est $x = a \pm \Delta a$ où Δa est l'incertitude absolue.

L'incertitude sur un résultat dérivé (ou par mesures indirectes) peut toujours être établie par la méthode des extrêmes. On estime la grandeur de l'incertitude d'un résultat dérivé en calculant la plus grande et la plus petite valeur qu'il peut prendre en raison des incertitudes

associées aux données expérimentales servant dans son calcul, en divisant leur différence par deux. Cette méthode pose cependant souvent problème lors de l'évaluation d'une fonction complexe incluant des divisions et/ou des fonctions trigonométriques auxquels cas l'identification de la bonne combinaison donnant le vrai maximum et le vrai minimum est difficile.

Dans les cas fréquents où la fonction servant à obtenir une quantité dérivée est d'une facture mathématique simple, la méthode des règles simples permet d'obtenir l'incertitude sans avoir à passer par la méthode essai et erreur de la méthode des extrêmes. L'annexe 12 présente les principales formules associées à cette méthode. Pour bien illustrer la différence avec la méthode de l'ISO, le cas de l'incertitude sur un produit ou un quotient. Soit $z = xy$ ou encore

$z = x / y$ se trouve par :

$$\frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y} \quad (\text{Eq. 4 Méthode des règles simples (multiplication, division)}).$$

Passons maintenant aux études ayant traitées de la compréhension des étudiants au sujet des concepts reliés aux incertitudes.

2.3.4 Revue de la littérature

En 1993, Marie-Geneviève Séré et ses collaborateurs ont analysé les conceptions d'étudiants universitaires sur la nécessité de répéter des mesures, sur la distinction entre les erreurs systématiques et aléatoires et sur les intervalles de confiance (Séré, Journeaux et Larcher, 1993). Les auteurs ont étudié en détail le travail au laboratoire de 20 étudiants au deuxième semestre de leur cheminement en physique à l'université de Paris. Se basant sur des observations *in situ* et sur des entrevues de suivi, les chercheurs se sont rendus compte que la plupart des étudiants ne comprenaient pas la notion d'intervalle de confiance tel que

l'atteste leur absence de référence à l'incertitude lorsqu'ils devaient décider si deux mesures étaient compatibles entre elles.

Les étudiants étaient récalcitrants à faire plus qu'une ou deux mesures pour trouver la longueur focale d'une lentille. Si on leur imposait de faire 10 mesures, les étudiants plaçaient une plus grande confiance dans leur mesure initiale et utilisaient les mesures subséquentes pour juger de la qualité des premières. Malgré qu'ils aient reçu une formation sur le traitement des erreurs expérimentales et sur l'utilisation des techniques statistiques pour analyser des mesures multiples, les étudiants ne semblaient pas connaître la raison de prendre une série de mesures.

Lorsque la consigne était de ne prendre qu'une seule mesure de la distance focale par autocollimation, la majorité des étudiants ont choisi de prendre $\frac{1}{2}$ mm comme seule incertitude (la moitié de la plus petite division sur le mètre) alors que les sources d'incertitudes, selon les professeurs, auraient pu être identifiées par le manque de définition de l'image réelle; la difficulté de repérer sa position précise (sa marge de distance selon l'expression d'une étudiante); l'épaisseur des supports; l'espace entre les supports et le repère de leur position; la non verticalité de la lentille; et l'angle entre le miroir et l'axe optique. Si toutes ces causes se retrouvent globalement dans les traces écrites laissées par les équipes, une seule a tenté de tenir compte de toutes. La majorité des équipes discutait des causes d'erreur sans que ceci n'affecte leur calcul d'incertitude. Une anecdote symptomatique est l'étudiant qui, ayant constaté que l'image est nette sur une plage de 2 mm, a inscrit ce fait comme une «difficulté» et a estimé l'incertitude à $\frac{1}{2}$ mm.

L'article mentionne aussi que les étudiants rencontrent des problèmes à distinguer les notions de précision et d'exactitude (accuracy). Cependant, selon l'ISO, cette distinction demeure subjective, porte à confusion et ne devrait pas être employée. La précision est généralement définie comme la qualité de l'accord entre différentes mesures du même objet. L'exactitude représente, telle qu'elle est souvent présentée, la qualité de l'accord entre la « vraie » mesure de l'objet mesuré et les mesures obtenues. Pour bien distinguer ces deux

notions, une analogie provenant du golf peut être utile (Abbott, 2001, p. 167). Supposons un golfeur pratiquant ses fers sur un champ de pratique. Il tente d'envoyer plusieurs balles vers le fanion. Si toutes les balles frappées aboutissent à quelques centimètres les unes des autres, la précision est bonne. Cependant, si toutes ces balles sont à 30 m du fanion alors l'exactitude est mauvaise. Le problème dans la pratique est que l'on ignore la valeur exacte de l'objet mesuré et qu'il devient donc impossible de porter un jugement éclairé sur l'exactitude. De plus, si toutes les données concordent en étant systématiquement fausses, il peut sembler aberrant de les considérer précises !

Dans le même ordre d'idées, la distinction entre l'incertitude systématique et l'incertitude aléatoire est difficile à établir. Comme l'atteste le guide officiel du National Institute of Standards and Technology qui est basé sur la norme ISO :

« There is not always a simple correspondence between the classification of uncertainty components into categories A and B and the commonly used classification of uncertainty components as "random" and "systematic." The nature of an uncertainty component is conditioned by the use made of the corresponding quantity, that is, on how that quantity appears in the mathematical model that describes the measurement process. When the corresponding quantity is used in a different way, a "random" component may become a "systematic" component and vice versa. Thus the terms "random uncertainty" and "systematic uncertainty" can be misleading when generally applied. » (Taylor et Kuyatt, 1994)

Selon Lubben et Millar (1996) les interprétations que les étudiants de niveau secondaire se font des données peuvent être classées en deux paradigmes: le paradigme ponctuel (*point*)

et le paradigme distribué (*set*). Selon le premier paradigme, une donnée est valable en soi. Les étudiants un peu plus avancés désireront prendre une ou deux données de plus pour s'assurer de la validité de leur première. Les étudiants adoptant le paradigme distribué reconnaissent le caractère aléatoire de l'incertitude, mais comme le démontre leur étude, l'utilisation des termes techniques appropriés est souvent ambiguë.

Allie *et al.* (1998) ont, pour leur part, conçu une sonde papier-crayon sur la nécessité de prendre une série de données. À partir de la situation initiale (déclencheur) exposée à la figure 5, ils ont proposé divers scénarios à 121 étudiants à leur premier semestre universitaire en physique (Afrique du sud).

An experiment is being performed in the Physics laboratory.

A wooden slope is clamped near the edge of a table. A ball is released from a height h above the table as shown in the diagram. The ball leaves the slope horizontally and lands on the floor a distance d from the edge of the table. Special paper is placed on the floor on which the ball makes a small mark when it lands.

The students have been asked to investigate how the distance d on the floor changes when the height h is varied. A meter stick is used to measure d and h .

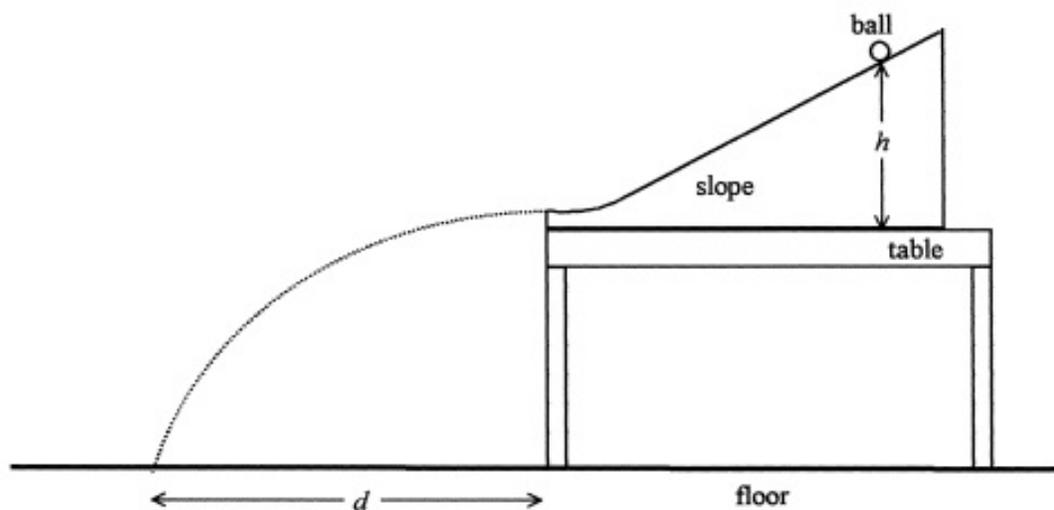


Figure 5 Déclencheur de Allie *et al.*

Suite à ce déclencheur, des questions étaient posées aux étudiants, en voici un exemple:

After measuring the time, the students now have to determine d when $h = 400$ mm. One group releases the ball down the slope at a height (h) = 400 mm and, using a meter stick, they measure $d = 436$ mm.

The following discussion then takes place between the students:

A: I think we should roll the ball a few more times from the same height and measure d each time.

B: *Why? We've got the result already. We do not need to do any more rolling.*

C: *We must roll the ball down the slope just one more time from the same height.*

Les étudiants devaient choisir une des options et justifier leur réponse.

D'autres questions testaient la nécessité de prendre plusieurs mesures du temps de chute. Un exemple est illustré à la figure 6. Selon les auteurs, cette question est classifiée comme la sonde RT (*Repeating Time measurements*), car elle accède spécifiquement aux conceptions des étudiants sur la nécessité de prendre une série de mesures du temps de chute.

The students are given a stopwatch and are asked to measure the time that the ball takes from the edge of the table to hitting the ground after being released at $h = 400$ mm. They discuss what to do.

We can roll the ball once from $h = 400$ mm and measure the time. Once is enough.

Let's roll the ball twice from height $h = 400$ mm, and measure the time for each case.

I think we should release the ball more than twice from $h = 400$ mm and measure the time in each case.


A


B


C

With whom do you most closely agree? (Circle ONE):

A	B	C
---	---	---

Explain your choice.

Figure 6 Sonde RT de Allie *et al.*

Une analyse des réponses écrites par les étudiants permet de les répartir équitablement entre les deux paradigmes de traitement des données (*point et set*). C'est-à-dire que la moitié des étudiants manifestaient la conception qu'une seule mesure était suffisante; toute mesure subséquente ne servant qu'à valider cette première mesure. L'autre moitié des étudiants

semblaient percevoir la nécessité de prendre plusieurs mesures en raison des erreurs aléatoires inévitables dans une expérience de ce type.

Dans sa dissertation doctorale, Duane Deardorff (2001) a étudié les conceptions d'étudiants universitaires américains et japonais sur le traitement expérimental de données. Les principales conclusions de cette thèse sont que les étudiants ne perçoivent pas les raisons premières d'évaluer l'incertitude qui sont, selon l'auteur, de transmettre un estimé de la qualité des résultats et un critère objectif de comparaison. Les étudiants tendent à éviter de quantifier l'incertitude, même lorsque contraints de le faire, et ont de la difficulté à identifier la principale cause d'incertitude dans une expérience. Les résultats sont fréquemment rédigés avec un nombre démesuré de chiffres significatifs. Tout ces constats tendent à s'améliorer avec une exposition didactique aux techniques appropriées, mais très peu. Pour citer l'auteur:

« Perhaps the most important discovery from this research is the realization that students have significant difficulties simply obtaining accurate measurements of physical quantities. The issue of determining the uncertainty of a measurement is secondary compared to the importance of finding a reasonable estimate of the intended measurement. » (Deardorff, p.104)

Poursuivant la précédente étude, et toujours à la même université, David Abbott (2003), a, dans sa dissertation doctorale, tenté de répondre à deux questions: est-ce que les conceptions des étudiants sur le concept de mesure expérimentale changent après instruction et quelles sont les méthodes et les raisonnements employés par les étudiants pour prendre des mesures avant instruction ?

La réponse à la première question est oui mais, comme l'avait constaté Deardorff, pas beaucoup. Pour la seconde question, divers modes de raisonnement ont pu être établis sans qu'il ne se manifeste de cohérence entre eux. Par exemple, des étudiants qui cumulent (*stack*) les pages d'un livre pour estimer l'épaisseur d'une seule feuille ne mesureront pas la masse simultanée de plusieurs trombones pour déterminer la masse d'un seul. Concernant la typologie proposée par Lubben et Millar et reprise par Allie *et al.*, Abbott note :

«Taken on its own, the failure of the “point/set” scheme to predict other aspects of student measurement behavior is unsatisfying, since the null result could be due either to the lack of an underlying relationship or the inability to accurately classify students using the scheme and questions published by Allie et al. As noted in previous chapters, student responses to the two questions used to assess “point/set” reasoning do not always contain elements of either “point” or “set” reasoning. However, the absence of a relationship between any of the aspects of thinking in this study, despite the internal consistency and face validity of the constructs, strongly suggests that there may not be a single underlying cause for the student difficulties observed in this study. Students rarely receive focused, coherent instruction on measurement practice and theory, so it is plausible that student “understanding” consists of a set of inconsistent, unrelated rules rather than a coherent (yet non-expert) framework of ideas.» (Abbott, p.95)

À l'Université du Maryland, Rebecca Faith Lippmann (2003) a conçu une séquence didactique destinée à promouvoir l'application du modèle statistique lors du traitement de données expérimentales; ces laboratoires portent le nom de *Scientific Community Laboratory (SCL)*. La prémisse didactique de ces laboratoires est de se fonder sur les aptitudes concrètes, issues de la vie quotidienne, à résoudre des problèmes et à prendre des décisions pour concevoir des laboratoires qui font appel à la réflexion personnelle pour analyser des données et poursuivre vers les étapes subséquentes. Une analyse qualitative basée sur des enregistrements vidéos a montré que la proportion du temps passé à comprendre le sens des actions entreprises est cinq fois plus élevée que dans les laboratoires traditionnels. Un volet quantitatif a illustré que 43% des étudiants ayant fait les SCL analysait des données selon le point de vue de la dispersion des données contre 12% dans un groupe contrôle.

Toutes les études importantes publiées (Séré, Journeaux et Larcher, 1993; Lubben et Millar, 1996; Allie *et al.*, 1998) ont traitées principalement de l'utilisation de méthodes statistiques lors de l'évaluation de l'incertitude. Ceci s'applique mal au modèle québécois, car ces méthodes ne sont utilisées que sporadiquement dans nos laboratoires. L'accent, pour le calcul d'incertitudes, est généralement mis sur la méthode des extrêmes ou des règles simples. De plus, l'utilisation de méthodes statistiques ne garantit en rien que les étudiants comprennent ce que représente la notion d'incertitude tel que l'atteste la confusion relevée dans l'analyse de Séré, Journeaux et Larcher (1993) et les thèses de Abbott et de Deardorff. L'observation que les étudiants tiennent peu compte des difficultés inhérentes à l'objet mesuré et aux instruments de mesure lors de l'estimation de l'incertitude est une réalité vécue par tous les professeurs de sciences mais très peu documentée dans les publications spécialisées.

Notre instrument de mesure devra donc éviter le traitement statistique de l'incertitude. Selon les conceptions préalables des étudiants concernant les incertitudes mises en lumière

dans les références mentionnées, nous nous concentrerons sur ce qu'il est possible d'étudier concernant l'incertitude: ordre de grandeur de la précision d'une mesure; incertitude de lecture sur un cadran gradué; identification de la principale source d'incertitude dans une expérience; utilisation de procédures d'accumulation (*stacking*) pour estimer une taille; et utilisation appropriée des algorithmes de propagation des erreurs.

Duane Deardorff conclut sa thèse par la question suivante (italique originale, traduction personnelle): « *Pourquoi* les étudiants ont-ils des conceptions si éloignées de celles des experts au sujet des erreurs de mesure ? » Tout comme les graphiques, les incertitudes permettent d'illustrer et de quantifier la qualité des données et des résultats obtenus. Il semble donc naturel d'émettre l'hypothèse que si la difficulté à interpréter un graphique est liée à une lacune de la structure logique intellectuelle de l'examineur, la difficulté à estimer des incertitudes tire son origine d'une cause similaire.

2.4 Mécanique newtonienne

Il serait hors propos ici d'établir le cadre théorique de la physique newtonienne, ce domaine si vaste et conceptuellement riche. Nous nous contenterons de rapporter le paradigme pragmatique permettant de situer le lecteur ou la lectrice face aux compétences attendues des étudiants collégiaux qui ont fait l'objet de cette étude. La revue de la littérature (paradigme didactique) sera également brève, car le cadre théorique étayant la construction de nos outils quantitatifs sera tiré de la littérature propre à la didactique de la physique. L'article 1 viendra présenter les principaux résultats obtenus et à ceux-ci viendront s'adjoindre des résultats subséquents qui seront analysés au chapitre 9.

2.4.1 Compétences attendues

Les étudiants qui prendront part à cette étude sont inscrits en sciences de la nature dans un cégep public de l'île de Montréal. En ce qui a trait à la physique mécanique, les étudiants suivent leur cours en première session. Les principaux sujets couverts sont les suivants :

cinématique de translation 1D et 2D, cinématique de rotation, dynamique, principes de conservation (énergie, quantité de mouvement, moment cinétique) ainsi que le travail, la puissance et le théorème de l'énergie cinétique.

Selon leur école de provenance, une bonne partie, ou presque tous ces sujets ont été abordés en secondaire V, soit l'année précédant leur arrivée au cégep. La principale différence entre les cours (secondaire par rapport au cégep) réside dans la difficulté mathématique des problèmes étudiés, au recours plus fréquent à des résolutions de problèmes purement algébriques (démonstrations ou autres) et à l'utilisation du calcul différentiel.

2.4.2 Revue de la littérature

Nous utiliserons comme étalon de mesure un examen largement diffusé dans l'enseignement de la physique aux États-Unis, le *Force Concept Inventory* (FCI) (Hestenes, Halloun et Swackhammer, 1992). Il constitue, à l'heure actuelle, un des étalons les plus utilisés pour juger de la qualité de l'enseignement des concepts de la physique newtonienne dans les cours d'introduction à la physique des universités américaines. Par exemple, Richard Hake (1998) a pu, en analysant au-delà de 6000 résultats, établir que les approches pédagogiques dites actives (dialogue socratique, *hands-on physics*, résolution de problèmes en groupes coopératifs, etc.) permettent d'atteindre des scores plus élevés en post-test que les approches dites traditionnelles.

Le FCI a été développé en tenant compte des conceptions préalables les plus fréquemment évoquées par les étudiants lors d'entrevues ou d'enregistrements de leurs réflexions personnelles lors de la passation d'un questionnaire ouvert (*Think Aloud Protocol*). Son élaboration s'est étalée sur plus d'une dizaine d'années. Les principaux sujets couverts par le FCI sont indiqués dans le tableau IX. Le FCI complet se trouve à l'annexe 6.

Tableau IX - Sujets couverts par le FCI.

Sujet	Question
Cinématique	
Vitesse distinguée de la position	20E
Accélération distinguée de la vitesse	21D
Mouvement parabolique implique accélération constante	23D, 24E
Vitesses qui changent	25B
Addition vectorielle de vitesses	7E
Première loi de Newton	
Sans force	4B, 6B, 10B
Direction de la vitesse constante	26B
Vitesse de grandeur constante	8A, 27A
Sans force nette	18B, 28C
Deuxième loi de Newton	
Force impulsive	6B, 7E
Force constante implique accélération constante	24E, 25B
Troisième loi de Newton	
Pour forces impulsives	2E, 11E
Pour forces continues	13A, 14A
Principe de superposition	
Somme vectorielle	19B
Forces s'annulant	9D, 18B, 28C

Première loi de Newton	
Sans force	4B, 6B, 10B
Direction de la vitesse constante	26B
Vitesse de grandeur constante	8A, 27A
Sans force nette	18B, 28C
Types de forces	
5S. Force de contact - surfaces solides	
Passives	9D, 12B et D
Impulsives	15C
Frottement s'opposant au mouvement	29C
5F. Forces de contact - fluides	
Résistance de l'air	22D
Pression atmosphérique	12D
5G. Gravitation	5D, 9D, 12B et D, 17C, 18B, 22D
Accélération indépendante de la masse	1C, 3A
Mouvement parabolique	16B, 23D

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les distracteurs sont issus des principales conceptions préalables. Le tableau X présente la taxonomie des principales conceptions erronées se trouvant dans les choix de réponses du FCI.

Tableau X - Taxonomie des conceptions préalables rencontrées dans le FCI.
Abréviations originales de l'article (Hestenes, Wells, Swackhammer, 1992).

Sujet	Question
<p>Cinématique</p> <p>K1. Position - vitesse non distinguées</p> <p>K1. Vitesse - accélération non distinguées</p> <p>K1. Composition non vectorielle de la vitesse</p>	<p>20B, C et D</p> <p>20A; 21B,C</p> <p>7C</p>
<p>Impetus</p> <p>I1. Impetus fournit par un impact</p> <p>I2. Perte/recouvrement de l'impetus d'origine</p> <p>I3. Dissipation de l'impetus</p> <p>I4. Augmentation graduelle de l'impetus</p> <p>I5. Impetus circulaire</p>	<p>9B,C; 22B,C,E; 29D</p> <p>4D; 6C,E; 24A; 26A,D,E</p> <p>5A,8,C; 8C; 16C,D; 23E; 27C,E; 29B</p> <p>6D; 8B,D; 24D; 29E</p> <p>4A,D; 10A</p>
<p>Forces actives</p> <p>AF1. Seuls des agents actifs exercent des forces</p> <p>AF2. Un mouvement implique une force active</p> <p>AF3. Mouvement nul = force nulle</p> <p>AF4. La vitesse est proportionnelle à la force appliquée</p> <p>AF5. L'accélération implique une force croissante</p> <p>AF6. Une force cause l'accélération jusqu'à la vitesse maximale</p> <p>AF7. Une force active se dissipe</p>	<p>11B; 12B; 13D; 14D; 15A,B; 18D; 22A</p> <p>29A</p> <p>12E</p> <p>25A; 28A</p> <p>17B</p> <p>17A; 25D</p> <p>25C,E</p>
<p>Paires action/réaction</p> <p>AR1. Plus de masse implique plus de force</p> <p>AR2. L'agent le plus actif produit le plus de force</p>	<p>2A,D; 11D; 13B; 14B</p> <p>13C; 11D; 14C</p>
<p>Concaténation des influences</p> <p>CI1. La plus grande force détermine le mouvement</p> <p>CI2. Un compromis des forces détermine le mouvement</p>	<p>18A,E; 19A</p> <p>4C, 10D; 16A; 19C,D; 23C; 24C</p>

CI3. La dernière force à agir détermine le mouvement	6A; 7B; 24B; 26C
Autres influences sur le mouvement	
CF. Force centrifuge	4C,D,E; 10C,D,E
OB. Des obstacles n'exercent pas de forces	2C; 9A,B; 12A; 13E; 14E
Résistance	
R1. La masse fait s'arrêter les objets	29A,8; 23A,B
R2. Mouvement lorsque la force excède la résistance	28B,D
R3. La résistance s'oppose à la force/impetus	28E
Gravité	
G1. L'air assiste la gravité	9A; 12C; 17E; 18E
G2. Gravité intrinsèque à la masse	5E; 9E; 17D
G3. Objets plus lourds tombent plus vite	1A; 3B,D
G4. La gravité augmente avec la chute des objets	5B; 17B
G5. La gravité agit après la dissipation de l'impetus	5B; 16D; 23E

Les conceptions préalables précédentes forment donc un amalgame de croyances populaires ayant de nombreux traits en commun avec la physique d'Aristote (mouvement violent et naturel, déplacement spontané des objets de façon à atteindre leur place naturelle dans l'univers - feu vers le haut, matière vers le bas) et la physique de l'impetus du Moyen-Âge (un impact donne de l'impetus à un objet. Cet impetus se dissipe ce qui implique que l'objet ralentisse et finisse par s'arrêter). Néanmoins, le FCI n'a pas été conçu de manière à donner un équivalent aristotélicien ou moyenâgeux pour chacune des questions. Il ne représente pas un portrait cohérent de trois types de physique (si on inclut la mécanique newtonienne) de par son construit basé sur les conceptions préalables énoncées lors d'entretiens d'explicitation. Les similitudes avec les concepts issus de chacune des physiques sont toutefois assez frappantes pour émettre l'hypothèse que le réseau conceptuel des étudiants est cohérent (Hestenes, Wells, Swackhammer, 1992). Certains étudiants étant largement

aristotéliens, d'autres « impetussiens ». La littérature en didactique de la physique catégorise ces étudiants comme « pré-newtoniens ».

2.5 Cohérence conceptuelle

Si les conceptions préalables précédentes sont assez prévalentes pour mériter leur inclusion dans le FCI (elles sont exprimées par des étudiants de niveau secondaire mais aussi par des étudiants aux cycles supérieurs en physique), cela ne signifie pas qu'un étudiant les émet d'une manière cohérente. À cet effet, deux sortes de cohérence doivent être distinguées : la cohérence inter-items et la cohérence temporelle. Cette dernière représente la stabilité temporelle de l'émission d'une conception et se vérifie par une méthodologie test/retest. Dans cette présente étude, nous n'étudierons pas ce type de cohérence. Elle a toutefois été mise à l'épreuve par Charles Henderson qui a étudié les résultats obtenus au FCI en test/retest séparés par un intervalle de trois semaines par 500 étudiants à l'université du Minnesota. Les résultats sont présentés à la figure 7. Selon l'erreur standard de mesure des résultats obtenus, l'intervalle de confiance est de ± 4 items (sur 30 car la version du FCI est celle révisée de 1995).

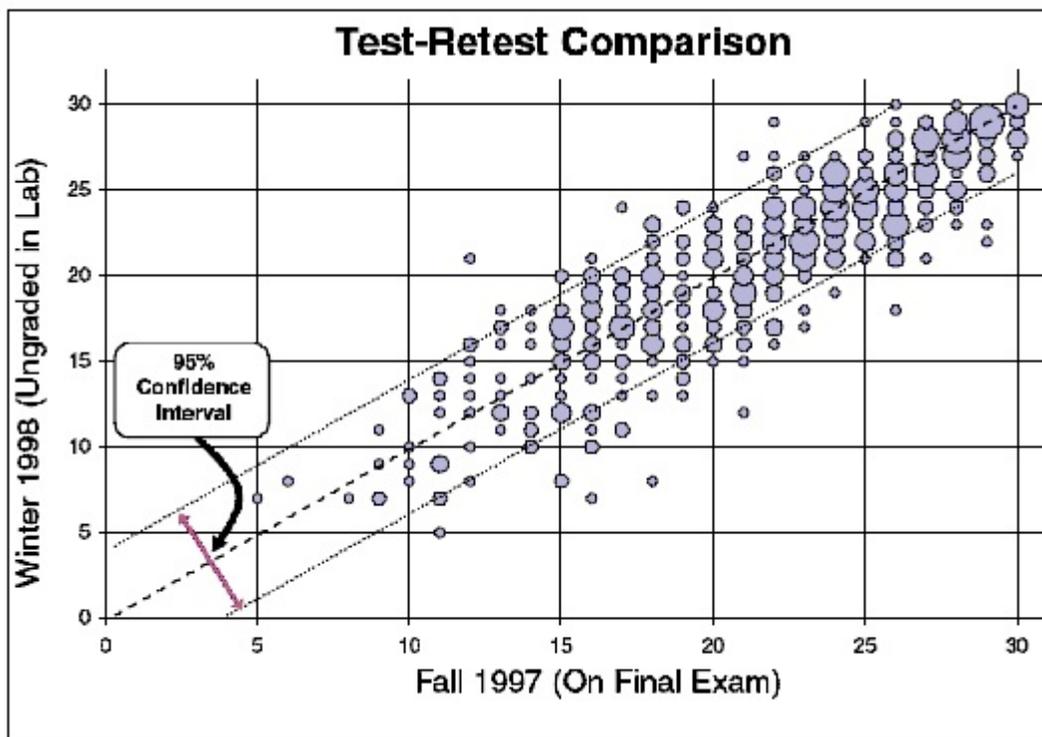


Figure 7 Test/retest du FCI (Henderson, 2002).

On constate aisément que les résultats sont regroupés à l'intérieur de l'intervalle de confiance à 95%. Cette forme de cohérence devrait plutôt être interprétée comme une stabilité temporelle (Francis, Adams et Noonan, 1998) que comme une cohérence conceptuelle, car aucune indication ne permet de vérifier si les répondants ont réussi ou échoué les mêmes items en test/retest, mais seulement si le nombre d'items réussis est similaire.

La cohérence inter-item quant à elle représente la probabilité qu'un répondant sélectionne, pour deux items distincts, des distracteurs postulés équivalents. Nous en avons donné l'exemple avec les questions 4 et 10 de la version originale du FCI. Un étudiant convaincu de la validité de l'impetus circulaire, devrait choisir des réponses cohérentes (4A et 10A). Si toutefois cela ne s'avère pas, il se peut que ce soit en raison d'indices contextuels qui

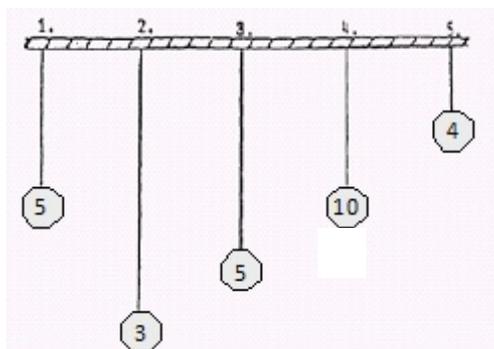
pistent le répondant vers l'activation de conceptions légèrement différentes (ou de p-prim différentes). Par exemple, la présence d'une table à la question 4 et l'absence de surface sous la pierre à la question 10 pourraient présider à l'élection de postulats intuitifs différents. Néanmoins, puisque nous ne pouvons pas réinterpréter à posteriori les motivations intrinsèques ayant guidé les choix de réponses, nous ne pouvons qu'inférer spéculativement sur la cohérence du réseau conceptuel en nous basant sur la sélection commune de distracteurs postulés équivalents. Nous en ferons donc notre définition opérationnelle de la cohérence conceptuelle.

2.5.1 Définitions opérationnelles

Pour les besoins de cette thèse, la cohérence conceptuelle sera définie de deux façons différentes: 1) cohérence concomitante et 2) cohérence dichotomique.

La cohérence concomitante représente la cohérence interne entre les choix de réponses entre deux questions. Par exemple, les questions 5 et 6 du TOLT se présentent comme l'illustre la figure 8.

5. Vous désirez concevoir une expérience pour trouver si la longueur d'un pendule influence sa période. Lesquels choisiriez-vous ?



- A) 1 et 4
- B) 2 et 4
- C) 1 et 3
- D) 2 et 5
- E) Tous

6. Laquelle des affirmations suivantes décrit le mieux votre raisonnement pour la question précédente :

- A) Le pendule le plus long doit être testé contre le plus court.
- B) Tous les pendules doivent être testés les uns contre les autres.
- C) Si la longueur du pendule augmente, sa masse devrait être diminuée.
- D) Les pendules devraient être de même longueur mais de masses différentes.
- E) Les pendules devraient être de longueurs différentes mais de masse identique.

Figure 8 Questions 5 et 6 du TOLT.

La sélection concomitante des choix 5A et 6D pourrait être interprétée comme la manifestation d'une cohérence conceptuelle, de même pour 5E - 6B. Dans ces deux cas, la réponse est fautive mais au lieu d'enregistrer deux échecs, on peut y voir une forme de succès. En effet, la sélection concomitante de 5A et 6D pourrait advenir chez des étudiants ayant mal interprété l'énoncé de la question, regardé attentivement les choix de réponses et sélectionné les pendules dont la longueur est identique mais les masses différentes, en conformité avec leur interprétation erronée. Cela peut également permettre d'identifier des étudiants dont le raisonnement semble conforme à la pensée formelle mais qui sélectionnent malgré tout la mauvaise réponse à l'item 5, peut-être par inadvertance.

Pour identifier le portrait global des patrons de réponses chez les répondants, l'outil idéal est la création d'une matrice des co-occurrences aussi appelée tableau de Burt (1950). Il s'agit d'établir une tabulation croisée à partir des données brutes exprimées sous forme

binaire. La façon la plus simple d'obtenir un tableau de Burt consiste à faire l'opération matricielle $B = A^T \cdot A$, où B représente le tableau de Burt, A représente la matrice des données brutes exprimées sous forme binaire et dont chaque ligne contient les réponses des participants, et A^T est la transposée de la précédente matrice.

Pour clarifier, prenons l'exemple des deux questions précédentes et imaginons cinq répondants qui ont sélectionné les couples suivants : (C, A), (C, E), (B, B), (C, A), (B, E). La matrice A s'écrit alors:

Tableau XI - Exemple des données brutes exprimées sous forme binaire.

	Q5					Q6				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
3	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
4	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1

Si on exclut l'identification des répondants et des questions, il s'agit d'une matrice 5 par 10. Le résultat de $A^T \cdot A$ donnera une matrice de 10 par 10 qui se présentera sous la forme suivante:

Tableau XII - Exemple d'un tableau de Burt.

		Q5					Q6				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
Q5	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	B	0	2	0	0	0	0	1	0	0	1
	C	0	0	3	0	0	2	0	0	0	1
	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q6	A	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0
	B	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
	C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	E	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2

On y constate que les informations sur les couples de choix de réponses sont présentées de manière complète et compacte. On peut y détecter aisément, par exemple, que sur les trois répondants ayant sélectionné 5C, un seul a sélectionné la bonne réponse à la question 6. Par ailleurs, sur les deux répondants ayant sélectionné 6A, tous ont choisi 5C.

L'avantage d'un tel type de tableau est qu'il ne se complexifie pas avec le nombre de répondants, sa structure demeurant homomorphe. Toutefois, pour un test comme le FCI qui comporte 29 questions à cinq choix de réponses, la matrice générée est de dimension 145×145 ce qui représente 21025 cellules. Une façon de contourner le problème de l'identification de données intéressantes dans cette pléthore est mise en oeuvre dans l'outil informatique qui a été développé dans le cadre de cette thèse; si les membres de la population donnée partagent des conceptions semblables, les couples de choix de réponses devraient se ressembler. Ainsi, pour un choix donné à une question quelconque, il devient

pertinent de postuler qu'une conception est commune si le même couple est sélectionné par plus de 50 % des répondants (notez que ce critère numérique est arbitraire). Elle devient saillante si plus de 75% des répondants la partage et quasi-unanime pour une sélection commune à plus de 90%. La macro Excel, que nous décrirons plus loin, illustre de telles combinaisons en surlignant les cellules appropriées selon un code de couleurs préétabli.

Le deuxième type de cohérence, la cohérence dichotomique, sera définie par la proportion de répondants réussissant un item étant donné la réussite à un autre item moins la proportion de répondants réussissant ce même item étant donné l'échec à l'autre item déjà mentionné. Soyons plus clair. Si un même concept est traité dans deux questions distinctes, on s'attend à ce que les répondants les réussissent toutes les deux ou les échouent toutes les deux. En statistique, le coefficient de corrélation est l'outil généralement employé pour identifier des couples de réponses dont les taux de réussite sont corrélés. Toutefois, deux critiques peuvent être émises à ce sujet: 1) comme nous l'avons mentionné, des taux de réussite élevés entraînent des aberrations numériques et, 2) l'interprétation didactique n'est pas évidente car sont incluses dans le calcul toutes les combinaisons possibles [(1, 1), (0, 0), (0, 1), (1, 0)] où 1 représente la réussite et 0 l'échec.

2.5.2 Indice de discrimination spécifique

Pour la deuxième critique, il est possible de créer un coefficient dont l'interprétation est plus intuitive et qui ne concerne que les couples (1, 1) et (0, 1). Considérons en effet deux items x et y . Si la réussite à y est liée à celle de x les couples observés, si la population manifeste une cohérence parfaite, seraient (1, 1) et (0, 0). Si on ne s'intéresse qu'à la réussite de y , que veut alors dire qu'une certaine partie de la population le réussisse tout en ayant raté x ? Cela peut sembler le reflet que les deux items qui, dans l'esprit du constructeur du test devrait refléter la même conception, suscitent chez les répondants la l'activation de conceptions indépendantes. Prenons l'exemple des questions 4 et 10 du FCI que nous avons décrites précédemment. Si pour tous les étudiants réussissant la question

10, seule la moitié a réussi la question 4, il semble évident que la conception correcte inférée par la sélection de la bonne réponse à la question 10 n'était pas solidement ancrée en raison du manque partiel de réussite à la question 4 qui demande d'appliquer exactement le même principe fondamental de physique (le principe d'inertie). Notons qu'une telle disparité serait complètement noyée si on ne porte attention qu'aux taux de réussite. La situation précédente pourrait ainsi se produire alors que les questions 4 et 10 sont réussies avec un taux de 50 % chacune. Comment savoir si ce sont les mêmes étudiants qui réussissent les deux questions ? Comme nous l'avons vu, le coefficient de corrélation apporte un élément de réponse. Toutefois, un autre coefficient se montre d'une interprétation nettement plus intuitive: l'indice de discrimination spécifique.

Cet indice sera défini de la façon suivante : [proportion des étudiants réussissant y en ayant réussi x] - [proportion des étudiants réussissant y en ayant échoué x]. Ainsi si la réussite de x est un « préalable » à la réussite de y , les étudiants ayant échoué x ne devraient pas réussir y . Ce nouvel indice partage donc la population en deux classes puis compare les taux de réussite d'une façon similaire à l'indice de discrimination en analyse classique d'item mesurant la différence dans le taux de réussite à un item donné de deux segments de la population de répondants, les « forts » et les « faibles ». Puisque la séparation de la population ne se fait plus globalement mais question par question, ce nouvel indice est donc spécifique à un couple d'items donné.

Pour revenir au tableau de contingence pour des items à correction binaire,

Tableau XIII - Tableau de contingence pour deux items dichotomiques (rappel).

		Item <i>y</i>	
		raté	réussi
Item <i>x</i>	raté	a	b
	réussi	c	d

a = nombre des répondants ayant raté les items x et y .

b = nombre des répondants ayant raté l'item x et réussi l'item y .

c = nombre des répondants ayant réussi l'item x et raté l'item y .

d = nombre des répondants ayant réussi les items x et y .

l'indice de discrimination spécifique de y par rapport à x est alors donné par:

$$IDS_{y/x} = \frac{d}{c+d} - \frac{b}{a+b} \quad (\text{Eq. 5 Indice de discrimination spécifique})$$

Ainsi, pour donner un exemple concret, si 80 % des répondants qui réussissent la question 4 réussissent la question 10 alors que 30 % des répondants qui échouent la question 4 réussissent la question 10, l'indice de discrimination spécifique (IDS) sera de $80 - 30 = 50\%$. Toutefois, si on intervertit les proportions, l'IDS devient -50% . Une interprétation probabiliste de cette dernière valeur consisterait à affirmer qu'un étudiant ayant échoué la question 4 a plus de chance de réussir la question 10 qu'un étudiant ayant réussi la question 4 !

2.5.3 Indices de discrimination spécifique pondérés

Deux critiques principales peuvent être émises à l'égard de l'indice de discrimination spécifique: 1) comme le coefficient de corrélation, il est sujet à la même sensibilité à la réussite quasi unanime d'un item et, 2) fréquemment, le coefficient de corrélation et l'indice de discrimination spécifique ont des valeurs numériques similaires.

Le premier point peut être minimisé en ne conservant que les items réussis par un nombre raisonnable de répondants, c'est-à-dire éviter les situations de quasi unanimité dans la réussite ou dans l'échec. Pour la deuxième critique, les IDS ne pourront jamais être numériquement très différents du coefficient de corrélation de par leur construction mathématique. Rappelons néanmoins que les IDS ont l'avantage de permettre une interprétation intuitive aisée.

Il est cependant possible de construire les IDS selon une logique mathématique différente. Reprenons l'exemple donné dans la problématique considérant une population de 500 étudiants répondant à un questionnaire. Si on postule qu'on a plus confiance aux inférences faites à partir d'une question réussie par 200 étudiants qu'à celles issues d'une question réussie par 20 étudiants, on devrait accorder plus de poids à la première situation. Il est alors possible de créer un indice de discrimination spécifique pondéré (IDSP) de la façon suivante :

$$IDSP_{y/x} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\left[\frac{d}{c+d}d - \frac{b}{a+b}b \right]}{b+d} = \frac{\left[\frac{d^2}{c+d} - \frac{b^2}{a+b} \right]}{b+d} \text{ si } a+b \text{ et } c+d \neq 0; \\ \frac{\left[\frac{d^2}{c+d} \right]}{b+d} \text{ si } a+b = 0; \\ \frac{\left[-\frac{b^2}{a+b} \right]}{b+d} \text{ si } c+d = 0. \end{array} \right.$$

(Eq. 6 Indice de discrimination spécifique pondéré)

Pour revenir aux exemples donnés dans la problématique si, sur 500 répondants, tous réussissent à la fois les items x et y ($a = b = c = 0, d = 500$), le coefficient de corrélation est non défini ($r = 0/0$) mais l'IDSP vaut 1 par définition (cohérence parfaite).

Supposons maintenant que tous les répondants réussissent x mais que seulement la moitié réussissent y ($a = b = 0, c = d = 250$). La cohérence conceptuelle pourrait ainsi être postulée imparfaite. Toutefois, le coefficient de corrélation demeure également indéfini alors que l'IDSP devient égal à 0,5 ($r = 0/0, \text{IDSP} = 0,5$), ce qui correspond à la valeur attendue.

Supposons maintenant que tous les répondants ratent x mais que seulement la moitié réussissent y ($a = b = 250, c = d = 0$). La cohérence conceptuelle pourrait ainsi être postulée imparfaite et négative. En effet, on s'attendrait à ce que les répondants échouent tous à y si x se rapporte au même concept. Bien que démontrant un apprentissage, une réponse positive à y montre un manque de cohérence dans les conceptions des étudiants. Les coefficients générés sont alors : $r = 0/0, \text{IDSP} = -0,5$.

Si l'unanimité n'est pas atteinte, des taux de réussite élevés génèrent encore des coefficients de corrélation problématiques. Par exemple, lors d'une situation où la quasi unanimité des répondants a réussi à la fois les items x et y sauf un répondant qui les a raté tous les deux ($a = 1, b = c = 0, d = 499$), le coefficient de corrélation ainsi que l'IDSP valent alors un ($r = 1, \text{IDSP} = 1$). Cependant, si le même étudiant ayant raté x avait plutôt réussi y ($a = 0, b = 1, c = 0, d = 499$), le coefficient de corrélation aurait changé du tout-au-tout mais l'IDSP n'aurait changé que modérément ($r = 0/0, \text{IDSP} = 0,996$). Si l'on change maintenant les réponses de deux répondants seulement ($a = 0, b = 1, c = 1, d = 498$), le coefficient de corrélation change considérablement. Toutefois, l'IDSP ne chute que marginalement ($r = -0,002, \text{IDSP} = 0,994$).

2.5.4 Cohérences conceptuelles attendues

L'utilisation des tableaux de Burt, des IDS et des IDSP pour évaluer quantitativement les cohérences concomitantes et dichotomiques entraîne toutefois une surabondance d'information car toutes les combinaisons d'items génèrent des coefficients numériques et ce peu importe leur niveau de proximité conceptuelle. L'analyse des résultats doit donc tenir compte des cohérences anticipées entre divers items selon qu'ils partagent des principes communs. Toutefois, il demeure pertinent d'établir les coefficients numériques pour l'ensemble du test pour laisser la possibilité de voir émerger des indications de cohérences conceptuelles insoupçonnées.

Pour le FCI, les recoupements sont résumés aux tableaux IX et X de la section 2.4.2. Pour les deux instruments quantitatifs développés ab initio pour les concepts de laboratoire et décrits plus en détails dans les articles, les questions recoupées avec les grands thèmes sont indiquées aux tableaux XIV et XV.

Tableau XIV Classement des questions du questionnaire du second article.

Thème	Concepts	Questions
Incertitude instrumentale et expérimentale	Stratégies de réduction de l'incertitude	10 - 12 - 13 - 24
	Règles simples (* /)	1 - 8 - 10 - 13 - 23
	Instrumentale	2 - 4
	Méthodes des extrêmes	4 - 10 - 11
Modélisation graphique d'une fonction	Modélisation mathématique	3 - 5 - 14 - 15 - 17 - 22
	Choix du graphique approprié	9 - 19 - 22
	Graphique log-log	14
Contrôle des variable	Contrôle des variable	7 - 13 - 16 - 18 - 19 - 20 - 21
	vocabulaire	6

S'il est difficile de prévoir quels couples de questions généreront des IDS ou des IDSP élevés, on peut néanmoins prévoir que les couples 20 et 21 devraient être reliés étant donné que la question 21 contient une liste d'affirmation permettant de justifier le choix à la question 20. Certaines questions apparaissent deux fois dans la liste de part leur appartenance à deux thèmes. Le but principal de l'instrument développé pour le deuxième article est de vérifier si la maîtrise de l'incertitude est corrélée à la pensée logique. Le nombre peu élevé de questions ne permettant que peu de recoupement conceptuel, nous avons donc conçu un troisième instrument quantitatif qui sera analysé en profondeur dans le troisième article et portant toutes sur l'incertitude expérimentale. Les principaux thèmes couverts sont les suivants.

Tableau XV Classement des questions du questionnaire du troisième article.

Thème	Concepts	Questions
Incertitude expérimentale	Lecture sur un cadran gradué	2
	Incertitudes sur des mesures répétées	3 - 7
Propagation des incertitudes	Méthode des extrêmes	4 - 14
	Règles simples (+-)	8 - 13
	Règles simples (* /)	1 - 5 - 6 - 7 - 9 - 10 - 12
Budget des incertitudes	Chaîne de mesures	3 - 7 - 12
	Détermination de la mesure contribuant le plus à l'incertitude	5

Des recouvrements conceptuels sont donc attendus pour chacune des questions appartenant à une même catégorie intellectuelle. Ne voulant pas que le temps de passation du questionnaire soit trop long, nous avons limité le nombre de question ce qui implique que certaines questions n'ont pas de proches parents conceptuelles. Toutefois, comme l'entièreté du test porte sur la quantification de l'incertitude expérimentale, il faut s'attendre à ce que les indicateurs de cohérence conceptuelle développés pour cette thèse (IDS et IDSP) montrent des liens entre des questions apparemment non reliées l'une à l'autre par un concept commun.

2.5.5 Revue de la littérature

Comme nous l'avons mentionné, la cohérence conceptuelle intéresse beaucoup les psychologues et les philosophes. Toutefois, dans un esprit de concision, nous allons nous limiter, dans le cadre de cette revue de la littérature, aux divers moyens qui ont

préalablement été employés pour sonder la solidité du réseau conceptuel des étudiants en relation avec la physique newtonienne.

Un outil analytique pour détecter et quantifier les patrons de sélection des divers choix de réponses a été proposé par Lei Bao et Edward Redish (2001). Considérant un questionnaire comprenant des questions à m choix de réponses, un facteur de concentration peut être défini par:

$$C = \frac{\sqrt{m}}{\sqrt{m}-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^m n_i^2}{N} - \frac{1}{\sqrt{m}} \right) \quad (\text{Eq. 7 Facteur de concentration})$$

où N représente le nombre total de répondants et n_i le nombre de répondants ayant choisi le choix i pour une question donnée.

Une question dont un seul choix a été choisi unanimement aura un facteur de concentration de un et si tous les choix ont été choisis en proportions égales, C vaudra zéro. Selon les auteurs, on peut associer un modèle cognitif à une valeur donnée du facteur de concentration en association avec le taux de réussite à un item. Ainsi, une question bien réussie (taux de réussite $> 70\%$) associée à un facteur de concentration élevé ($>0,5$) représente une situation où un seul modèle cognitif correct émerge des réponses de la majorité des répondants. Dans la même veine, une question mal réussie (taux de réussite $< 40\%$) mais montrant un facteur de concentration élevé indique un modèle cognitif dominant mais incorrect. Les questions dont le facteur de concentration se situe dans un intervalle intermédiaire ($0,2 < C < 0,5$) mais dont le taux de réussite est supérieur à 40% montrent une situation où deux modèles cognitifs peuvent être identifiés.

Développant davantage cette notion de modèle, Lei Bao ainsi que Kristen Hogg et Dean Zollman, ont analysé plus en détails les réponses des étudiants à un questionnaire à choix de réponses issu du FCI mais ne traitant que de la troisième loi de Newton (Bao, Hogg et Zollman, 2002). Selon la séquence de réponses, chaque étudiant était catégorisé dans un des trois modèles suivants : M0 - modèle non newtonien (par exemple, absence de l'utilisation du concept de force dans les choix de réponses), M2 - modèle incorrect (par exemple, les plus gros objets exercent les forces les plus importantes) et finalement M1 - modèle correct. La troisième loi de Newton a été ainsi arbitrairement étudiée selon quatre grandes subdivisions: rôle de la vitesse, rôle de la masse, rôle de la poussée et rôle de l'accélération. Les réponses individuelles permettant un classement dans un des trois modèles précédents, un calcul du modèle de la population globale était effectué en calculant les valeurs propres et les vecteurs propres (*eigenvalues* et *eigenvectors*) de la matrice globale des distributions entre les différents modèles. Les modèles globaux peuvent alors donner une indication de la cohérence des réponses selon leur valeur numérique. Des modèles dont les valeurs propres sont très près d'être unanimement de type 2 ou 1 peuvent refléter une grande cohérence conceptuelle. Les auteurs ont ainsi détecté que des questions sur le rôle de la masse et de la vitesse entraînaient des réponses cohérentes mais incorrectes, tandis que le modèle global associé à l'accélération était largement correct et cohérent. Le rôle de la force n'a pas semblé être unanimement interprété de la même façon d'où l'observation que le portrait global qui se dégage est celui d'un modèle mixte.

Toutefois, certaines difficultés sont inhérentes à cette méthodologie quantitative. Premièrement, l'adhésion à un modèle ou un autre sur la base du choix sélectionné demeure entachée d'une bonne part d'arbitraire. Deuxièmement, il faut également lier les questions les unes aux autres sur la base d'une similitude des concepts de physique en jeu. Toutefois, cette ressemblance peut n'être apparente qu'au concepteur du test et demeure arbitraire. Troisièmement, le traitement mathématique depuis les réponses jusqu'aux valeurs propres de la matrice globale des répartitions entre les classes demeure ardu. Une telle

méthode apporte néanmoins l'avantage de s'intéresser à la cohérence interne des choix de réponses.

En mesure et évaluation, les outils précédents font partis de la grande famille des méthodes dites « classiques » d'analyse d'items. Toutefois, les spécialistes de la psychométrie actuelle font plutôt appel à d'autres méthodes qui sont issues de la théorie de la réponse aux items (TRI). Une revue de la littérature n'a permis de trouver qu'une seule référence où la cohérence conceptuelle a été spécifiquement traitée dans le cadre de cette famille de modèles psychométriques. Dans sa thèse de doctorat, Chung-Wei Huang (2003) a utilisé le modèle d'Anderson-Rasch (AR), qui permet de traiter des items polytomiques, pour analyser les réponses à un sous-ensemble de questions du FCI, principalement celles traitant de l'application de forces sur un corps (questions 5, 9, 18, 22 et 28). Selon Huang, l'utilisation du modèle AR a le grand avantage de pouvoir quantifier l'incertitude associée aux paramètres numériques décrivant les questions. Utilisant le même schème de classification que Bao, Hog et Zollman, Chung-Wei Huang a pu ainsi interpréter les résultats observés selon un modèle probabiliste; trois paramètres sont calculés pour chaque item, chacun d'entre eux étant associé à un des trois modèles (selon la terminologie de Huang : modèle 1 - aristotélien, modèle 2 - « impetussien » et modèle 3 - newtonien). La valeur numérique de ces paramètres est associée à la probabilité qu'un modèle particulier soit sélectionné. Ainsi en prétest, Huang a pu observer qu'un mode de pensée aristotélien était le plus probable d'être observé pour les items 5, 9 et 18. Chaque item et chaque participant peut ainsi se voir attribuer des paramètres numériques associés à la probabilité de choisir un modèle particulier. Cumulant les probabilités observées et moyennant sur les participants, Huang a pu établir que les modèles sélectionnés globalement variaient du prétest au post-test tel que l'indique le tableau XVI.

Tableau XVI - Modèles observés prétest/post-test (Huang, 2003) (1 = newtonien, 2 = impetus, 3 = aristotélicien).

	Item 5	Item 9	Item 18	Item 22	Item 28
Prétest	3	3	3	1	2
Post-test	2	3	1	1 ou 2	2

Huang a observé que les réponses des étudiants manquaient globalement de cohérence en post-test tel que l'illustre la variété de modèles inférés des réponses fournies (Huang, 2003, p. 108). On peut également constater que, question par question, un même étudiant montre des probabilités différentes de sélectionner un modèle newtonien (p. 105).

Malgré sa diffusion considérable dans le domaine de la psychométrie et son potentiel évident pour analyser les réponses issues de questionnaire tels le FCI, la TRI ne sera pas employée dans cette thèse. La TRI aurait entre autres permis d'attribuer des coefficients de facilité et de discrimination aux divers items qui aurait ainsi pu être classés objectivement. Elle aurait aussi permis d'obtenir un estimé de l'habileté des répondants. Toutefois, la maîtrise de la TRI demande un temps considérable et nous avons jugé préférable de nous en tenir à une exploration plus classique quitte à réanalyser les données subséquemment.

Ayant brossé un portrait des compétences attendues de la part de nos sujets, des instruments de mesure quantitatif développés et des diverses études pertinentes à notre sujet de recherche, établissons les questions sur lesquelles nous allons nous pencher plus en détail.

CHAPITRE 3 - QUESTIONS DE RECHERCHE

*«Cette question est tellement simple que même un enfant de cinq ans pourrait y répondre.
Qu'on aille me chercher un enfant de cinq ans !»*

Citation attribuée à Chico Marx

Duck soup

3.1 Type de recherche et questions principales

Étant donné son caractère spéculatif, la présente recherche est principalement exploratoire. L'absence de groupes de contrôle et de randomisation ne permettra pas de juger de l'efficacité d'un dispositif didactique particulier et le confinement, pour l'essentiel, de notre clientèle à une seule institution d'enseignement ne permettra pas de garantir la fidélité des inférences postulées. Toutefois, la méthodologie mixte employée (voir les deux chapitres suivants) et la taille respectable des échantillons pour l'instrument quantitatif, sont garantes que les moyens sont en place pour répondre à notre question de recherche principale : **est-il possible d'explorer la cohérence conceptuelle manifestée par un groupe d'étudiants par le biais de l'homogénéité interne de leurs choix de réponses à un test standardisé?** Naturellement, la question subsidiaire qui s'ensuit immédiatement est : **est-ce que le réseau conceptuel, spéculativement mis en lumière par l'analyse de l'homogénéité interne des choix de réponses à un test standardisé, est cohérent dans toutes ses dimensions?** Notre étude portera sur trois grands champs conceptuels: la mécanique newtonienne; l'interaction de trois compétences fondamentales en sciences expérimentales et la quantification de l'incertitude expérimentale.

3.2 Questions spécifiques

3.2.1 Mécanique newtonienne (article 1)

La principale question de recherche sera : **est-ce que les étudiants manifestent les mêmes difficultés ou conceptions erronées avant instruction pour des questions traitant de sujets similaires ?** Comme nous le verrons, les participants à cette étude ont déjà suivi un cours de mécanique newtonienne au secondaire, mais pour les besoins de cette présente étude, ils seront considérés comme novices.

3.2.2 Maturation de la pensée logique, de la pensée mathématique et quantification de l'incertitude expérimentale (article 2)

Comme l'illustre l'étude de Coletta et Phillips (2005) montrant une corrélation statistiquement significative entre le gain normalisé obtenu au FCI et le résultat obtenu au CTSR, il peut sembler une supposition raisonnable que la maîtrise d'habiletés intellectuelles propres au laboratoire soit liée au développement de la pensée formelle. Ceci mène à la question de recherche : **est-ce que l'habileté à quantifier l'incertitude expérimentale et l'habileté à associer un graphique à une fonction mathématique sont corrélées à l'habileté du contrôle des variables ?**

Le développement de la pensée logique évoluant avec le temps, il semble naturel de supposer que les étudiants plus âgés manifesteront plus d'aisance dans la pensée formelle d'où la question de recherche : **est-ce que la maîtrise de la pensée formelle est corrélée à l'âge des étudiants ?**

3.2.3 Étude détaillée des compétences en quantification de l'incertitude expérimentale (article 3)

Ayant étudié les liens potentiels entre les trois grandes habiletés énoncées à la section 3.2.2, il convient de poser un regard plus affiné sur une des principales lacunes manifestées par

des étudiants en sciences de la nature: la quantification de l'incertitude expérimentale. Puisque l'instrument précédemment construit comportait trois dimensions principales, il advient en contrepartie une perte de sensibilité au niveau de l'étude détaillée de chacune d'entre elles. Pour pallier à cette lacune, l'instrument quantitatif sera modifié pour ne comporter que des questions traitant de l'incertitude expérimentale. Nous espérons ainsi pouvoir répondre à la question de recherche suivante : **est-ce que les réponses indiquent que le réseau conceptuel inféré est cohérent ?** Pour mieux valider les inférences spéculatives, un instrument qualitatif permettra d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes: **est-ce que les étudiants ayant à réaliser une expérience de laboratoire semi dirigée où ils ont à quantifier l'incertitude expérimentale déploient des stratégies cohérentes avec celles qui leur ont été enseignées et est-ce que les principales difficultés identifiées par l'instrument quantitatif sont récurrentes dans un contexte réel ?**

3.3 Limites de cette recherche

Notre choix d'utiliser un instrument de mesure à choix de réponses entraîne inévitablement des pertes sur la qualité des inférences que nous pouvons faire sur les conceptions des étudiants. Le choix d'un distracteur donné peut s'être effectué au hasard. De plus, même si un distracteur a été choisi de bonne foi, ce peut être pour des raisons autres que celles supposées représenter la conception que reflète ce choix. Ce biais est inévitable mais est mitigé par les entrevues effectuées avec des étudiants lors de la conception de l'instrument de mesure.

Notre méthodologie qualitative entraîne inévitablement son lot de contraintes. La richesse des données issues d'une séance d'observation du fonctionnement d'une équipe d'étudiants réduit considérablement le nombre de sujets qu'il sera possible d'étudier. Ainsi, il sera impossible d'obtenir un échantillon représentatif de la population dans son ensemble.

Lors de l'analyse des instruments quantitatifs, toute corrélation observée même significative, devra être interprétée avec prudence car elle n'indique pas un lien de causalité mais simplement qu'il existe, peut-être, une cause commune aux deux phénomènes observés. Il se peut également que même une corrélation jugée statistiquement significative ne le soit que par hasard. Avec un seuil de signification à 5 % ($p < 0,05$), on s'attend à ce qu'un résultat statistiquement significatif sur 20 le soit dû au seul hasard.

Notre choix d'étudier les conceptions avancées de laboratoire et d'interprétation de graphiques d'étudiants collégiaux vient limiter notre population en rendant impossible une comparaison fidèle avec une population de niveau scolaire moins avancée. En mécanique newtonienne, la question se pose avec moins d'acuité, car les construits évalués font partis du cursus général au secondaire pour les étudiants se dirigeant vers une carrière dans un domaine scientifique.

CHAPITRE 4 - MÉTHODOLOGIE QUANTITATIVE

«Pour expliquer un brin de paille, il faut démonter tout l'univers»

Rémy de Gourmont

Comme nous l'avons vu dans le cadre théorique, des tests psychologiques tels l'évaluation du niveau de pensée (formelle ou concrète) sont basés sur des questionnaires écrits sous forme de questions à choix multiples. De façon similaire, Duane Deardorff (2001) et David Abbott (2003) ont conçu des sondes papiers-crayons sur divers concepts liés aux incertitudes expérimentales. Il est donc légitime de présumer que la conception d'un questionnaire validé (mais non standardisé) pourra faire ressortir les conceptions des étudiants sur chacun des trois thèmes de cette étude.

4.1 Processus itératif de confection des items

Pour respecter certains standards psychométriques de base, les questionnaires écrits ont été construits selon un processus itératif qui permet d'évaluer, objectivement ou subjectivement, sa validité, sa fidélité ainsi que la qualité intrinsèque des items et des distracteurs. Notons également que nous avons pris soin que les conditions logistiques soient optimales lors de la passation du questionnaire pour s'assurer que les inférences ne soient pas biaisées par des facteurs externes tels la fatigue ou l'absence d'un accès à une calculatrice. Ce processus itératif a respecté la structure suivante : confection des items, études pilotes, passation en grand groupe, analyse d'items. Nous étudierons en détail chaque élément de cette structure dans les prochaines sections.

4.1.1 Boucle itérative

La conception de l'instrument de mesure peut être résumée dans la figure 9. Partant de questions validées dans divers instruments ayant fait l'objet de publications dans des revues

spécialisées en didactique et de l'expérience personnelle de l'auteur, une version préliminaire était testée auprès d'experts et de novices. Les paramètres quantitatifs observés de l'analyse d'items des résultats de ces passations sont venus porter un éclairage sur l'instrument de mesure en général (durée minimale, facilité de repérer les questions, etc.) et sur les items en particulier. Ces observations ont été intégrées par la suite dans une version subséquente qui a subi le même cycle de validation. Ce processus itératif a permis, non pas d'arriver à un instrument de mesure parfait, mais à un instrument de mesure compréhensible pour les étudiants, se réalisant dans un temps raisonnable mais contenant assez d'items pour tenter des inférences et pour générer des paramètres de fidélité considérés acceptables.

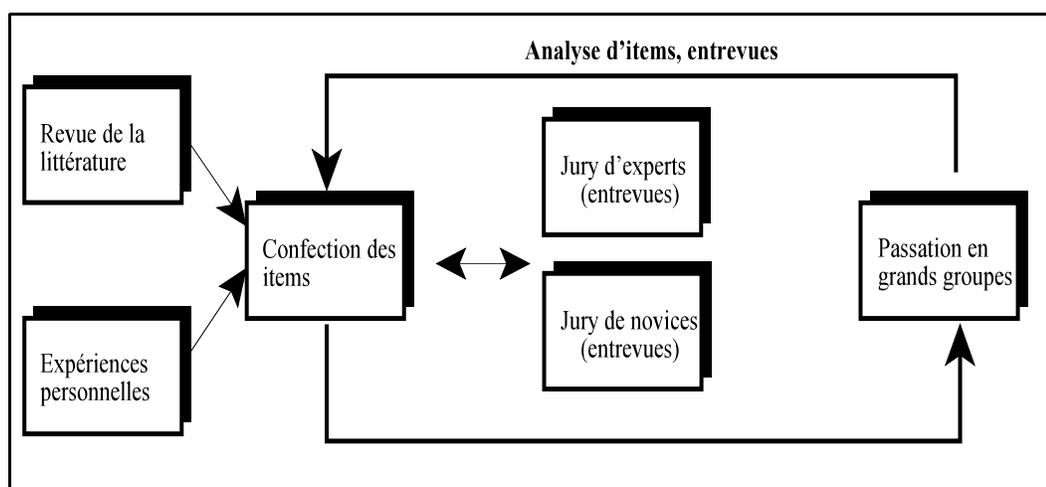


Figure 9 Processus itératif de construction de l'instrument de mesure.

Comme nous l'avons mentionné, les items ont été confectionnés à partir de deux grands types de sources : l'expérience personnelle du concepteur et des tests publiés dans des revues spécialisées en recherche sur l'enseignement. Cette manière de procéder permet une plus grande flexibilité dans la création d'un instrument de mesure novateur tout en conservant des bases de comparaison pour mettre en lumière d'éventuelles différences entre les

résultats obtenus à cet instrument de mesure et les résultats obtenus par d'autres instruments de mesure validés auprès d'une autre clientèle.

Les principales sources extérieures pour construire les items reliés au concept d'incertitude sont les tests proposés par Deardorff (2001) et Abbott (2003). Pour l'interprétation de graphiques, nous avons utilisé un item tiré de McKenzie et Padilla (1986). Nos principales sources documentaires pour élaborer les questions relatives au contrôle des variables proviennent de l'article de Kenneth Tobin et William Capie (1986) et de la banque d'items publics de l'enquête 2003 du TEIMS (Tendance de l'enquête internationale sur les mathématiques et les sciences). (Martin *et al.*, 2003).

Il est important de noter que, puisque notre instrument de mesure se doit d'être spécifique à certaines des sous-composantes des laboratoires, il ne sera fait aucun lien avec les concepts théoriques que les étudiants auraient pu étudier en classe.

Puisqu'un des instruments de mesure porte sur trois construits spécifiques (incertitudes, interprétation de graphiques et contrôle des variables), une répartition équitable entre ces sujets doit être respectée, le nombre d'items devant refléter adéquatement les apprentissages et les conceptions des étudiants mais, pour des raisons logistiques, faisant en sorte que la passation de l'instrument de mesure ne dure pas plus de 30 minutes. Les sections subséquentes décrivent les deux types de validations préalables à une version « finale » de l'instrument de mesure.

4.1.2 Études pilotes

Les études pilotes des instruments de mesure ont été menées auprès de deux types de clientèles: des experts des domaines à l'étude dans ce travail (des professeurs de niveau collégial) et des novices (des étudiants collégiaux). Suivant leurs commentaires, l'instrument de mesure a subi plusieurs cycles de validation.

4.1.2.1 Jury d'experts

Un jury d'expert constitué de 4 professeurs de cégep et possédant une longue expérience dans l'enseignement de la physique a été appelé à répondre indépendamment aux questionnaires puis a partagé avec l'auteur des difficultés rencontrées, que ce soit au niveau des concepts ou de la formulation des questions.

4.1.2.2 Jury de novices

Un jury de novices constitué d'une douzaine d'étudiantes et d'étudiants en première et en dernière session en Sciences de la nature dans les deux profils (sciences pures et sciences de la santé) a répondu indépendamment au questionnaire puis a transmis à l'auteur leurs commentaires sous une forme orale ou écrite (transmission anonyme des résultats commentés par écrit sur le questionnaire même.)

Des entretiens d'explicitations ont eu lieu avec des volontaires. Ces entretiens ont permis de mettre en lumière certains des processus cognitifs mis en branle pour répondre à chacune des questions. Ces entretiens étaient semi-structurés en ce sens qu'ils bifurquaient, selon les réponses des étudiants, vers des questions complémentaires, difficiles à prévoir au départ, permettant de préciser des détails qui auraient pu d'emblée paraître anodins. L'anonymat des participants à ces entretiens leur était assuré.

4.2 Aspects docimologiques

La docimologie est la «*science de la mesure et de l'évaluation en éducation qui a comme objets d'études l'élaboration d'instruments de mesure, l'interprétation des informations obtenues par la mesure, le comportement des examinés, de même que l'élaboration et la réalisation de plans d'évaluation.*» (Legendre, 1993). Un instrument de mesure tel que celui développé dans ce travail doit rencontrer des critères plus sévères que ceux que l'on impose

aux examens traditionnels de fin d'étapes pour que les lecteurs indépendants puissent juger de la qualité des résultats obtenus. Idéalement, nous devrions développer un instrument de mesure qui serait considéré comme un test (comme le test de QI), c'est-à-dire avec un haut taux de fidélité, mais il est utopique d'y parvenir parfaitement, d'où la justification de n'avoir pas employé ce terme jusqu'à présent et d'avoir plutôt utilisé l'expression plus neutre: instrument de mesure.

Les deux principaux critères docimologiques de la qualité d'un instrument de mesure à générer des résultats pertinents sont la validité et la fidélité. Ils seront élaborés dans les sections suivantes.

4.2.1 Validité de contenu

La validité de contenu est une caractéristique fondamentale d'un test mais elle ne peut être établie que par un groupe de spécialistes indépendants qui donnent leur avis sur le thème des questions, leur niveau de formulation, leur aptitude à couvrir adéquatement la matière cible et la qualité des informations qui y sont contenus.

4.2.2 Validité de forme

La validité de forme est liée à la présentation du test et au style des questions. Est-ce que les verbes sont tous au même temps ? Est-ce que les phrases sont toutes de nature affirmatives ? Y a-t-il passage de la voie active à la voie passive ? Le vocabulaire employé est-il approprié pour l'âge des étudiants ?

Il n'y a pas de grille d'analyse universelle pour s'assurer de la validité de forme d'un questionnaire mais une analyse critique est importante pour s'assurer que les réponses des étudiants reflètent bien leur interprétation de la question. Par exemple, lors des élections présidentielles américaines de 2000, certains comtés de la Floride ont utilisé un bulletin de vote dit papillon (voir la figure 10), où les noms des candidats étaient disposés en alternance

de chaque côté du bulletin de vote. Les résultats serrés de l'élection ont entraîné la remise en question de la représentativité des résultats enregistrés. Les gens ont-ils tous bien votés pour le candidat de leur choix ? Pour tester cette hypothèse, une équipe de scientifiques canadiens a repris le format du bulletin papillon mais en remplaçant le nom des candidats par celui des chefs des partis nationaux canadiens. Ils ont fait voter des étudiants universitaires et des consommateurs dans un centre d'achats de Calgary. Les étudiants universitaires n'ont pas fait d'erreur mais 8% des gens du centre d'achats ont voté pour Joe Clark alors qu'ils pensaient voter pour Jean Chrétien ! (Sinclair, 2000).

(CANADIAN ALLIANCE)			
STOCKWELL DAY 3→	⊙	(PROGRESSIVE CONSERVATIVE)	
(LIBERAL)	●	←4 JOE CLARK	
JEAN CHRETIEN 5→	⊙	(COMMUNIST)	
(NEW DEMOCRATIC)	⊙	←6 MIGUEL FIGUEROA	
ALEXA MCDONOUGH 7→	⊙	(BLOC QUEBECOIS)	
(GREEN)	⊙	←8 GILLES DUCEPPE	
JOAN RUSSOW 9→	⊙	(CANADIAN ACTION)	
(NATURAL LAW)	⊙	←10 PAUL HELL YER	
NEIL PATERSON 11→	⊙	WRITE IN CANDIDATE	
(LIBERTARIAN)	⊙		
JEAN-S BRISSON 13→	⊙		

Figure 10 Bulletin papillon

4.2.3 Fidélité

La deuxième notion centrale en mesure et évaluation est la fidélité. Dans le cadre d'une évaluation normative, ce concept, souvent mal compris, porte sur l'aptitude d'un test à générer un classement identique des individus ayant été soumis au test s'ils devaient subir un test équivalent une deuxième fois.

Dans le contexte d'une évaluation critériée, la fidélité d'un test est sensée représenter son aptitude à évaluer correctement le niveau de maîtrise des concepts couverts par le test. Dans ce contexte, il est impératif que le test ait été d'abord validé par une équipe de spécialistes disciplinaires, sinon le test pourrait présenter une fidélité normative sans refléter fidèlement les apprentissages des étudiants. Nous appellerons fidélité critériée cette aptitude à évaluer la dimension cognitive.

Classiquement, la fidélité est évaluée par des passations rapprochées temporellement de versions postulées parallèles de l'instrument de mesure (test-retest). Évidemment, la difficulté logistique d'une passation multiple, surtout avec de grands groupes, rend complexe la mise en oeuvre opérationnelle d'un test-retest et des effets d'habituation (passer deux fois un test similaire) viennent mitiger la qualité des comparaisons entre les différentes versions, qui, de plus, devront avoir été standardisées indépendamment. Pour contourner ces contre-indications, on peut, au sein du même test, insérer des items postulés parallèles en fidélité (c'est-à-dire qui devraient générer le même classement des étudiants), en contenu, (couvrant le même sujet) et en validité, (ne présentant pas de différences significatives de forme ou de présentation). Dans le présent travail, seule la cohérence inter-items pourra être effectivement mesurée car il est extrêmement difficile de concevoir des versions parallèles postulées identiques sur un sujet aussi mal défini que le concept d'incertitude. Le coefficient de corrélation entre les réponses à ces items donne une indication de leur précision à mesurer ce qu'elles sont sensées mesurer et peut déterminer si les étudiants ont répondu au hasard.

Un autre outil à notre disposition pour porter un regard critique sur la fidélité est le coefficient α (alpha) de Cronbach (1951) (ou de Cronbach-Guttman selon les auteurs. Notons que M. Cronbach lui-même ne s'attribue pas la paternité de ce coefficient qui est inspiré des travaux de Fisher et d'autres statisticiens et psychométriciens. « *It is an embarrassment to me that the formula became conventionally known as Cronbach's α* », (Cronbach et Shavelson, 2004)). Il n'y a pas de critères universellement acceptés pour une valeur minimale de α mais des valeurs supérieures à 0,7 sont souhaitées et préférablement supérieures à 0,8.

4.2.4 Analyse d'items

Puisque ce test n'a pas pour objectif de classer les étudiants mais d'étudier leurs conceptions, il paraît important d'analyser les choix des étudiants et leur «cohérence». À cet effet une analyse classique d'items convient parfaitement.

Nous désirons connaître, pour chaque item, le tableau de fréquence de la répartition des choix entre les différents distracteurs. Il serait aussi utile de connaître la contribution de chaque item au coefficient α ; pour cela, le coefficient α sera calculé pour tout l'examen en retirant cet item.

Un autre paramètre important en analyse classique d'items est la corrélation bisériale de point qui représente la corrélation entre le résultat à un item donné et le résultat global. La définition technique de ce paramètre est donnée à l'annexe 1 mais il s'agit en fait du coefficient de corrélation de Pearson; $\rho_{AB} = \text{COV}_{AB}/(S_A S_B)$ où COV_{AB} représente la covariance entre les variables A et B et S_x représente l'écart-type de la variable x (Howell, 1998). À ce titre, la corrélation bisériale de point est fréquemment employée comme indice de discrimination. On s'attend en effet à ce que les étudiants qui ratent un item aient un mauvais score à l'examen et à ce que ceux qui le réussissent aient un bon score. Cependant,

si la plupart des étudiants ayant obtenu un bon score global ratent cet item et que ceux qui ont obtenu un mauvais score global le réussissent, la corrélation s'avérerait négative.

Il existe également une autre manière de calculer un indice de discrimination (il en existe plusieurs en fait, mais elles ne seront pas énumérées ici); il s'agit de regarder séparément la différence de performance, item par item, entre les étudiants s'étant classés parmi le quart supérieur (*haut*) dans la distribution des notes et ceux s'étant classés dans le quart inférieur (*bas*). (les puristes suggèrent de ne conserver que les étudiants appartenant aux 27% supérieurs et inférieurs mais un tel degré de précision ne se répercute pas sur les coefficients obtenus et d'autres définitions des seuils délimitant les niveaux inférieurs et supérieurs sont admis, voir Laurier, 2005, p.98). L'indice de discrimination se définit alors comme la différence entre la proportion des *hauts* ayant réussi l'item moins la proportion des *bas* ayant réussi l'item. Supposons que sur une population donnée, huit étudiants soient classés *haut* et sept *bas*. L'item 1 a été réussi par six *hauts* et deux *bas*. L'indice de discrimination est alors de $6/8 - 2/7 = 0,46$. Un indice de discrimination se situant aux alentours de 0,5 est généralement souhaité. Les deux façons, indice de discrimination et corrélation bisériale de point, donnent des résultats similaires pour des populations nombreuses ($n > 30$ environ). En résumé, le coefficient de discrimination est défini par:

$$\text{Disc.} = \left(\frac{N_{\text{hauts-corrects}}}{N_{\text{hauts-total}}} \right) - \left(\frac{N_{\text{bas-corrects}}}{N_{\text{bas-total}}} \right) \quad (\text{Eq. 8 Coefficient de discrimination}).$$

La performance de chaque distracteur mérite aussi notre attention. Il est possible de calculer la corrélation bisériale de point pour chaque distracteur de chaque item. Pour le choix de réponse correspondant à la clé de correction, nous obtiendrons le résultat établi au paragraphe précédent, c'est-à-dire la corrélation entre l'item et le score. Pour les distracteurs (les mauvaises réponses), on s'attend à obtenir des nombres négatifs. Un résultat fortement positif pour un des distracteurs signale un problème et les distracteurs devraient être réécrits

ou l'item retiré de l'examen. Cependant, ces dernières affirmations doivent être nuancées selon la confiance du concepteur de l'examen en la validité de l'item. Peut-être est-il parfaitement valide mais raté pour des raisons liées à un enseignement superficiel, voire faux, de la notion impliquée. Il est alors nécessaire de conserver l'item pour que des passations ultérieures ou auprès de groupes expérimentaux différents puissent indiquer une évolution conceptuelle chez les apprenants. Que l'on prenne pour exemple, la notion de conservation de la masse qui n'apparaît qu'au stade opératoire concret selon la typologie piagétienne déjà invoquée. Une question sur ce concept serait majoritairement ratée par des enfants de quatre ans mais réussie par des enfants de huit ans. Selon le jugement averti d'un expérimentateur expérimenté, un tel ratage par des enfants de bas âge ne remettrait pas du tout en cause un item donné, à la condition qu'il lui prête une confiance tirée de sa validité intrinsèque.

4.2.5 Conception d'un programme d'analyse (classique) d'items

Pour faciliter le traitement des données, un outil informatique, programmé en VBA (*Visual Basic for Application*) en tant que macro complémentaire de Microsoft Excel, a été développé (une macro étant une suite d'actions pré-programmées.) Cette macro permet deux types d'analyses: une analyse classique d'items et une analyse introspective des choix des étudiants. Si de nombreux programmes informatiques existent pour le premier type d'analyse, aucun d'entre eux ne fait ce qui constituait un des objectifs initiaux de ce présent travail : l'analyse simultanée des sous-parties d'un questionnaire comportant des items cognitifs, des items de mise en rang et des items d'appréciation de type Likert. Si une étude de ce genre fut finalement écartée pour pouvoir mieux tester les concepts plus quantitatifs, la création d'un outil d'analyse versatile et d'une disponibilité aisée vu son imbrication dans le chiffrier Excel largement répandu nous semble une contribution significative à la communauté de recherche qui pourra en disposer.

La macro d'analyse classique d'items a été validée en comparant les résultats obtenus à ceux générés par des programmes existants et bien établis tels SPSS. Ce processus est malheureusement incomplet de par son essence même; la raison première de la création de la macro est l'incomplétude de programmes tels SPSS pour faire une analyse d'items détaillée. Les résultats obtenus ont donc été également calculés manuellement pour vérifier leur exactitude. Cette validation a suivi plusieurs cycles similaires à ceux évoqués pour la conception de l'instrument de mesure. Différents scénarios de données fictives ont simulé des conditions extrêmes et ont permis de détecter des malfonctionnements ou des anomalies.

Une des contributions de cette thèse à l'analyse classique d'items est le déploiement d'une routine d'analyse informatisée qui met en lumière la cohérence des choix des étudiants (les principales caractéristiques du programme informatique développé à cette fin sont indiquées aux annexes 3, 9 et 10) par la mise en tableau des fréquences associées à la sélection commune de deux distracteurs. Cette matrice est appelée matrice des co-occurrences ou tableau de Burt.

L'utilisation des tableaux de Burt n'est pas une nouveauté, mais une recherche exhaustive de la littérature n'a pas permis de trouver d'utilisation récente en sciences de l'éducation de ce type de tableaux de fréquences qui comptabilisent les choix des étudiants en fonction de leur sélection d'un leurre particulier. En didactique, les tableaux de Burt peuvent s'avérer instructif pour vérifier la cohérence des conceptions présumées des étudiants au travers d'un examen. Par exemple, si le leurre B de la question 5 est une manifestation présumée de la conception (fausse) que lors d'un impact frontal, le corps le plus massif subit la plus petite force, on devrait s'attendre à ce que les étudiants qui choisissent ce leurre soient cohérents en sélectionnant subséquentment des leures impliquant la même conception erronée. Malheureusement, les programmes d'analyse ne produisent que des tableaux de fréquence

ne contenant que la proportion des étudiants ayant choisi un leurre donné; toute comparaison avec des choix antérieurs ou postérieurs étant perdue.

4.3 Clientèle visée et échantillonnage

Les étudiants participants à cette étude proviennent d'une clientèle d'étudiants et d'étudiantes remarquablement homogène en âge. Cet aspect trouve son importance dans le postulat que le développement de la pensée formelle est corrélé à l'âge chronologique même au-delà du seuil indicatif de 14 ans pour atteindre la pensée formelle. Des clientèles inhomogènes en âge viendraient affaiblir les inférences éventuelles d'un design prétest / post-test bien qu'il ne s'agisse pas de ce type d'étude dans le présent travail.

Notre clientèle est constituée d'étudiants inscrits en Sciences de la nature dans un cégep ayant une bonne réputation et des critères d'admission sévères; les résultats au secondaire ayant donc été excellents. Les étudiants manifestant généralement de bonnes aptitudes académiques. Il s'agit d'une clientèle fortement pluriethnique et mixte dont l'âge varie entre 17 et 19 ans.

Pour la passation de l'instrument de mesure, des étudiants de deuxième session et de quatrième session ont été recrutés sur une base volontaire. Ils ont répondu en classe, durant les heures régulières, sur des feuilles de marquage pour lecture optique des inscriptions. Entre 100 et 200 étudiants de chaque catégorie (2^e et 4^e session) ont pris part à cette étude lors du premier cours de la session (moment le plus propice, selon l'avis même des professeurs concernés, pour la passation de l'examen. La course contre la montre n'y étant pas encore engagée dans toute son ampleur.) Ils n'ont pas repassé l'instrument de mesure à la fin de la session.

CHAPITRE 5 - MÉTHODOLOGIE QUALITATIVE

«Que préférez vous: une pureté de 99% garantie à 100 % ou une pureté de 100% garantie à 99% ?»

Garratt, Overton et Threlfall, 1999

A question of chemistry (Longmans, Harlow)

L'approche quantitative décrite précédemment comporte maints avantages: potentialité d'inférences statistiques sur de grandes populations, extraction d'invariants cognitifs (ou à tout le moins, des récurrences typiques), mise en lumière de corrélations insoupçonnées, analyse des correspondances, etc. Toutefois, il demeure des limites inhérentes à ce mode d'évaluation : sélection d'un distracteur pour une raison toute autre que celle postulée par le concepteur de l'item, réponses guidées par le hasard, etc. Toute induction d'une intentionnalité de la part du sujet issue de l'analyse des réponses aux items demeure spéculative et sujette à caution. Il apparaît donc judicieux de contraster toute théorisation de la capacité des étudiants en sciences de la nature à interpréter « correctement » des données expérimentales, déduite de l'analyse des réponses quantitatives, aux pratiques réellement déployées par ces mêmes étudiants en situation de laboratoire.

Ce dernier type de méthode de recherche se situe dans la grande famille des méthodes qualitatives qui sont utilisées par un ensemble hétéroclite de disciplines (ethnologie, sociologie, marketing, ...) dont le matériau de recherche n'est pas les chiffres mais des objets non numériques (paroles, écrits, gestes). Ces disciplines s'appuient sur des théories diverses mais toutes vont se servir de méthodes communes qui permettent la production, le traitement et l'analyse de données non numériques dont l'interprétation se fonde sur un modèle théorique pré-existant à la collecte des données dans le cadre d'une recherche inductive.

Précédemment, nous avons adopté le paradigme des stades de Piaget pour tenter une théorisation des résultats potentiels. Ce modèle interprétatif sera gardé en toile de fond mais ne sera pas saillant dans cette partie qualitative car la nature didactique de ce travail impose de porter un regard moins psychologique que praxéologique qui pourra bénéficier à l'ingénierie didactique de situation- problèmes en laboratoire propices à faire évoluer les conceptions des étudiants.

Quelles sont les observables dont a besoin la didactique des sciences? Il faut préalablement dresser un inventaire aussi complet que possible des conceptions préalables des étudiants. Celles-ci font souvent obstacle à un apprentissage en profondeur en agissant comme des croyances intimes, mais non nécessairement articulées, qui sont protégées par un garde-fou implicite. Si ces croyances sont profondément ancrées dans le réseau conceptuel préalable de l'apprenant, il est probable que les notions enseignées s'y superposent sans jamais les remplacer. L'évanescence des apprentissages académiques avec le temps laisse derrière un réseau conceptuel qui aura peu évolué, à condition bien sûr qu'il n'y ait pas eu de remise en question des conceptions initiales.

Ce modèle didactique qui impose de partir des conceptions initiales des apprenants se bute toutefois à deux principales difficultés: il est illusoire de prétendre inventorier l'ensemble de ces conceptions dites naïves ou spontanées et, il faudrait idéalement créer un programme didactique propre à chaque étudiant. Fort heureusement, les nombreuses études en didactique des sciences portant sur les conceptions initiales des étudiants ont fait ressortir maintes conceptions récurrentes. Par exemple, en physique mécanique, la croyance en la nécessité d'une force (ou d'un agent moteur) pour maintenir une vitesse.

Malheureusement, au niveau des laboratoires, tel que mentionné dans les chapitres précédents, de telles études demeurent lacunaires et nous ne possédons que peu

d'informations sur les conceptions des étudiants. Ceci est d'autant plus vrai si on considère des étudiants de niveau avancé (collégial ou universitaire) et à propos d'aspects qui peuvent, à prime abord, paraître pointus tel la maîtrise de l'algorithme de propagation des incertitudes. Cette spécialisation demeure une apparence car le calcul d'incertitude, tout comme le contrôle des variables et la dialectique fonction-graphique, sont des habiletés transdisciplinaires. Pour des étudiants en sciences de niveau post-secondaire, ces habiletés deviennent des notions de base applicables à une multitude de facettes de l'activité scientifique expérimentale.

Comme nous l'avons vu dans la section 2.3, l'étude des conduites d'étudiants universitaires français (Séré, Journeaux et Larché, 1993) a montré de nombreuses incongruités entre leur fonctionnement réel en laboratoire et celui attendu. Par exemple, même si le protocole expérimental stipulait d'évaluer l'incertitude sur les données, de nombreux étudiants passaient outre. Abbott (2003) avait également observé de nombreuses incohérences dans les pratiques; notamment, des étudiants cumulant spontanément les feuilles d'un livre pour en estimer l'épaisseur ne reproduisaient pas cette méthode pour mesurer l'épaisseur d'une disquette faisant partie d'une pile de disquettes. Cette observation mena Abbott à remettre en question la taxonomie de Lubben et Millar (1996) selon laquelle les étudiants peuvent être classés en deux groupes selon leur conviction en la nécessité de cumuler des observations ou leur conviction qu'une seule donnée expérimentale suffit (*point/set paradigm*).

Cependant, l'étude de Séré n'était pas issue d'un protocole de recherche didactique spécifiquement dédié à la mise en lumière des conceptions des étudiants mais provenait plutôt d'un cumul observations de professeurs de physique donnant les laboratoires habituels. De même, si Abbott a observé les conduites d'étudiants, ces observations demeurent anecdotiques et ont constitué une partie relativement congrue de sa thèse. Il appert donc que la conception d'un protocole, bien ciblé et ficelé au niveau didactique,

d'observation de comportements in situ d'étudiants de niveau collégial résolvant un problème de nature expérimentale permettrait de dégager certaines tendances au niveau de leurs procédures spontanées pour recueillir et traiter des données.

5.1 Objectifs

Selon Vermersch (1984), « *il nous semble que si l'on veut véritablement étudier le fonctionnement cognitif, il est nécessaire d'analyser dans le détail le déroulement de la conduite* ». Les objectifs poursuivis sont donc doubles: 1) analyser les comportements idiosyncratiques d'étudiants collégiaux en science de la nature ayant à résoudre un problème de nature expérimentale; 2) Inférer un modèle explicatif sous-jacent aux conduites observées, c'est-à-dire inférer un modèle du fonctionnement cognitif menant aux observables. Comme nous le verrons dans le troisième article, il émergera de ce modèle explicatif l'identification d'obstacles cognitifs et de préconceptions qui devront être prises en compte dans l'élaboration de séquences didactiques dédiées à l'apprentissage de la quantification de l'incertitude expérimentale, à la mise en oeuvre d'un contrôle des variables adéquat et rationnel ainsi qu'à bonifier l'interface cognitive entre un modèle mathématique et la représentation graphique des données issues de l'expérience. Ces deux objectifs représentent la démarcation nécessaire entre deux des principaux moments de toute méthodologie quantitative: la codification, quasi a-priori, des données brutes (condensation, traitement) qui mène à l'*analyse* et le regard théorique sur les résultats obtenus dans le cadre d'un modèle interprétatif donc l'*interprétation* (Van der Maren, 1995).

Les observables analysées étant les gestes posés et leur enchaînement, il est nécessaire de planifier une situation de laboratoire propice à faire émerger des comportements observables menant à une interprétation théorique. Cette description fait l'objet de la prochaine section.

5.2 Aperçu méthodologique

L'annexe 5 présente le problème expérimental présenté aux étudiants. Il s'agit d'une situation expérimentale, qu'ils n'ont jamais rencontrée, nécessitant du matériel familier dans un environnement connu (un laboratoire de science dans leur institution d'enseignement d'attache). Le problème met clairement en évidence l'incertitude sur la valeur cible qu'ils devraient retrouver. Cependant, aucun protocole détaillé n'est proposé.

Encore une fois, les participants ont été recrutés sur une base volontaire parmi des finissants (4^e session) en sciences de la nature. Chaque dyade fonctionnait en autarcie mais avec libre accès au chercheur qui est demeuré présent tout au long de l'activité et à plusieurs sources documentaires si besoin est. Chaque séance a duré 60 minutes composées de 50 minutes de manipulations autonomes et de 10 minutes d'entretiens d'explicitation. Lors des manipulations autonomes, la communication entre le chercheur et les participants s'est limitée à une assistance ponctuelle afin d'éviter que les dyades ne s'enferment dans un cul-de-sac. Par exemple, comme l'utilisation de la balance numérique implique de calibrer au préalable l'affichage, le chercheur a assisté une équipe, à sa demande, ignorant la procédure à employer. Au niveau notionnel, le chercheur est également intervenu pour assister une équipe qui a réclamé de l'assistance pour isoler le coefficient de viscosité de l'équation théorique (voir annexes 4 et 5); cette situation se produisant si l'équipe omet de faire un schéma approprié des forces s'appliquant sur les billes lors de leur descente dans le liquide. Toutefois, le chercheur n'est intervenu en aucune façon pour guider ou interférer avec les choix métrologiques des équipes. Elles ont eu toute latitude pour explorer des modalités diverses de prise de mesure. Chaque séance a été filmée, avec le consentement écrit des étudiants, tous majeurs (un certificat d'éthique a été mis par le comité plurifacultaire d'éthique de la recherche).

Chaque séance a été suivie d'un entretien d'explicitation dont le but était d'inférer les démarches et les processus intellectuels qui ont guidé l'action des sujets. Pour atteindre cet

objectif, Pierre Vermersch propose diverses techniques de dialogue qui sont propices à faire émerger l'implicite, le non-formalisé, par les sujets (Vermersch,2006). « *Ce qui est recherché dans le questionnement d'explicitation, c'est que le sujet soit dans une position de parole incarnée, en évocation vivace de sa propre action de manière à ce qu'il ne verbalise pas sa théorie sur la façon dont il procède, ni qu'il nous donne une recette générale, ou un discours schématique, mais bien la description de l'action effectivement mise en œuvre dans une occasion singulière.* » (Vermersch, 1996, P. 46).

Cette technique d'entretien se fonde sur la dissymétrie entre les motifs évoqués a posteriori pour justifier une séquence d'actions et de décisions et les processus intellectuels non-formalisés et sous-jacents réellement mis en oeuvre. Pour éviter que le sujet ne « théorise » ses actions après coup, il est préférable de situer l'entretien sur les actions elles-mêmes; du « comment » devrait émerger le « pourquoi ». Par exemple, si le sujet évoque une intention ou un but, on peut demander à la personne « *pour réaliser cette intention (ce but), qu'est-ce que vous faites précisément ? Par quoi est-ce que vous commencez ? À quoi reconnaitrez-vous que ce but est atteint ?* » (Vermersh, 1996, p.51).

Pour mener un entretien d'explicitation, l'intervieweur doit maîtriser certaines techniques de base. Il faut premièrement qu'un contrat de communication soit établi au préalable et soit renouvelé autant que nécessaire durant l'entretien si des difficultés surgissent. Une relation de confiance intervieweur-interviewé basée sur un contrat de communication explicite, ou partiellement explicite, est une condition sine qua non pour préparer un terrain propice à la verbalisation des pratiques. L'absence d'un contrat de communication peut chez le sujet, de manière explicite ou implicite, faire surgir des mécanismes de défense naturelle agissant comme autant barrières psychologiques. Le sujet de l'entrevue doit demeurer conscient de ce qui est attendu de lui et des limites inhérentes aux sollicitations demandées. Dans un entretien d'explicitation, le sujet doit être conscient formellement qu'il est attendu qu'il verbalise ses conduites; par conséquent, tout glissement vers des considérations émotives

sera évité de même que la recherche introspective de la justification des actions. Ce contrat doit être renouvelé au besoin si l'intervieweur perçoit une difficulté inattendue, par exemple *« je n'ai pas complètement compris comment vous vous y prenez, seriez-vous d'accord pour le reprendre de manière plus détaillée ? »*

L'intervieweur se doit également d'adopter des techniques de synchronisations posturales aptes à établir la communication. Il est souhaitable que l'intervieweur utilise un rythme et un ton de la voix qui s'adapte au sujet, sans le singer. Les silences du sujet doivent être respectés s'ils représentent des mises en évocation et il convient d'utiliser un timbre de voix doux et calme pour guider le sujet dans son cheminement intérieur. Il faudrait de même synchroniser sa posture avec celle du sujet, sans que celui-ci ne se sente caricaturé.

Le principal rôle de l'intervieweur n'est pas de mener un entretien mais de guider le sujet vers l'évocation des vécus par des relances appropriées en respectant quatre grands principes de base: 1) Guider le rappel vers une situation spécifiée. 2) Guider vers l'évocation sensorielle. 3) Éviter toute recherche volontaire directe du contenu à rappeler. 4) Assurer un guidage avec un fractionnement assez fin (Vermersh, 1996, p.97). Ces relances peuvent être réparties en trois grandes catégories: focaliser, élucider et réguler.

Les relances de focalisation servent à revenir vers une information déjà formulée mais qui n'avait pas été traitée avec toute la finesse nécessaire. Elles permettent également de proposer des thèmes ou des sujets qui n'ont pas été abordés mais qui sembleraient pertinents à l'intervieweur. Celui-ci doit donc disposer d'une « carte » conceptuelle préalable. Elles peuvent aussi offrir la possibilité à l'interviewé d'aller traiter de situations qui lui paraissent pertinentes. Ces relances permettent donc d'aborder de nouvelles situations.

Les relances d'élucidation guident l'interviewé vers une description plus précise des actions. L'information contenue dans la réponse est pertinente mais manque de finesse dans les détails. Les relances d'élucidation peuvent aussi être axées vers la clarification des énoncés pour pallier à des omissions, des imprécisions ou des généralisations.

Les relances de régulation doivent être employées si les informations recueillies deviennent non pertinentes dans le cadre de contrat de communication donc si la communication a dévié vers un but tout autre que celui poursuivi initialement. Il appert alors de vérifier si les conditions de l'explicitation sont toujours présentes. Si l'interviewé est toujours d'accord pour verbaliser (renégociation du contrat de communication au besoin) ou s'il n'a pas de problèmes particulier pour faire l'expérience de sa propre pensée (Vermersh, 1996, p.121).

De manière générale les relances doivent faciliter la prise de parole du sujet en la gardant sur le terrain de l'évocation. Les questions basées sur le pourquoi sont donc soigneusement évitées dans les temps d'explicitation. Il ne faut pas interroger sur les processus cognitifs à l'oeuvre car ceux-ci sont inobservables. Des traces recueillies (paroles, gestes, écrits), l'observateur pourra inférer une conceptualisation mais celle-ci ne pourra provenir du sujet. Les relances doivent donc porter sur des actions: « *Par quoi avez-vous commencé ? Qu'avez-vous fait en dernier ?* » ou sur des exécutions: « *Comment saviez-vous que c'était x qui devait être fait ? À quoi avez-vous reconnu par quoi commencer ?* ». Diverses techniques peuvent être employées dont la reformulation en écho qui reprend les dernières paroles de l'interviewé pour lui donner l'occasion d'explicitier sa pensée ou la relance à partir des dénégations qui s'apparentent à des résistances: « *Je ne sais pas ce que j'ai fait, j'ai fait n'importe quoi. Je n'ai rien compris.* » Il peut convenir, dans une telle situation de renégocier le contrat de communication. Toutefois, ces dénégations contiennent en latence des éléments d'information factuels qu'il est possible de faire émerger : « *De quoi te rappelles-tu quand tu ne te rappelles pas ?* »

5.3 Entretiens d'explicitation

Les entretiens d'explicitations se sont déroulés selon un canevas semi-structuré qui tenait largement compte des particularités de la méthode mise en oeuvre par la dyade. Tel que mentionné, le but était de mettre les participants en évocation. Les principales questions posées par le chercheur visaient en faire mettre en parole les processus ayant mené aux divers choix métrologiques. Les principales questions et relances furent les suivantes :

« *Qu'avez-vous fait pour estimer l'incertitude sur la mesure de la position (la masse, le temps, la distance, le diamètre) ?* »

« *Qu'avez-vous fait pour améliorer votre mesure ?* »

« *Qu'avez-vous fait pour minimiser l'incertitude sur ... ?* »

« *Vous avez-choisi d'utiliser la méthode des extrêmes (des dérivées partielles, des règles simples) pour estimer l'incertitude, qu'est-ce qui vous a guidé vers ce choix ?* »

« *Si vous aviez une amélioration à apporter à cette expérience, y a-t-il un paramètre, selon l'expérience telle que vous venez de la vivre, sur lequel un chercheur devrait se pencher en premier ?* »

« *Qu'est-ce qui vous a motivé de faire une série de mesures plutôt qu'une mesure unique ?* »

Les entretiens ne duraient généralement pas plus de cinq minutes étant donné la proportion considérable occupée par les manipulations et les calculs dans la période de 60 minutes dévolue à l'activité. Les principales conclusions seront mentionnées dans le troisième article et dans la discussion générale.

5.4 Articulation des méthodes

Nos trois méthodes pour susciter des données qualitatives (enregistrements vidéos, traces écrites, entretiens d'explicitations) permettent une triangulation restreinte des informations recueillies, c'est-à-dire une évaluation approximative de la fidélité des traces. La

comparaison entre les obstacles identifiés dans la méthodologie qualitative et les résultats au questionnaire de la portion quantitative de cette thèse permet une triangulation élargie, c'est-à-dire une prise en compte de la complexité intrinsèque en multipliant les points de vues.

Il aurait pu être pertinent que les volontaires à l'activité sur la viscosité répondent au questionnaire écrit (instrument quantitatif) immédiatement avant l'entretien d'explicitation mais tous les sujets n'ont pas disposé du temps nécessaire pour prendre part à une telle activité élargie. Le nombre limité de participants à la portion qualitative aurait rendu également ambiguë toute interprétation des corrélations observées en raison du faible échantillonnage. Autant que faire se peut, les participants ont été invités à répondre au questionnaire écrit, de sorte à faire apparaître quelques constats, nécessairement anecdotiques. L'articulation des méthodes s'est plutôt effectuée par la comparaison des invariants statistiques ressortant des analyses croisées des rubriques qualitatives significativement représentées et des résultats saillants de la passation de l'instrument à choix multiples à une clientèle postulée identique à nos participants à l'activité expérimentale.

CHAPITRE 6 - ARTICLE 1

Cet article pourrait être publié dans les revues suivantes :

International Journal of Science Education

American Journal of Physics

International Journal of Research in Science Teaching

Exploring the Students' Conceptual Framework in Mechanics through Patterns of
Answers in the FCI.

Abstract

From patterns of answers in the Force Concept Inventory, a widely disseminated multiple-choice probe of basic Newtonian mechanics, we inferred the initial conceptual coherence, particularly relating to inertia, parabolic motion and Newton's third law, of 217 students beginning their post-secondary science studies in Quebec, Canada. The concomitant conceptual coherence was brought to light through the use of Burt Tables (BT) and the dichotomous conceptual coherence was analysed through the use of two novel quantitative tools : the Specific Discrimination Index (SDI) and the Weighted Specific Discrimination Index (WSDI). The students' naive conceptual framework in mechanics was shown to be mostly incoherent although some degree of internal conceptual coherence can be detected. No student displayed a coherent worldview closely related to the Aristolian or the impetus paradigms. The analysis showed that not all wrong answers should be interpreted as misconceptions. Even though some of the results obtained were not unexpected, based on previous studies using individual clinical interviews, which remain the benchmark to infer an individual conceptual framework, our quantitative instruments facilitated the detection of some hitherto inconspicuous results such as the fact that students answering a difficult question about Newton's third law were no more likely to succeed in a follow-up question than the rest of participants or that only 6% of students choosing a distracter compatible with a belief in circular impetus were choosing an equivalent distracter in a similar question.

Introduction

The fact that students come to physics classes with preconceptions is well-established (Arons, 1997; Gunstone and White, 1981; Halloun and Hestenes, 1985a, 1985b; McDermott, 1991, 1997; Peters, 1982; Viennot, 1979). However, the nature of those preconceptions, or misconceptions as they are often labelled, is a matter of debate. A part of this ongoing debate is the internal organisation of these preconceptions in what I will refer to as the students' conceptual framework. Are the preconceptions forming a rigid and coherent framework guiding and structuring the thought process? For example, Halloun and Hestenes (1985b) have divided typical preconceptions into three categories: Aristotelian, impetus, and common sense. Alternatively, are the preconceptions a loosely organized and largely incoherent set of ad hoc rules called upon when a context brings them to mind?

To assess the students' conceptual framework, clinical interviews are the tools of choice, but they are costly, time consuming, and although they generate rich data, the data comes from a limited subset of the student population. The well-known alternative is multiple-choice tests (MCT). As can be expected, MCT can easily generate large sets of data but their interpretation is impeded by the invisibility of the students' thought process. To alleviate this situation some MCT have a built-in logical justification structure where each question is followed by a set of justifications of which one is to be selected (for example, Tobin and Capie, 1981). Nevertheless, several well conceived MCT do not present this built-in justification structure making the interpretation of the reasoning behind the answers quite speculative. To circumvent this problem, two or three questions covering

similar concepts are presented in the test and the similarity in their rate of success can be utilised to infer the stability of the conceptual framework. This last approach is the one chosen in the Force Concept Inventory (FCI) of Hestenes, Wells and Swackhammer (1992), the most widely cited multiple-choice probe in Newtonian mechanics.

The Force Concept Inventory

The FCI was designed to investigate the prevalence of typical misconceptions in mechanics and is currently used to assess the effectiveness of physics classes to instil a correct conceptual framework (Hake, 1998). The construction of such an instrument is a daunting task that requires mapping typical 'misconceptions' in clinical interviews and written answers to open questions, validating the expected level of mastery, balancing the exposure of the tested concepts, formulating questions without bias of interpretation, etc. This process is necessarily iterative and cannot be expected to converge to a perfect solution, but an acceptable compromise can be achieved. Nevertheless, to view students' results as a valid measure of their conceptual framework remains a leap of faith. For example, Huffman and Heller (1995) have challenged the validity of the FCI by showing that a factor analysis illustrated multiple factors being assessed (see the rebuttal of Hestenes and Halloun, 1995). Studies have also shown that the wording of questions can be an impediment (Clerk and Rutherford, 2000) or that a different set of distracters (wrong choices in a given question) can lead to different results (Steinberg and Sabella, 1997; Rebello and Zollman, 2003)

The FCI has successfully withstood such criticism in part because of the quality of its construct and also because of the stability and predictability of the students' results (Hake, 1998), but caveats warranted by carefully designed educational research cannot be entirely ignored. As is the case with all multiple-choice tests, unusual answers due to guessing can be a factor, and even though the distracters have been validated through an interview process, it is not conceivable that the entirety of 'misconceptions' hosted by students will be covered. As a result, a distracter might be chosen for an altogether different reasoning than the one subtending its presence.

To aid in the interpretation of the reasoning of selecting a particular distracter, it would be useful to evaluate the coherence of the students' choices. This can be done by looking at aggregate results as is done in Halloun and Hestenes (1985), with a different instrument than the FCI.

« Many students have some notion of parabolic motion, but few of them recognised it as the consequence of a constant force. Thus 66% of the pre-tested students were able to identify the correct parabolic path for a projectile task, but only 20% were able to identify the similar path for the rocket firing its engines in (another) task. Interviews confirmed that the students had great difficulty identifying a common principle in the two tasks. »

The fact that the results vary greatly on questions sharing a common concept clearly indicates a lack of coherence in the students' conceptual framework. However, aggregate results dissipate the information of the coherence of individual student choices. One may wish to assess whether the selection of a particular distracter is related to choosing another distracter in another question that is logically connected. To do that, Burt Tables (BT) are a tool of choice.

BT are a compact tabulation of the number of co-occurrences of all distracters pairs. Previous studies have shown the promise of using BT to detect the robustness of misconceptions (Olds, B., Steveler, R., Miller, R. and Nelson, M.A., 2004, Saglam and Millar, 2006, Van Driel and Verloop, 1999) but they have not been extensively used in educational research. By looking in details at the cross tabulation of each concomitant distracter choices, the analyst may be able to infer conceptual coherence. For example, a student may be attributed a belief in circular impetus if he or she coherently selects the proper distracters in different questions. This form of coherence evaluated through the filter of BT will be called concomitant conceptual coherence.

Other quantitative tools to explore the conceptual coherence have been developed for this article: the Specific Discrimination Index (SDI) and the Weighted Specific Discrimination Index (WSDI). The former is based on the premise that on two conceptually related questions, students demonstrating conceptual coherence are expected to succeed or fail in both. Any combination of failure and success can be construed as conceptual incoherence

although this attribution remains speculative since the reasoning behind the selection of a specific distracter remains opaque to the analyst. The latter, the WSDI, attributes a greater weight for answer patterns selected by a large subset of participants. The WSDI and SDI will be described in more details in the following paragraphs. Taken together they form the backbone of the determination of the dichotomous conceptual coherence.

Starting from the standard contingency table for dichotomously scored items (table XVII) which is presented below.

Table XVII - Contingency table for two dichotomous items.

		Item y	
		failure	success
Item x	failure	a	b
	success	c	d

a = number of participants having failed items x and y .

b = number of participants having failed item x and succeeded y .

c = number of participants having succeeded item x and failed y .

d = number of participants having succeeded items x and y .

One can define a specific discrimination index by the formula:

$$SDI_{y/x} = \frac{d}{c+d} - \frac{b}{a+b} \quad (\text{Eq. 9 Specific discrimination Index (SDI)})$$

which can be read as the proportion of students succeeding in item y while having succeeded in item x minus the proportion of students succeeding in item y while having failed item x . For example, let us study the case of two related questions both of them being

successfully answered by half of the participants although for some unknown reasons all of those who succeeded in one question failed the other and vice-versa. It can be calculated that the value of the SDI will be -1 using the data presented in table XVIII.

Table XVIII - Contingency table for two items showing conceptual incoherence (SDI = -1).

		Item <i>y</i>	
		failure	success
Item <i>x</i>	failure	0	50
	success	50	0

However, if one looks at another hypothetical situation where on the 90 students failing the first item (item *x*) half succeeded on the second (item *y*) but of the 10 students succeeding item *x* all succeeded in item *y*, the conceptual coherence is attained by the students correct in their choices in *x* and *y* although the evidence from the other students point to a lack of coherence. In that case the SDI value is 0,5. The contingency table of that specific situation is presented in table XIX.

Table XIX - Contingency table for two items showing partial conceptual coherence (SDI = 0,5).

		Item y	
		failure	success
Item x	failure	45	45
	success	0	10

Since it can be misleading to ascertain partial conceptual coherence from a subpopulation of only 10 participants, a weighted specific discrimination index (WSDI) can be defined in the following manner.

$$WSDI_{y/x} = \begin{cases} \frac{\left[\frac{d}{c+d}d - \frac{b}{a+b}b \right]}{b+d} = \frac{\left[\frac{d^2}{c+d} - \frac{b^2}{a+b} \right]}{b+d} & \text{if } a+b \text{ and } c+d \neq 0; \\ \frac{\left[\frac{d^2}{c+d} \right]}{b+d} & \text{if } a+b = 0; \\ \frac{\left[-\frac{b^2}{a+b} \right]}{b+d} & \text{if } c+d = 0. \end{cases}$$

(Eq. 10 Weighted specific discrimination coefficient (WSDI))

If one looks back to the previous example, the WSDI would be -0,227 so a given data set can be viewed as indicating partial conceptual coherence (SDI = 0,5) and incoherence (WSDI = -0,227). Those observations can be reconciled through their mathematical definition. The SDI being more affected by individual coherence and the WSDI with global coherence. For

example, in a similar situation as depicted before, suppose that 1000 students take a test but only 30 got right a question on Newton's third law. Of those 30 students, everyone then proceed to answer correctly another question about this same law. So far, a perfect conceptual coherence emerges. But, of the other 970 students who failed on the first question, 485 got the second right. This illustrates a state of conceptual incoherence since a coherent framework would have led to failing both question. In this situation, the SDI = 0,5 and the WSDI = -0,413.

Results

The FCI was taken as pretest in a mechanics course by 217 students beginning their post-secondary science studies in Quebec, Canada. The students were generally 17 or 18 years old and the genders equally balanced. The pre-test average was 35% with a standard deviation of 14% (both values not untypical for the FCI) and a Cronbach alpha coefficient of 0,694. For comparison bases, the FCI was taken by another group of 36 students who did not take physics at the secondary level. In that latter case, the average was 25% with a standard deviation of 10% and a Cronbach alpha coefficient of 0,413. Except when otherwise stated, all data in this article will be based on results obtained in our main population.

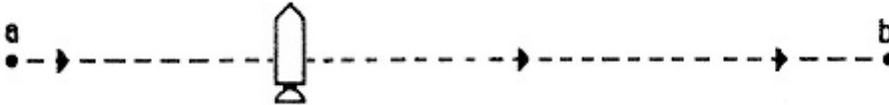
Results explored through BT

The BT was established for the entirety of the test, but only interesting subsets of items has been selected since the entire dataset is a 145×145 matrix. Previous studies having examined the conceptual understanding of inertia, parabolic flight, and Newton's third law, I will limit

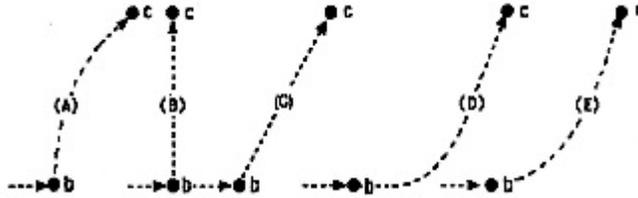
the analysis to questions related to those concepts, in that order, beginning with questions 24–27 of the original version of the FCI. For convenience, they are reproduced in figure 11.

Use the statement and figure bellow to answer the next four questions (24 to 27)

A spaceship drifts sideways in outer space from point " a " to point " b " as shown bellow. The spaceship is subject to no outside forces. Starting at position " b ", the spaceship's engine is turned on and produces a constant thrust (force on the spaceship) at right angles to the line " ab ". The constant thrust is maintained until the spaceship reaches a point " c " in space.

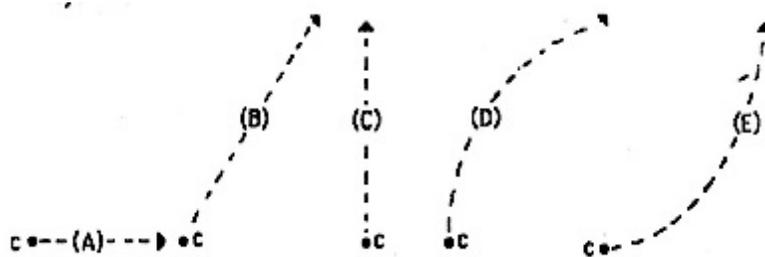


- 24) Which of the path bellow best represents the path of the spaceship between points " b " and " c " ?



- 25) As the spaceship moves from point " b " to point " c " its speed is
- (A) Constant.
 - (B) Continuously increasing.
 - (C) Continuously decreasing.
 - (D) Increasing for a while and constant thereafter.
 - (E) Increasing for a while and decreasing thereafter.

- 26) At point "c" the spaceship's engine is turned off. Which of the following path will the spaceship follow beyond point "c"?



- 27) Beyond point "c", the speed of the spaceship is
- (A) Constant.
 - (B) Continuously increasing.
 - (C) Continuously decreasing.
 - (D) Increasing for a while and constant thereafter.
 - (E) Increasing for a while and decreasing thereafter.

Figure 11 Questions 24 to 27 of the original version of the FCI (Hestenes, Wells & Swackhammer, 1992).

Table XX shows the Burt Table for these four questions. It is a 20×20 matrix symmetrical around the diagonal where the lower part has been removed for clarity. The table can be read either vertically or horizontally. The long diagonal represents the number of students selecting a particular choice. For example, 39 students selected B in question 25 (25B). Of these 39 students, 8 selected 24A (reading upward) and 4 selected 27E (reading rightward). For convenience, the correct answers are displayed in a shade of grey.

Table XX - Burt table for questions 24 to 27 of the FCI (original version). Correct answers are in a shade of grey.

		Q24					Q25					Q26					Q27				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
Q24	A	33	0	0	0	0	11	8	4	8	2	6	5	3	15	4	19	1	8	3	2
	B		46	0	0	0	28	4	5	9	0	7	3	27	7	2	25	4	11	4	2
	C			48	0	0	26	6	0	8	8	4	25	5	11	3	23	2	17	3	3
	D				42	0	18	10	2	9	3	2	16	7	12	5	17	1	12	3	9
	E					48	27	11	2	7	0	1	25	8	12	2	31	1	13	0	3
Q25	A						110	0	0	0	0	10	46	22	24	8	63	1	31	7	8
	B							39	0	0	0	3	13	10	11	2	23	3	8	1	4
	C								13	0	0	2	2	3	6	0	4	3	2	2	2
	D									41	0	3	9	10	15	4	20	2	13	3	3
	E										13	1	4	5	1	2	4	0	7	0	2
Q26	A											20	0	0	0	0	11	1	5	1	2
	B												74	0	0	0	55	1	11	4	3
	C													50	0	0	31	3	10	2	4
	D														57	0	12	3	29	5	8
	E															16	6	1	6	1	2
Q27	A																115	0	0	0	0
	B																	9	0	0	0
	C																		61	0	0
	D																			13	0
	E																				19

Inertia and circular impetus

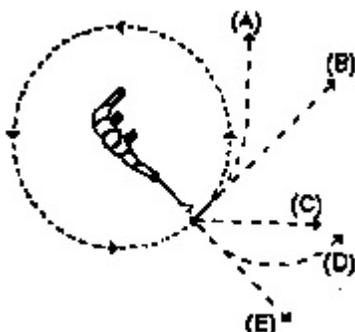
We may begin our exploration of the students' conceptual framework by following the apparent logic displayed through the diverse choices made. For example, 24C may represent the misconception of associating constant force with constant velocity while, at the same time, presenting a correct interpretation of the compounding of perpendicular components of motion. One may think that the associated choice in question 26 (Q26) should be 26B since it would seem natural to persevere in a diagonal motion when the engine is turned off, 52% (25/48) did, in fact, selected that option.

One can think that a logical consequence of selecting 24B (the spaceship travels perpendicularly to the line ab), would be 26C by the principle of inertia. The data seems to concur since 59% (27/46) of the students that selected 24B chose 26C. It can thus be argued that these students displayed a coherent comprehension of inertia. This can be verified by looking at selected answers in other questions related to inertia. For example, question 4 of the original version of the FCI, which is reproduced in figure 12, had an overall success rate of 58%. However, for those students who selected 24B, the success rate was 65% (30/46) (data is shown in table 2). A second degree of BT detected that 63% (17/27) of the students that selected 24B and 26C chose the correct answer in Q4 (4B). The proportion of students answering both Q24 and Q4 (24E and 4B) correctly was 51% (21/41). Therefore, the selection of incorrect choices in a given question can be a better predictor of success in another question than the selection of the correct answer.

It is apparent that only 23% (11/48) of the students choosing the correct answer in question 24 (24E) selected the correct answer in Q25 (25B). The clear majority (27/48) chose option 25A—the speed is constant. This fact could not have been anticipated by looking solely at the success rates of questions 24 and 25 that were respectively 22% and 18%.

There are other questions in the FCI that are related to the principle of inertia, the more closely related being question 10 (reproduced in figure 12). We just saw that 65% of students selecting 24B got Q4 right; how did they fare in Q10? In a remarkable showing of coherence, exactly the same proportion, 65% (30/46), got Q10 right. This can be seen in table XXI. For contrast,

4) A steel ball is attached to a string and is swung in a circular path in a horizontal plane as shown below. At point P, the string suddenly breaks near the ball. If these events are observed from directly above, which of the paths would the ball most closely follow after the string breaks?



10) The accompanying figure shows a frictionless channel in the shape of a segment of a circle. The channel has been anchored to a frictionless horizontal table top. You are looking down at the table. Forces exerted by the air are negligible. A ball is shot at high speed into the channel at 1 and exits at 2. Which of the paths below would the ball most likely follow after it exits the channel and moves across the frictionless table top?

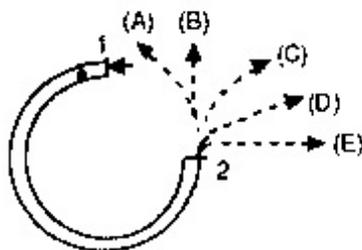


Figure 12 Questions 4 and 10 of the FCI (original version).

At first sight, question 4 and 10 should produce similar results based on the similarity of the physics involved. The success rates on these two questions were, respectively, 58% and 67%. Distracters A of both questions seem to be related to a common misconception (circular impetus), but only 33% (9/27) of students selecting 4A, opted for 10A. The majority of these students (11/27) chose 10B, which is the correct answer.

Parabolic flight

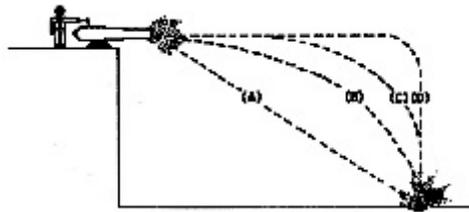
Looking back at the rocket of Q24 through Q27, it is easy to see that, in the minds of the students, options 26D and 27C are related since 51% (29/57) of those selecting 26D, opted for 27C. This may seem puzzling at first but a logical connection can be made if we assume that students situate the question in a gravity field and the connection between 26D and 27C implies a coherent (although incorrect in that particular context) representation of a parabolic flight. A similar observation can be made between 24C and 26D (11/48). Choosing 26D might represent a belief that all bodies, wherever they might be, in outer space or on Earth, follow a parabolic path when left to their own devices. Alternatively, it could just be a misreading of the original question, with students not excluding the gravitational pull from the Earth and thereby not fully appreciating the phrase, "the spaceship is subject to no outside forces." The second version of the FCI has incorporated a more vivid picture of the space shuttle instead of the model rocket. It would be interesting to see if this uncovered pattern of choices has changed with the second version.

To reinforce the interpretation of the failure to respond correctly as a misinterpretation (or misreading) of the question, it can be shown (data not presented here) that of the 61 students who chose 27C, only 15 selected the logical equivalent choice, 8C (a puck gliding on a frictionless table experiences its speed continuously decreasing after a continuous push has ceased). Of those 61 students, 36 answered Q4 correctly and 40 answered Q10 correctly, displaying some understanding of inertia.

It could be argued that the observed connection between 26D and 27C is a by-product of the very low pre-test average (33%) and may be representative of students with mediocre academic credentials and low capabilities. To verify that assertion, a much smaller sample of students (65) displaying a higher pre-test average (45%) was examined. The proportion that selected 27C after selecting 26D was 50% (6/12), approximately the same as shown before.

As was mentioned previously, students' difficulties with parabolic flight are well documented and interviews revealed a lack of coherence in their understanding. In the original version of the FCI, questions 16 and 23 are related to parabolic flight. The success rates on these two questions were 37% and 33% respectively. The questions are reproduced in figure 13.

16) A ball is fired by a cannon from the top of a cliff as shown below. Which of the paths would the cannon ball most likely follow?



23) A bowling ball accidentally falls out the cargo bay of an airliner as it flies along in a horizontal direction.

As observed by a person standing on the ground and viewing the plane as in the figure below, which of the paths would the bowling ball most likely follow after leaving the airplane?

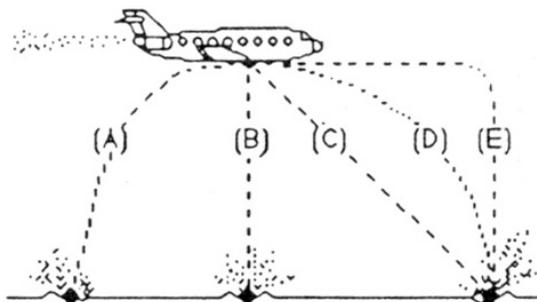


Figure 13 Question 16 and 23 of the FCI (original version).

The BT of these two questions is shown in table XXII. Data from questions 4 and 10, which can be argued to be conceptually related, is also presented. It can readily be seen that of the 80 students who selected 16B (the correct answer), only 39 selected 23D (the correct answer), a

proportion of only 49%. This could not have been entirely anticipated by looking at the success rates. An observant reader may notice the lone student opting for 16E although no such alternative exists in that particular question! It has been kept in place so the rows and columns add up even though it has no bearing on future discussion.

Table XXII - Burt table for questions 4, 10, 16 and 23 of the FCI (original version). Correct answers are in light grey.

		Q4					Q10					Q16					Q23				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
Q4	A	27	0	0	0	0	9	13	3	1	1	0	10	15	2	0	16	4	1	6	0
	B		125	0	0	0	22	94	7	2	0	1	50	64	10	0	37	30	12	45	0
	C			23	0	0	5	14	2	2	0	1	4	17	1	0	9	3	4	7	0
	D				10	0	3	6	1	0	0	0	3	6	1	0	4	1	1	4	0
	E					32	8	19	2	1	2	0	13	16	2	1	11	11	1	9	0
Q10	A						47	0	0	0	0	0	10	35	2	0	25	10	0	11	0
	B							146	0	0	0	0	60	73	12	1	43	37	17	49	0
	C								15	0	0	1	4	9	1	0	6	1	1	7	0
	D									6	0	1	4	1	0	0	2	1	1	2	0
	E										3	0	2	0	1	0	1	0	0	2	0
Q16	A											2	0	0	0	0	0	0	1	1	0
	B												80	0	0	0	21	12	8	39	0
	C													118	0	0	49	30	10	28	0
	D														16	0	7	6	0	3	0
	E															1	0	1	0	0	0
Q23	A																77	0	0	0	0
	B																	49	0	0	0
	C																		19	0	0
	D																			71	0
	E																				0

Newton's third law

Naturally, several questions in the FCI probe the understanding of Newton's third law. In the original version, this was done with questions 2, 11, 13, and 14. As is always the case with questions relating to this particular law, the pre-test averages were very low (respectively, 17%,

6%, 6%, and 34%). The contexts of the questions were as follow : Q2 displays a frontal collision between a small car and a truck; Q11 shows two students seated on wheeled-chairs facing each other and one of the students suddenly pushes the other with his feet; Q13 illustrates a car pushing a truck with increasing speed; Q14 represents the same car pushing the truck with constant speed. All four questions asked about the intensity and orientation of the forces involved.

Question 11 was successfully answered by only 12 students (out of 217). Since we may assume that they have mastered Newton's third law, we may wonder how they fared in question 13. Of these 12 students, 4 picked the correct answer in Q13 for a proportion of 33%.

Questions 11 and 13 were unrelated in their context. The differences in the choice patterns in these two questions might be cued by the different contexts. The same cannot be said of Q13 and Q14, which are clearly related. Looking again at the 12 students who answered Q13 correctly, only 6 gave the right answer in Q14! This lack of consistency could have been inferred from the low correlation coefficient of 0,08 between Q13 and Q14, but not with this level of detail. Furthermore, of the 37 students who answered Q2 correctly, 6 got Q11 right (16%), 3 got Q13 right (8%) and 19 got Q14 right (51%) (data not shown).

Results explored through SDI and WDSI matrix

If the former analysis and interpretation of the data set depicts many situations where concomitant coherence was shown to be lacking or to be unsuspectedly present, it is an arduous task to examine the data set for hypothetical concomitant coherences. A less differentiating method but easier to effect with a large ensemble of items is to generate the SDI and WDSI matrix to infer the dichotomous conceptual coherence.

This has been done with the previously analysed subset of items from the FCI and is presented in the two following tables. For the sake of brevity, all of the coefficients were condensed in a single table although they may refer to conceptually different questions.

Table XXIII - Specific discrimination index matrix. (Results in light grey are below -0,10, results in darker shades of grey are above 0,30 and 0,50)

	Q. 2	Q. 4	Q. 10	Q. 11	Q. 13	Q. 14	Q. 16	Q. 23	Q. 24	Q. 25	Q. 26	Q. 27
Q. 2		0,05	-0,06	0,13	0,03	0,21	0,01	0	-0,14	0,08	0	0,18
Q. 4	0,03		0,19	0,02	0	0,10	0,07	0,08	0,01	0,05	0,1	0,07
Q. 10	0	0,21		0,02	0	0,03	0,13	0,03	0,16	0	0,17	0,16
Q. 11	0,35	0,10	0,08		0,29	0,52	0,14	0,27	0,03	-0,10	0,17	0,32
Q. 13	0,08	-0,17	-0,18	0,29		0,17	0	0,09	-0,23	-0,1	0,08	0,14
Q. 14	0,13	0,11	0,02	0,12	0,04		0,08	0,18	0,09	0,01	0,12	0,12
Q. 16	0,01	0,08	0,12	0,03	-0,01	0,07		0,25	0,16	0,03	0,03	0,07
Q. 23	0	0,09	0,03	0,06	0,02	0,18	0,27		0,15	0	0,16	0,22
Q. 24	-0,11	0,01	0,21	0,01	-0,07	0,12	0,22	0,20		0,06	0,23	0,15
Q. 25	0,07	0,08	-0,01	-0,04	-0,04	0,02	0,05	-0,06	0,07		-0,01	0,07
Q. 26	0	0,11	0,17	0,04	0,02	0,12	0,04	0,16	0,18	-0,01		0,32
Q. 27	0,10	0,07	0,14	0,07	0,03	0,11	0,07	0,19	0,10	0,04	0,29	

Table XXIV - Weighted specific discrimination index matrix.(Results in light grey are below -0,10, results in darker shades of grey are above 0,30)

	Q. 2	Q. 4	Q. 10	Q. 11	Q. 13	Q. 14	Q. 16	Q. 23	Q. 24	Q. 25	Q. 26	Q. 27
Q. 2		-0,35	-0,48	0,06	-0,02	-0,10	-0,24	-0,22	-0,22	-0,07	-0,24	-0,24
Q. 4	0,06		0,28	0,03	-0,03	0,15	0,13	0,12	0,04	0,07	0,15	0,15
Q. 10	0,02	0,38		0,04	-0,02	0,14	0,24	0,14	0,21	0,06	0,26	0,32
Q. 11	-0,05	-0,49	-0,58		0,09	-0,16	-0,30	-0,22	-0,19	-0,18	-0,26	-0,40
Q. 13	-0,13	-0,55	-0,63	0,09		-0,26	-0,34	-0,27	-0,23	-0,18	-0,29	-0,44
Q. 14	0,07	-0,08	-0,19	0,11	0,02		-0,05	0,07	0,02	-0,04	0,00	-0,06
Q. 16	0	-0,08	-0,1	0,02	0	0		0,16	0,1	0	-0,1	-0,07
Q. 23	-0,06	-0,12	-0,21	0,04	0,00	0,05	0,12		0,07	-0,09	0,03	0,01
Q. 24	-0,17	-0,31	-0,23	0	-0,07	-0,10	0	-0,04		-0,05	-0,02	-0,19
Q. 25	-0,06	-0,32	-0,44	-0,05	-0,05	-0,21	-0,21	-0,24	-0,10		-0,22	-0,30
Q. 26	-0,07	-0,08	-0,06	0,02	0,00	0,00	-0,1	0,05	0,10	-0,06		0,14
Q. 27	0,11	0,10	0,18	0,07	0,03	0,13	0,09	0,21	0,12	0,05	0,31	

Looking at table XXI, it is obvious that the conceptual framework depicted is largely incoherent with the exceptions of questions (11,2), (11, 14), (11, 27) and (26, 27).

Questions 2, 11 and 14 were related to Newton's third law and success in question 11 seems to be correlated to success in other related questions and even with unrelated questions since only one coefficient in item 11 row is negative in the SDI matrix. This may be explained by the fact that only 12 students (of 217) were successful in question 11. The matrix of the WSDI (table XXII) portrays a largely incoherent picture for that very same question. The somewhat strong connection between questions 11 and 27 can not be readily explained since they refer to different physical laws (Newton's first and third) and different settings (two students sitting in wheeled chairs, one pushing the other with his feet vs. a spacecraft drifting in space with its engine turned off). It may just be that those 12 students are more knowledgeable in physics. The WSDI for that same pair of question is the more largely negative ($WSDI_{11/27} = -0,40$) of all the test.

In general, it can be said that Newton's third law has not been understood and integrated in a coherent conceptual framework. For example, questions 13 et 14 were both set in the context of a small car pushing a truck with increasing speed (Q13) then at constant speed (Q14). Students succeeding in Q13 were only slightly more likely to succeed in Q14 ($SDI_{13/14} = 0,17$). Conversely, students successful in question 14 were no more likely to answer question 13 correctly than those having failed ($SDI_{14/13} = 0,04$).

The conceptual coherence between questions 4 and 10, both related to the continuation of a circular movement after the removal of centripetal force, is slightly better than for other pairs of items. Surprisingly, the probability to show conceptual coherence is better when looking at students having successfully answered question 10 ($SDI_{10/4} = 0,21$, $WSDI_{10/4} = 0,38$) than those having successfully answered question 4 ($SDI_{4/10} = 0,19$, $WSDI_{4/10} = 0,28$) although the difference is small. The somewhat strong connection between questions 10 and 27 ($SDI_{10/27} = 0,16$, $WSDI_{10/27} = 0,32$) and questions 27 and 26 ($SDI_{27/26} = 0,29$, $WSDI_{27/26} = 0,31$) are also refreshing since they all refer to Newton's first law (the principle of inertia). Hence, it would seem correct to ascertain that the conceptual framework related to inertia is shaping into a coherent form.

Another cluster of semi coherence can also be found between questions 16, 23 and 24 which are related to Newton's second law ($F = ma$) and the application of a constant force perpendicular to the initial direction of movement. Although no WSDI were larger than 0,16

indicating a mostly incoherent understanding when taking into account the majority of students, a small subset of students actually show dichotomous coherence. The indication is stronger between questions 16 and 23 (see fig. 13). In that case, the analysis of concomitant coherence was particularly interesting owing to the similarities between the different distracters.

Discussion

Some results presented here are not new. Halloun and Hestenes (1985b) have argued that even though misconceptions in Newtonian mechanics are similar to ancient beliefs erected in systems by Aristotle (Aristotelian physics) or in the middle ages (impetus physics), students held a mixture of “*loosely related and sometimes inconsistent concepts*” (p. 1058). Many students would not display a coherent impetus belief throughout the various questions. The same could be said about every tested concept of the Halloun and Hestenes diagnostic test. Halloun and Hestenes (1985b) classified the students as mainly Impetus type (65%), Aristotelian (18%), and Newtonian (17%), even though “*nearly every student used some mixture of concepts from the three theories and appeared to be inconsistent in applying the same concept in different situations*” (p.1058). Students categorised as Newtonian were the least inconsistent. In a similar study, Thornton and Sokoloff (1998) showed that the classification of students as being Newtonian or pre-Newtonian was related to the context of the questions used for the categorisation.

Similar results were observed here. Students did not consistently hold firm beliefs. For example, a belief in circular impetus was consistently displayed by only 4 % of the students

(comparing Q4 and Q10). These results can be contrasted to those published by McCloskey, Caramazza and Green (1980) who observed, based on results on four similar questions, that *"...most subjects who made errors gave the same erroneous response (a curved path for the ball) in all four questions"*. This disparity between the results presented here and those of McCloskey *et al.* does not seem to originate from the sampling of the student body under study since their age is similar and the mean results equivalent (for questions similar to the FCI Q4 and Q10, McCloskey *et al.* got averages of 53% and 67%. The students in this study obtained averages of 57.6% and 67.2%). Two differences might be noted between this study and McCloskey's: the latter used open questions and their sample was limited to 47 subjects out of which 15 had no previous physics courses.

Aristotelian beliefs did not appear to be prevalent since no students chose a "violent" followed by a "natural" movement in Q23 although 7% chose a similar option in Q16.

Almost no student could be classified as Newtonian (or pre-Newtonian). For example, looking at the 12 students (5.5% of 217) who answered correctly a question on Newton's third law (Q11), only 4 were consistent in a related question (Q13). Furthermore, looking at the answers to four questions related to Newton's third law, a strong level of inconsistency was detected; students getting any of them right did not seem to be more likely than the rest of the students to answer the other questions correctly. This prompts the conclusion that a correct answer to any of these questions does not warrant the inference of a comprehension of Newton's third law. Nor does it warrant the classification of any given student as being "Newtonian" since

students getting Q13 right (the most difficult question of the FCI) did not fare better on the rest of the test (average: 35.3%; SD: 13.1%; maximum score: 59%) than the other students. However, students successful in Q11 were more knowledgeable in physics (average: 50.3%; SD: 14.6%; maximum score: 72%) as hypothesized in the previous section due to the relatively strong SDI coefficients between Q11 and every other question of the test.

On the upside, BT permitted the detection of some consistencies in the students' conceptual framework. For example, 58% of students selecting the spaceship going straight up with the engine turned on had it continuing straight up with the engine off. 52% of students electing for a diagonal initial motion elected for a diagonal final motion, but only 10% opting for a diagonal initial motion selected a final vertical motion. 45% of students placing the spaceship in an initial parabolic flight followed through consistently.

It thus appears that the students in this study do not espouse well-defined naïve laws of motion or laws of interaction. The principle of inertia seemed nonetheless to be within their intellectual grasp as is has been shown to be employed somewhat coherently. The fact that they have done a secondary course in Newtonian mechanics may help explain the apparent correct use of this concept although Newton's laws are typically glossed over at that level by limiting the exposure to relevant formulas and plug-and-chug exercises. Of course, this may not be the case in every school, but the pre-test average of 33% seems to concur with a weak intellectual foundation in physics. In addition, an independent analysis of the 36 students who did not take physics at the secondary level showed no significant difference in the pattern of their answers. For example,

only 2 of them (6%) showed a coherent belief in circular impetus. The connection between an upward parabolic flight and decreasing speed was demonstrated by 14% of the students in both groups (whether having completed or not completed a secondary course in Newtonian mechanics).

Thus, the student's naive conceptual framework in Newtonian mechanics looks scattered and mostly incoherent. The coherence that has been found is related to logical connections between questions and not to the adoption of an ancestral (Aristotelian from ancient Greece or impetus from Europe's Middle Ages) point of view. As an example of a coherent logical connection, it has been shown that, for most students, if a spaceship is moving in a parabolic motion (a wrong answer in the FCI Q26) it will see its speed decrease (a wrong answer in the FCI Q27) as students seem to point out correctly assuming the spaceship is moving in Earth gravity field. So in this case, two wrongs do make a right (although it does not show on the final score).

Using Burt Tables to examine data structure has some evident drawbacks. For example, the original version of the FCI has 29 questions with 5 choices; hence the number of possible pairings is 10 440. Evidently, this makes a thorough analysis exceedingly difficult. It is, in part, for that reason that the BT for the whole test is not shown. It is also, in part, because for questions that lack common concepts, the juxtaposition of selected choices would not lead to any obvious inference of the conceptual framework of students. For that, it is most useful to look at related questions covering similar concepts. In this manner, an educational researcher can delve into the dataset (raw data from individual answers to every question) without being

dependent on elaborate statistical techniques, such as factor analysis or correspondence analysis for which Burt Tables are the starting point. These statistical analysis tools could be used subsequently to extract patterns in a more compact fashion although dissipating some valuable information in the process. But as we saw, BT can be complimented by the use of SDI and WSDI matrix which give numerical indications about the dichotomous coherence between questions.

Conclusion

Concomitant coherence analysis through the use of Burt Tables (BT) and dichotomous coherence analysis with two novel tools, the Specific Discrimination Index (SDI) and the Weighted Specific Discrimination Index (WSDI), of pre-test data of the original version of the FCI given to 217 college students has yielded some valuable information relating to the coherence of the students' conceptual framework in Newtonian mechanics particularly relating to inertia, parabolic motion, and Newton's third law. The concomitant coherence analysis has shown that a wrong answer in a given question may be a better predictor of success in other questions than the right answer and also illustrated some possible misinterpretations of some questions. Although the students' conceptual framework in Newtonian mechanics was shown to be largely inconsistent as illustrated by weak SDI and WSDI coefficients, some degree of coherence appeared especially in questions relating to inertia. A future direction of research should be to generate and analyse a large data set of matched pre-test/post-test scores through BT, SDI and WSDI. It would also be interesting to know if the distracter pairs shown to be

somewhat strongly connected through analysis of concomitant coherence are stable through different populations.

Acknowledgement

I would like to thank Professor David Hestenes for authorizing me to reproduce questions from the FCI.

CHAPITRE 7 - ARTICLE 2

Cet article pourrait être publié dans les revues suivantes :

International Journal of Science Education

Journal of Research in Science Teaching

College students' mastery of uncertainty calculation, graph-shape interpretation and control of variables.

Abstract

College students in science in Quebec, Canada have been subjected to a novel multiple-choice instrument to infer their knowledge of: 1) measurement uncertainty, 2) graphical representation of mathematical formulas and, 3) control of variables. Even though the population under study had successfully completed 2 physics, 2 chemistry and 2 mathematics courses, results were not as high as could have been expected, especially on measurement uncertainty. A lack of correlation between the different questions of the questionnaire seems to indicate that those three topics are unrelated. As a basis for comparison, the same questionnaire was passed to students in a different institution where there is less emphasis on measurement uncertainty. In that setting, results were dismal for this topic. Uncertainty quantification thus appears to be vastly more difficult than expected with instruction playing a somewhat positive role.

Introduction

Laboratory investigations are an integral part of science teaching at the collegiate level. However the objectives they pursue are often ill defined or even implicit. In their literature survey, P.A. Kirschner and M.A. Meester (Kirschner & Meester, 1988), tallied over 120 objectives related to lab work which they divided in two main categories: developing a positive attitude toward science and understanding the scientific method. They noted that there is no universal accord of the objectives of practical work (Kirschner & Meester, 1988, p. 87). Nevertheless, some general objectives commonly shared seemed to emerge. Of those, two are of interest here: 1) the laboratory should be used to teach some general intellectual skills likely to be useful to students in their future work and, 2) measurements themselves are often less important than learning to recognize, estimate, eliminate and analyze errors (Kirschner & Meester, 1988, p. 88-89).

Intellectual skills may consist of the habit of keeping a readable day-to-day laboratory diary, the ability to plan ahead and use time efficiently, the flexibility in modifying experiments, etc. The list of such skills may grow indefinitely if analyzed at fine-grained level but in keeping in mind the end-result - students learning to be scientists - two intellectual skills stand-out (although, and by far, they are not the only ones): 1) students should be able to build mathematical models that fit their data, 2) students should know how and why to control variables.

Invariably, the first skill links a graphical display of data with a mathematical equation (the model). This model may arise from the theoretical components of a course or from curve-fitting. As students progress in their studies, graphs become a visual aid to recognize a model or to differentiate between concurrent models. Especially since graphs make their way into the data acquisition process itself with the more and more prevalent use of computer-assisted data collection with real-time graphing. Students can, at the press of a button, fit a polynomial equation through their data points, find the least-square regression equation and its correlation coefficient or find the slope at different locations. But do students recognize the curve-fit equation as a reasonable description of the model underlying the whole experiment? For example, when doing an experiment related to Newton's second law $F=ma$ (F being the net force); holding F constant, what type of shape do students expect to find in the a vs. m graph?

The ability to link a graph to a theory is construed as meaningful evidence of learning and as such, has been extensively studied in domain-specific educational research; for example, in physics, interpretation of various components (slope, height, rise, run, etc.) of position vs. time and velocity vs. time graphs by university students (McDermott, Rosenqist & van Zee, 1987, Beichner, 1994). But researches into basic interpretations of function shapes are rarer, mostly dedicated to the secondary level and keying on line graphs interpretation (Knuth, 2000, Leinhardt, Zaslavski & Stein, 1990). For example, the *Test of Graphing in Science* (TOGS) (McKenzie & Padilla, 1986) contains no reference to specific equations. The TOGS being

mostly interested in the proper scaling of axes, locating points on a graph, properly assigning variables, identifying trends in a set of data, etc.

The second skill, to control variables, is well-known and has been the cornerstone of rigorous practical investigations for hundreds of years. Assessment of this cognitive skill is the topic of several paper and pencil tests; for example, the *Group Test of Logical Thinking* (GTLT) of Tobin and Capie (1981) and Anton Lawson's *Classroom Test of Formal Reasoning* (CTFR) (Lawson, 1978). All of those are direct descendant of the Piagetian tradition and are typically addressed for high school students.

The two previous skills, graphing and control of variables, have been found to be related. For example, Berg and Phillips (1994) and Wavering (1989) found a weak correlation between the ability to construct and interpret line graphs and the level of logical thinking for secondary level students. Graphing abilities can then be viewed as an indication of general cognitive abilities. However, this interpretation is challenged by Wolff-Michael Roth and Michelle K. McGinn (1997) who see graphing competency as a practice skill being nurtured in a learning environment "*through their interactions over and about graphing tasks*" (Roth & McGinn, 1997, p. 100) rather than expression of *innate* (italics in the original) ability or an indication of formal-operational thinking.

Lastly, the need to quantify uncertainty and ameliorate experiments is ubiquitous in science. Each and every measurement comes with some uncertainty on its exact value. In the model

building process (mathematically speaking), measurements are combined in predefined equations, leading to the propagation of uncertainties. Marie-Geneviève Séré, Roger Journeaux and Claudine Larcher (1993) studied the conceptions of first years University students in France by observing their usual practices in a laboratory setting. They observed that few students took initiatives to gather more data to ameliorate results, that their quantification of uncertainty was haphazard (even after instruction) and that they did not understand the very essence of uncertainty quantification. Some more findings were related to the statistical treatment of experimental data which is not pertinent in the present research as we will see. The work of Allie *et al.* (1998) also relates to the need to repeat measurements as perceived by first year university students in South Africa. They observed indistinct intuitive ideas concerning accuracy and precision. They proposed a model of progression of ideas (inspired from Lubben & Millar, 1996) concerning experimental data from stage A (measure once and get the right value) to H (the consistency of the set of measurements can be judged and anomalous measurements need to be rejected before taking a mean). This last model, the "point-set" paradigm was challenged by David Abbott (2003) because it did not permit to classify properly the actual measurement strategies displayed of university students at the University of North Carolina and the North Carolina State University. Those strategies were highly inconsistent even on related tasks such as measuring with a ruler. In a previous study in the same academic setting, Duane Deardorff (2001) examined the fundamental practices demonstrated by students related to the treatment of uncertainty associated with measurements. Deardorff looked at the laboratory reports of students in introductory physics. He concluded that a vast majority of students did not report uncertainty even when explicitly required to, results were often

compared without any mention of uncertainty, and students had difficulty identifying the primary source of error in an experiment. The quality of responses to measurement questions was generally aligned with the amount of training and exposure students had to the subject but with limited expertise (Deardorff, 2003, p.105-106). Rebecca Lippman (2003) observed the actual behaviors of students in *Scientific Community Laboratory* at the University of Maryland. She found that the proportion of students using range to compare data sets increased from 12% to 43% after instruction.

As we saw, previous studies tended to revolve around the statistical treatment of measurement data which, as we will see in the following section, was not emphasized in the student population under study. Also, they were not specifically designed to elicit the procedural knowledge of uncertainty propagation of derived results.

The present study aims to evaluate the acquisition of the three aforementioned skills by college students in science. The working hypothesis is that graphing-equation recognition skill and measurement uncertainty estimation skill are correlated to control of variable skill. Thus, we developed a multiple-choice questionnaire that was guided by the following principles: 1) No questions would be domain-specific. If a question is based on a law, all the proper information would be included; 2) Some questions would be deemed too difficult for most secondary students; 3) Some questions are at the secondary level (benchmarks); 4) Many questions are taken from published instruments . 4) The statistical treatment of measurement data is not tested. 5) Questions have one and only one good answer. 6) All alternate choices are based on

typical errors induced by erroneously using a correct uncertainty calculation method in an incorrect context (which justifies principle 5). 7) Alternate choices are not based on typical computational errors. The specific subjects of the questionnaire are listed in table XXV.

Table XXV - Objectives of the questionnaire.

Topics	Specifics
Uncertainty	<ul style="list-style-type: none"> • Applying the stacking strategy to reduce uncertainty. • Finding the uncertainty of derived results. • Finding the most important component of the uncertainty budget. • Estimating the uncertainty of a reading on a graduated scale. • Finding the total uncertainty when it comprises an instrumental and a non-instrumental component. • Finding uncertainty by the max-min method. • Finding uncertainty by the method of simple rules. • Identifying the most probable cause of error in an experiment.
Graph	<ul style="list-style-type: none"> • Interpreting the slope of a log-log graph. • Recognizing the fact that not all decreasing functions are inversely proportional. • Recognizing the graphical display of an inversely proportional relationship. • Selecting axes to linearize the graphical display of a function.
Control	<ul style="list-style-type: none"> • Finding the variables that need to be kept constant when repeating an experiment • Finding the experimental setup change to pursue an experiment. • Recognizing the definition of an independent variable.

Previous exposure to the three topics of the questionnaire

Didactical treatment of uncertainty in the laboratory protocols

The treatment of uncertainty expected from the students in the institutional setting in which this study took place is different from the international norm codified by the ISO (ISO, 1993). To best interpret results presented next, it may be beneficial for the reader to familiarize himself with the didactical presentation of uncertainty as shown in the laboratories protocols.

In the laboratories, students are expected to estimate the uncertainty of each and every measurement. This uncertainty is said to arise from non-instrumental causes (parallax, ill defined measurand, human reflexes, perceptual limiting factors) which have to be estimated and instrumental causes (instrument tolerance, manufacturer specification) which are to be added linearly.

It is interesting to note that most measurements are taken only once. The statistical treatment of uncertainty is being addressed in a single lab in physics but is not reintroduced in ulterior labs. When many measurement of the same quantity are taken, the uncertainty arising from the spread of the data is estimated by the value of half the dispersion: $(V_{\max} - V_{\min})/2$. The latest equation is known as the "max-min method". The max-min method is also used to find the uncertainty of results deriving from calculations with non-linear functions. For results calculated from simple linear or polynomial equations, the "method of simple rules" is advocated. If the quantity calculated comes from multiplication or division of known results then the relative uncertainty is the weighted sum of the relative uncertainties. If the quantity

$$\Delta z = \Delta x \left| \frac{\partial z}{\partial x} \right| + \Delta y \left| \frac{\partial z}{\partial y} \right| + \dots$$

calculated comes from addition or subtraction of known results then the absolute uncertainty is the sum of the absolute uncertainties. All the above rules can be inferred from the law of propagation of uncertainty:

Even though this treatment is not entirely in line with the international guidelines, it provides a first approximation erring on the "safe" side because this last equation may be shown, by the Cauchy-Schwarz inequality, to represent an upper-bound of the more generally accepted law of propagation of uncertainty:

$$\Delta z = \sqrt{\left(\Delta x \frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\Delta y \frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 + \dots + 2 \frac{\partial z}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial y} \rho_{xy} + \dots}$$

where ρ_{xy} is the covariance of x and y . Contributions to the uncertainty budget are added in quadrature.

Laboratory protocols tend not to emphasize the difference between "accuracy" and "precision", in that manner being in agreement with the ISO guidelines reproduced in the National Institute of Standards and Technology (NIST): "*the VIM (International Vocabulary of Basic and*

General Terms in Metrology) does not give a definition for "precision" because of the many definitions that exist for this word." (Taylor & Kuyatt, 1994, p.14). In the same document, accuracy is defined as: "closeness of the agreement between the result of a measurement and the value of the measurand. Note: accuracy is a qualitative concept" (p.14). The term "precision" may be employed but in well-defined context. For example the statement "the precision of the measurement results, expressed as the standard deviation obtained under repeatability conditions, is 2Ω " is acceptable, but the statement "the precision of the measurement results is 2Ω " is not (p.16).

The distinction between "error" and "uncertainty" does not occupy much attention in the laboratories protocol but is correctly addressed. The term "error" refers to "result of a measurement minus the value of the measurand" (Taylor & Kuyatt, 1994, p.15). "The difference between error and uncertainty should always be borne in mind. For example, the result of a measurement (...) can unknowably be very close to the unknown value of the measurand, and thus have negligible error, even though it may have a large uncertainty." (ibid, p.7).

Students are expected to recognize the difference between the concepts of "error" and "mistake" and should provide plausible explanation for any apparent discrepancy between the expected measurand value and the outcome of the actual measurement process. For example, erroneously measuring 9 oscillations of a pendulum (instead of 10) but dividing the end result by 10.

Identifying the most notable contribution the uncertainty budget is also an expected cognitive skill. For example, given $h = (6,2 \pm 0,1)$ m and $t = (1,14 \pm 0,08)$ s, estimation of the average speed would benefit most from reducing the time measurement uncertainty (relative uncertainty = 7,0 %) than reducing the distance measurement uncertainty (relative uncertainty = 1,6 %) even though time may appear to be more "precise".

Students are also expected to deploy measurement strategies to reduce uncertainty, such as stacking objects to be measured. This last strategy is employed throughout many experiments, for example measuring 10 consecutives oscillation of a pendulum to determine its period. Evidently, stacking can only be employed with almost identical objects or under nearly identical experimental condition (the pendulum period must be shown to be independent of time, for example).

Graphical display of a mathematical model

Students were not expected to predict the shape of desired graphs. They were mostly obtained for subsequent mathematical analysis (slope, etc.) or as a visual aid to detect outlier points. Students did use computer assisted data acquisition (Vernier's LoggerPro) in a few physics lab but in every case, the data points were transferred to a spreadsheet and analyzed from there.

Control of variables

Laboratories presented to students were of the cookbook style.

Population under study

Our main source of data comes from students studying in Natural Sciences (Sciences de la nature) in college de Bois-de-Boulogne in Quebec, Canada. In Quebec, college is a 2 years intermediate level between high school and University; each school year is divided in 2 semesters. This institution offers the merit of containing a large body (close to 1000) of selected students most of which aspires to apply at the university level in life sciences (medicine, biochemistry, etc.) and hard sciences (engineering, chemistry, etc.). Students are typically aged between 17 and 19 years old, corresponding to the 12th and 13th grade. The first year is uniform; mathematics (calculus I and II), chemistry (general chemistry and solution) and physics (mechanics and electricity and magnetism). In their second year, they will have to take a biology course (genetics), a third class in physics (waves and modern physics) and mathematics (vector algebra) plus optional courses in chemistry (organic I and II) and mathematics (calculus III, statistics). Laboratories are uniform across different teachers and semesters, although some minor adjustments are possible.

The questionnaire was distributed in the first week of the fall 2005 semester to 82 second year students in their physics class with the active cooperation of the professor who explained that their participation would help in the doctorate thesis of one of his colleague, that there will be no post-test and that all copies are anonymous. Most students had completed the questionnaire in 35 minutes. The professor observed a strong commitment to the questionnaire.

Validation studies

The results presented come at the end of three iterations. A first version of only 8 questions, on uncertainty and graph interpretation, was administered in the fall of 2002 to a jury of 4 college professors and to approximately 100 students. Analysis of students results showed poor Guttman-Cronbach coefficients of 0,408 (28 students third semester students in another institution) and 0,065 (69 students first semester students in our main institution), the tests being taken at the end of the semester. Following those observations, the number of questions was increased to 23 (20 cognitives) and the control of variables portion was added. About 10 students accepted to be interviewed and provided verbal or written input relating to their reasoning and their interpretation of questions and answers. The coefficient of this second version was 0,556 (32 students third semester students) and 0,178 (180 students second semester students). A jury of 6 professors deemed questionnaire correct (although difficult).

All those observations lead to a third version with 29 questions (24 cognitives). To validate the chosen distracters, an open version was passed to two summer class groups of about 30 students each. This permitted to include some hitherto unsuspected answers that were included in the final wording. The final version (the one presented here) displays a coefficient of 0,705 (82 third semester students) with a standard error of measurement of 8,4 %. There were no significant differences between the success rates of students who participated in a previous version of the questionnaire vs. the first-timers.

Aggregated main results

Table XXVI presents a more detailed description of each question, its facility coefficient (Fac. = fraction of students selecting the correct answer), its difficulty coefficient (Dif. = fraction of students in the top 25 percentile who selected the correct answer minus the fraction of students in the lower 25 percentile who selected the correct answer) and point bi-serial correlation (Rpbis).

Uncertainty was the topic of questions 1, 2, 4, 8, 10, 11, 12, 13, 23 and 24. Graph interpretation was the topic of questions 3, 5, 9, 14, 15, 17 and 22. Control of variables was the topic of questions 6, 7, 16, 18, 19, 20 and 21. Table XXVII shows the Pearson correlation coefficient, r , between each pair of questions. The statistical significance level with a bilateral t-test at $p < 0,05$ is approximately $r = 0,22$. The questions pairs showing $r > 0,22$ or $r < -0,22$ are highlighted in light grey.

Table XXVI - Topics covered in the questionnaire.

Topics Covered by each Question of the Final Version (Fac = success rates, Disc = discrimination coefficients Rpbis = point bi-serial correlation).

	Fac.	Disc.	Rpbis
1. Calculating the uncertainty of the volume of a parallelepiped of known sides.	0,46	0,82	0,53
2. Reading uncertainty on a graduated scale with a fine pointer.	0,15	0,07	0,05
3. Associating a function with a graphical display of nonlinearly decreasing data points.	0,11	0,13	0,17
4. Estimating the uncertainty of a hamster's given three data points and an imperfect scale.	0,09	0,13	0,25
5. Associating a graph with an inversely proportional relation.	0,52	0,46	0,39
6. Defining an independent variable.	0,16	0,19	0,26
7. Selecting a test tube to logically continue an experiment (inspired from Lawson).	0,34	0,38	0,21
8. Given $M_c = a \frac{R^3}{T^2}$, calculating the uncertainty of M_c given R and T .	0,29	0,44	0,43
9. Selecting the proper axes to obtain a linear graph given the preceding equation.	0,38	0,75	0,54
10. Estimating the width and uncertainty of one diskette from a picture of ten diskettes staked with a ruler in front of them (Abbott).	0,23	0,63	0,46
11. Calculating the uncertainty of $A = 82^\circ \pm 1^\circ$ (Deardorff).	0,15	0,01	0,00
12. Choosing the most probable source of discrepancy when timing ten oscillations of a pendulum with different instruments and obtaining diverging results (Deardorff).	0,18	0,38	0,35
13. Choosing the best suggestion to improve the accuracy of the experimental acceleration $a = \frac{2h}{t^2}$ result given $h = (6,2 \pm 0,1) \text{ m}$, $t = (1,14 \pm 0,08) \text{ s}$ (Deardorff).	0,27	0,38	0,31
14. Interpreting the slope of a log-log graph.	0,10	0,25	0,32
15. Choosing the graph that best represents F vs ma .	0,68	0,10	0,07
16. Choosing the parameter that should not change if one wishes to reproduce results of a drop-time measurement in a viscous liquid.	0,34	0,69	0,50
17. Choosing the graph that best represents v versus η given $v = \frac{mg}{6\pi r\eta}$.	0,60	0,28	0,37
18. Selecting the parameter that needs to stay constant if primary students want to know what type of paper airplanes flies the farthest.	0,76	0,35	0,33
19. Finding the graph that cannot represent the results of dropping same density marbles of varying weight in different types of sand and from different heights.	0,51	0,70	0,50
20. Selecting the proper combination of pendulum length and weight if one wishes to assess if the length of a pendulum affect its period (Tobin & Capie).	0,76	0,58	0,43
21. Selecting the phrase which best describes the reasoning behind the preceding answer.	0,80	0,65	0,53
22. Choosing the graph that best represents av vs m if F is constant.	0,57	0,82	0,56
23. Extrapolating a lagoon population (and its uncertainty) of hermit-crabs from given sample area and population (both with uncertainty).	0,50	0,75	0,46
24. Selecting the best weighing strategy to measure the mass of one small steel ball.	0,13	0,32	0,29
25. Selecting the main reason to quantify the uncertainty (no good answer).	N/A	N/A	
26. Your preference: hard science or life science.	N/A	N/A	
27. Your age range: 17 or less, 18, 19 or more.	N/A	N/A	
28. Have you participated in a previous version of this study?	N/A	N/A	
29. Your sex (for statistical purposes).	N/A	N/A	

Overall results are displayed in figure 14. The average was 38% with a standard deviation of 16%, a standard error of measurement of 8,4% and an average discrimination coefficient of 0,428. Results segmented by each topic are presented in figure 15 and summarized in table XXVIII.

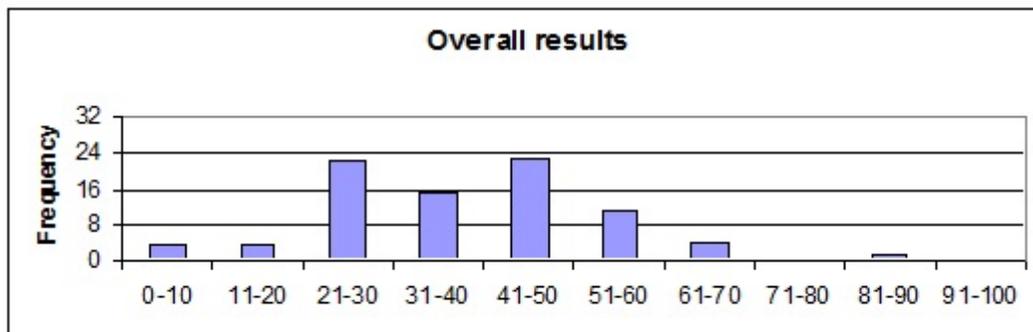


Figure 14 Overall results distribution (absolute frequency vs. results in %).

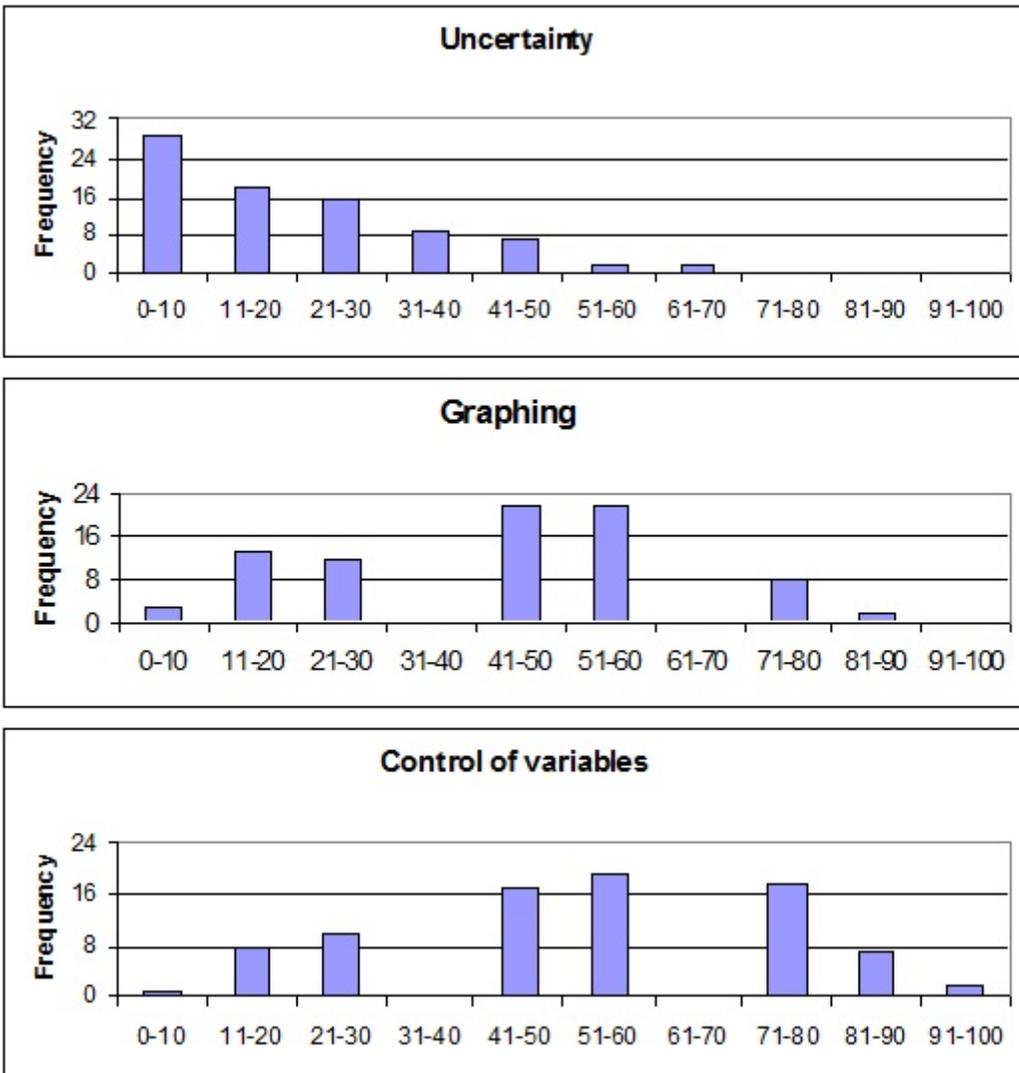


Figure 15 Results distribution by topics (absolute frequency vs. results in %).

Table XXVIII- Overall and segmented results.

(N = number of questions, Fac. = success rate, S.D. = standard deviation (sample), S.E.M. = standard error of measurement, Disc. = average discrimination coefficient, α = Guttman-Cronbach alpha coefficient). (82 students)

	N	Fac.	S.D.	S.E.M.	Disc.	α
Overall	24	0,38	0,16	0,16	0,43	0,70
Uncertainty	10	0,24	0,17	0,13	0,49	0,45
Graphing	7	0,42	0,20	0,16	0,63	0,36
Control	7	0,52	0,23	0,16	0,68	0,52

Specific results and discussion

The low overall success rate is not entirely unexpected because of the type of items in the questionnaire itself which differed greatly from a standard laboratory examination. The questionnaire was primarily designed to elicit students' conceptions and was unusual for the students. Even experienced teachers confessed that they were not used to think into such subject matter with a contraposition perspective: only one of the choices being right, your judgment needs careful attention. Secondly, we voluntarily excluded questions that were obviously too easy for students of that age. Such questions came from previously published instruments that targeted 12-14 year-old students. Those questions were question 9 of the TOGS that was correctly answered by 90%, and question S022235 (MSBlock S01) of the eight grade science portion of the 2003 Trends in Mathematics and Science Study (TIMSS) (Martin, Mullis, Gonzalez & Chrostowski, 2004) answered correctly by 75% of students (results from

the second version of the questionnaire). Questions 20 and 21 of the third version of the questionnaire came from the GTLT and were answered correctly by about 75% of students. We kept them in reason to their connection with the historically important Piagetian hypotheses of a chronological maturation toward formal operational reasoning.

Which leads to the seemingly strange negative correlation of $-0,27$ between questions 20 and 27. This would imply that logical reasoning abilities are less developed in the older students that participated in the study. In some way, this coherently reflects the fact that those older students displayed a non regular scholar journey, for example by failing a previous science course. The 17 years old students (12) had an overall average of 52%; the 18 years old students (49) had an overall average of 38%; the 19 years old students (21) had an overall average of 29%. In the second version of this questionnaire, the same questions displayed a correlation coefficient of $0,53$ for 180 second semester students and $-0,20$ for 80 third semester students.

The stronger correlation coefficient of the whole questionnaire ($0,72$) is observed between questions 20 and 21, the latter being the written justification of the choice of pendulums of question 20. This coefficient is somewhat misleading when compared to the fact that of the 62 students who selected the correct answer in question 20, 60 selected the proper justification in question 21, a proportion of 97 %. Similarly, all the other couples of choice-justification were coherent ($8/9$, $5/5$). This leads us to the conclusion that the student population under study manifests formal reasoning capabilities. Hence, it appears that even though laboratories do not

teach explicitly the hypothetico-deductive mode of model building, most students possess the intellectual tools required to control variables.

One of the working hypotheses we started with was that uncertainty mastery would be correlated with formal reasoning capability. This did not manifest itself in the data. Questions 1 and 23 (both related to uncertainty quantification in a product) showed non-existent or weak correlation coefficients with question 20 (0,07 and 0,341). A troubling fact is that questions 1 and 23 were weakly correlated with each other (0,24). In that case, the correlation coefficients must be viewed in parallel with the raw data showing that of the 38 students who answered question 1 correctly, 24 answered question 23 correctly, a proportion of 63%. By opposition, of the 14 students who incorrectly added absolute uncertainties in question 1, only 2 did the same in question 23.

This study corroborates some of the difficulties detected in the few researches devoted toward uncertainty measurement quantification by post-secondary students but new results were obtained and a greater detail of analysis emerged. As we have shown, the results are sobering. Even with proper training:

- 44 % to 50 % evaluated a completely unreasonable estimate of a product uncertainty,
- 85 % of students did not add instrumental and non-instrumental uncertainty,
- 70% did not recall the proper procedure to find the uncertainty of a ratio,

- 77% did not take into consideration the fact that the uncertainty of one component of a stacked pile of identical components is lower than the uncertainty on the measure of the whole pile,
- 85 % erroneously used the max-min method on a simple sinus function,
- 82% failed to discover the principal cause of discrepancy between an expected and actual time measurement,
- 73 % did not recognize the component of an experiment that contributed the most to the overall uncertainty,
- 72 % would not use a staking strategy to weigh identical steel balls on a digital scale (28 % showing the belief that it is impossible to have an uncertainty value lower than the scale resolution.).

Although less dire than for the uncertainty portion, results related to linking a mathematical formula and a graphical shape were somewhat disappointing. One could have wished for better conceptual awareness of such an apparently simple concept, especially from students who successfully completed two calculus classes. More specifically:

- 89 % of students felt obliged to associate a function with a monotonically non-linearly decreasing set of data points (43 % selecting a $1/x$ function, 20 % selecting a e^{-x} function),
- 33 % wrongly associated an inversely proportional relationship with a linearly decreasing function,

- 62 % did not recognize the proper axes that would linearize a direct polynomial relationship,
- 90 % did not know the correct interpretation of the slope of a linear log-log graph,
- 40 % did not predict correctly the shape of a linear relationship (F vs. ma) or inversely proportional (a vs. m).

For the control of variables topics, students performed much better than for uncertainty. The three easiest questions of the questionnaire were related to control of variables and so were the two discarded questions that contributed little to discriminate between students. A real surprise was that most students did not know the formal definition of an independent variable (59 % thinking that it is not affected by the other variables, 12 % thinking it remains constant throughout the experiment). Even though they manifestly understand the necessity to vary only one parameter at a time (question 20 was answered correctly by 75% of the students), they lack the proper vocabulary to explain an experimental strategy. Even if we were dealing with gifted students having received advanced classes in science and mathematics, a small portion showed marked deficiency in their knowledge base. A detailed look at the students' choices revealed that:

- 84 % did not recognize the definition of an independent variable,
- 65 % failed to identify the proper logical continuation of an experiment,
- 65 % failed to recognize the fact that, given the equation, one could let m vary if the desired outcome is the measurement is η .

- 24 % failed to identify properly a logical independent variable in a proposed experiment,
- 49 % failed to select which graph is impossible to obtain with a described experimental setup.

We do not claim that the 7 questions of the present questionnaire related to the control of variables are a valid assessment of formal operational thinking. We were mostly concerned to see if this basic scientific skill is mastered and if it correlates with other results. We saw that this was not the case. To assess more correctly, from the Piagetian paradigm, the connection between the "intellectual level" and the two other topics in the questionnaire, the CTFR should have been employed simultaneously as in the Coletta and Phillips study (2005). Passing jointly the CTFR with the Force Concept Inventory (FCI) (Hestenes, Swackhammer & Wells, 1992), they discovered a strong correlation between normalized gains in the FCI (post-test) and scores on the CTFR. In contrast this present study showed only weak correlations, at best, between the formal reasoning "meter stick" of variable control and uncertainty estimation despite the latter being an "almost" post-test since following at least 60 hours of formal laboratory instruction. So our suspicion is that formal reasoning abilities are not playing a major role in impeding the learning of uncertainties evaluation. The absence of strong correlations between the different topics of the questionnaire could be construed as evidence that they are largely unrelated intellectual skills.

The situation previously depicted as related to measurement uncertainty may appear dire but it could be worst. To advance some evidence, let us present results gathered in another institution where there is considerably less emphasis on uncertainty calculations. The questionnaire was distributed to 29 third semester students (almost simultaneously with our main population) beginning their third class of physics, so they are academic twins to our main population. We did not discuss their results previously because they are not representative of the population of this different institution as they are out of pace with the regular calendar. So they may be considered "weak" students as compared to our main population. The overall results were spectacularly low with an average of just 29%. On question related to uncertainty, the average was 16%! The other two topics showed averages of 35%. Zero students responded correctly to questions 3 and 8. A few questions showed better answer rates than from our main population (2, 6, 11, 13 and 14) although the best rate was 39% (question 13).

Those last results lead us to believe that specific instructions on measurement uncertainty can improve the students' proficiency but the conceptual network is not properly instilled. One question even demonstrated some evidence of deleterious teaching effect: in question 3, 52% of our main population estimated the uncertainty reading on a fine pointer at $\frac{1}{2}$ of the finest division, corresponding to what they have learned to do in most labs. But the pointer could easily be interpolated to $\frac{1}{20}$ of the finest division!

To quell any suspicion that students guessed their way through the questionnaire, we may advance that no questions displayed random choosing between distracters. For example,

students did not receive specific training related to log-log graphs and the results in question 14 were below random guessing (students selecting the usual linear interpretation of a slope or an exponential function). Also, no student selected distracter D in question 8 (the proper choice if a quadrature addition, which was not taught, is employed).

Students seem not to have developed a "feel" for the magnitude of their uncertainty estimation (is 100 ± 90 more correct than 100 ± 3 ?). They did not activate proper procedures to calculate uncertainties. Even the more basic rules, such the max-min method, were not properly mastered even though students used them on numerous occasions (a professor was surprised by the poor results for question 11 since he just corrected a lab report where an eerily similar calculation had to be made and all reports showed correct results. The population under study has had to make the exact same report the year before).

Our interpretation of the questionnaire results and knowledge of the population under study lead us to believe that students possess the intellectual tools required to control variables and to connect a graph to a formula. What they seemed to lack is the habit to think about such things. Learning uncertainty estimation appears vastly more difficult than can be expected from the easiness of the mathematics involved. The algorithmic procedures taught to our students were clearly not enough to instill a proper cognitive framework. To understand why, more studies would be needed to assess the conceptual barriers impeding the learning of uncertainty quantification.

Conclusion

We developed a multiple-choice questionnaire containing 24 cognitive questions related to uncertainty estimation, graph shape vs. mathematical model and control of variables. The questionnaire aimed 17-19 years old science students in Montreal, Canada. No strong correlations were observed between the different topics of the questionnaire which could be interpreted as evidence that they are largely unrelated intellectual skills. Students are not accustomed to predict an expected graph shape or control variables in a more complex setting than regular, cookbook, laboratory experiments but they possess the intellectual tools required. Uncertainty estimation was shown to be a difficult subject for students and professors alike. Although every uncertainty question could be answered following standard procedures, students often applied haphazard rules leading to results widely different than the expected outcome. Those results could not be attributed to unprepared or "weak" students since the same questionnaire given in another institutional setting, where uncertainty estimation receives considerably less emphasis, showed an utter lack of knowledge base. Thus, learning good practices to estimate uncertainty was shown to occur but this subject is considerably harder than teachers may suspect.

CHAPITRE 8 - ARTICLE 3

Cet article pourrait être publié dans les revues suivantes :

International Journal of Science Education

Journal of Research in Science Teaching

Quantification of experimental uncertainty by college students in life and applied sciences.

Abstract

The coherence and the breadth of the knowledge base of experimental uncertainty quantification of college science students was tentatively established through quantitative analysis of a validated pencil-and-paper multiple choice questionnaire and through qualitative analysis of a semi-directed laboratory. Even after 90 hours of instruction, the conceptual network was shown to lack coherence with the exception of the application of the simple rules method in the propagation of uncertainties. The overall performance was shown to be poor with both instruments, few students being able to apply correctly the basic concepts of uncertainty quantification. The students used spontaneously a repeated measurement strategy but were hindered by their strong belief that the reading uncertainty is always equal to the instrument tolerance. This strong erroneous belief was consistently displayed in the written instrument. The students more likely to give correct answers were those who seemed to have developed an intuitive perception of the face validity of an uncertainty numerical value. Students using the spread of multiple trials as uncertainty estimates were no more likely to show conceptual coherence. An extremely statistically significant difference was shown to occur between the average of girls and boys, the latter outperforming the girls. Further studies will be needed to identify the cause of this gender gap. Educational implications are discussed as some of the “misconceptions” identified may originate from instruction.

Introduction

Uncertainty quantification can have profound impact on decision making. For example, in the global warming debate, different scenarios carry with them severely different consequences and the decisions that need to be made today cannot be taken without accounting for the numerical evaluation of the degree of confidence scientists associate with each possible future level of global warming. Given this uppermost importance, the quantification of experimental uncertainty is a required metrological competency in many curriculums in higher level science education courses (Welzel *et al.*, 1998) and is often taught from the high school level. But few educational studies have evaluated the effectiveness of teaching laboratories to impart a correct understanding of measurement uncertainty at the college and university level. However, the actual methods taught to college students may appear vastly different than those used by high-technology laboratories and industry. Hence, before delving into an educational investigation of the metrological competency displayed by science students, it is worthwhile to demonstrate the common ground shared by industry standards and the customary educational methods utilised to quantify uncertainty.

In research laboratories or in the industry, the (almost) universally employed method to quantify uncertainty is codified by the *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* or “GUM” published by the ISO institute (ISO, 1993). The GUM defines a conventional classification of uncertainty components into two types: A. those which are evaluated by statistical methods and B. those which are evaluated by other means. Uncertainties on repeated measurements (Type A) are estimated via the standard deviation of all relevant measurements.

Type B evaluation of standard uncertainty is usually based on scientific judgment using all the relevant information available. Measurement uncertainties (Type A, B or both) are to be combined in quadrature in the uncertainty budget to give the overall measurement uncertainty. The propagation of uncertainties is based on a first-order Taylor series approximation of the function that relates a derived quantity, say z , to its constituents. If $z = f(x, y, \dots)$, with x, y, \dots representing the mean of many observations taken under similar conditions, then

$$u_c(z) = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 u^2(x) + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 u^2(y) + \dots + 2 \frac{\partial z}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial y} \rho_{xy} + \dots}$$

where $u_c(z)$ is the combined standard uncertainty of the measurement, $u(x)$ is the estimated standard deviation of the mean and ρ_{xy} is the estimated covariance associated with x and y . The GUM provides a probabilistic framework to interpret an uncertainty estimate; $u_c(z)$ defines an interval of confidence $z - u_c(z)$ to $z + u_c(z)$, which is commonly written as $Z = z \pm u_c(z)$, within which the value of the measurand Z estimated by z is believed to lie with a level of confidence of approximately 68 percent. Different coverage factors (such as $Z = z \pm 1.96 u_c(z)$) can be used to increase the probability that the measurand is contained in the interval of confidence.

However, at the high school, college or undergraduate level, uncertainties are generally evaluated with a simplified version of the GUM guidelines. Repeated measurements are attributed an uncertainty equal to half the spread of actual measurements (max-min method)

plus an uncertainty equal to the resolution of the apparatus or calculated through a formula provided by the manufacturer. Uncertainties may also be evaluated from the standard deviation of relevant measurements. Uncertainty components are added linearly. The propagation of uncertainties is based on a simplified first-order Taylor expansion of z ,

$$\Delta z = \left| \frac{\partial z}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial z}{\partial y} \right| \Delta y + \dots$$

where Δz is the uncertainty of z , Δx is the uncertainty of x , etc. The measurand Z is commonly written as $Z = z \pm \Delta z$. The preceding propagation equation gives rise to some simple rules to estimate uncertainties. Notably, for multiplication and/or division, the relative uncertainty on z being equal to the sum of relative uncertainties, that is $\Delta z/z = \Delta x/x + \Delta y/y + \dots$. In cases where the partial derivatives are too complicated to evaluate or, in the still more common instances where students do not master calculus, the uncertainty on z is established through the max-min method, that is $\Delta z = (z_{\max} - z_{\min})/2$. Evaluated in this way, uncertainties are always numerically bigger than what would be calculated from the GUM framework, hence increasing the probability to cover the measurand true value at the expense of the credibility of the final result.

Hence, uncertainty quantification is a process that starts with the determination of proper measurement uncertainty values, is followed by the application of proper calculation algorithms (max-min, simple rules, partial derivatives) to estimate the uncertainty of derived results and then terminates with a reappraisal of the laboratory procedure by looking at the diverse contributions to the overall uncertainty. In this fashion, the GUM guidelines and the simplified

version share a common ground. The main differences between them reside in the numerical estimate of the uncertainty and the clear probabilistic framework to interpret intervals of confidence which is lacking in the version usually presented to students. Despite the absence of a quantitative estimate for the probability to include the measurand, the simplified version is generally introduced with a similar mind set where the interval of confidence is said to contain, *probably*, the true value of the measurand but without giving any concrete numbers to judge what this probability may be.

Previous studies on the quantification of uncertainty

Science students are required to evaluate uncertainties on measurements and employ uncertainty propagation algorithms whether within the GUM framework or the simplified model, but what are the main difficulties they encounter ? In 1993, Marie-Geneviève Séré, Roger Journaux and Claudine Larcher published the first report of the actual work of 20 university science students in France that were dealing with uncertainty quantification in a compulsory laboratory course (Séré, Journaux & Larcher, 1993). They uncovered some staggering deficiencies in their competency: students often ignored uncertainty quantification, used improper methods to compute the uncertainty on repeated measurements, had a poor understanding of the procedures and advantages of statistics and sometimes established a hierarchy of measurements where follow-up measurements were used to judge the validity of the first. In 1996, Robin Millar and Fred Lubben (Millar & Lubben, 1996) assessed 11, 14 and 16 year old children's ideas about the reliability of experimental data. They proposed a classification scheme where students are either using a “point” or a “set” paradigm. Their study

was expanded at the university level in 1998 (Allie, Buffler, Kaunda, Campbell & Lubben, 1998). Students using the point paradigm seemed to believe in the absolute validity of a single measurement as a representation of the measurand and would only use a repeated measurement strategy to check the validity of their first measurement as noted by Séré, Journaux and Larcher. Students using the set paradigm progressing in a stage model toward an increasingly sophisticated statistical frame where measurements are repeated to ascertain the random component of measurement uncertainty. In their thesis work David Abbott and Duane Deardorff, under the guidance of Bob Beichner, examined the fundamental metrological practices utilized by students (Deardorff, 2001, Abbott, 2003). Deardorff's main conclusions were that students often make arbitrary judgments about agreements between results without considering the intervals of confidence, they tend to avoid numerical quantification of uncertainty, they fail to identify the main source of error and that their expertise increases only to a small extent with instruction. Even instructors were reluctant to be called "experts". The main finding was perhaps "*...the realization that students have significant difficulties simply obtaining accurate measurements of physical quantities. The issue of determining the uncertainty of a measurement is secondary compared to the importance of finding a reasonable estimate of the intended measurement*" (Deardorff, 2001, p. 105). For his part, Abbott developed an eleven item test grouped into four main aspects of performance: "point/set" reasoning, meaning of spread, ruler reading and "stacking." Some relevant findings to this present paper were that the "point/set" classification scheme was not a good predictor of other aspects of test performance (p. 90), that the comparison between multiple questions within

pairs of performance aspects (e.g. two measures of ruler reading and two measures of outlier exclusion) generally failed to elicit consistent decision making (p. 91) and that anecdotal evidence suggests that some students hold strong reservations about stacking (p. 97). The impact of instruction on understanding uncertainty quantification was evaluated by a number of researchers (Lippmann Kung, 2005; Volkwyn, Allie, Buffler & Lubben, 2008; Pillay, Buffler, Lubben & Allie, 2008). Most of those studies have been set in a GUM framework and found that even after instruction, it is often the case that the majority of university students are still not properly using statistical techniques.

Operational definitions

Firstly, a terminological issue must be clarified. The quantification of the uncertainty of a given instrumental evaluation of a quantity is called measurement uncertainty. However, measurements are generally placed at the beginning of a chain of calculations that permits to derive pertinent quantities. Obviously, the uncertainty on these quantities should be quantified but since they are not measured, it may appear incorrect to utilize measurement uncertainty to characterize them. In this paper, we will use the term experimental uncertainty to identify the quantification of any results, be they measurements or derived quantities. When necessary for clarification, the term measurement uncertainty will be employed in relation with actual physical measurements and uncertainty propagation for derived results.

Our study population will be described in more detail later but it is useful here to indicate their expected metrological competencies. The following list is not exhaustive but represent a fair

assessment of important metrology topics that students have learned at the college level and have employed throughout their science courses laboratories. Since we were interested with the quantification of experimental uncertainty, we pruned the topics to keep only those directly involved in the numerical estimation of experimental uncertainty. They are gathered in table XXIX below. The topics are grouped in the three main categories of this present study and the usual methods employed to operationalize them concretely are presented.

Table XXIX - Uncertainty topics.

TOPICS	METHOD
Measurement uncertainty	
Reading uncertainty on a scale	No clear-cut method, often $\frac{1}{2}$ the smallest graduation
Repeated measurements uncertainty	half the spread plus reading uncertainty
Stacking strategies to reduce uncertainty	overall uncertainty / number of objects
Uncertainty propagation	
Max-min method	$\Delta z = \frac{z_{\max} - z_{\min}}{2}$
Simple rules methods (addition, subtraction)	$\Delta z = \Delta x + \Delta y$
Simple rules methods (multiplication, division)	$\frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$
Simple rules methods (power function)	$\frac{\Delta z}{z} = n \cdot \frac{\Delta x}{x}$
Uncertainty budget	
Repeated measurements uncertainty	Linear addition of uncertainty components
Evaluating the most prominent contribution to the overall uncertainty of a derived quantity (multiplication)	Finding the parameter with biggest relative uncertainty

Methodology

A mixed method was employed to evaluate the coherence and the solidity of the conceptual knowledge displayed by college students in relation to quantifying measurement uncertainty. An 18 multiple choice question test was developed for the estimation of measurement uncertainty, uncertainty propagation and uncertainty budget. Almost each subject presented in table XXIX was present twice in the questionnaire to determine the coherence of students choices. Each question distracters were based on common misconceptions displayed in the validation process or well known by experienced teachers. The results were then analysed to determine the extent of similarities in the pattern of responses using a novel tool, the matrix of specific discrimination coefficients, which will be described later.

To alleviate some of the limitations of multiple choice questionnaires (random guessing, lack of commitment, reading mistakes), a qualitative portion was established to verify if the difficulties detected in the paper version were also present in a concrete laboratory context and also to permit the emergence of unexpected behaviours. To this end, a 50 minute laboratory was designed. It was to be taken by dyads that were remunerated and accepted to be filmed and interviewed. The protocol was open ended (it is described later) but was clearly related to a educational context and the material given was familiar to the students. The measurement involved (the viscosity coefficient of baby shampoo) was a topic in a chemistry laboratory but was measured with a completely different setup. To achieve the goals, a fair proportion of topics covered in the pencil -and-paper test about the quantification of experimental uncertainty would have to be taken into account.

Demographics and description of students participating in this study

The source of data of the quantitative portion of this study comes from fourth semester students studying in Natural Sciences in Quebec, Canada. (In Quebec, college is a 2 years intermediate level between high school and University). Students are typically aged between 17 and 19 years old, corresponding to the 12th and 13th grade and were selected at entrance in relation to their grades in high school. Most students aspire to continue their studies at the university level in life sciences, physical sciences and applied sciences.

Before their participation in this study, the student's had approximately 90 hours of laboratory exposure. The curriculum students followed, before answering the questionnaire, comprised two courses in physics (mechanics, electricity and magnetism), two courses in chemistry (general chemistry and solutions) and one course in biology (genetics and evolution). They also followed three compulsory mathematics courses (calculus I, calculus II and vector algebra). Depending on their inclination, students followed a third course in physics (optics and modern physics) or in chemistry (organic chemistry). In all laboratory work, the quantification of experimental uncertainty is given an uppermost importance and is taught from the first semester.

Validation procedure

The quantitative results presented come at the end of five iterations. A combination of internal validation (jury of 6 physics professors) and external validation (approximately 250 students participated in previous versions and 12 students accepted to be interviewed to provide verbal or written input) was employed to produce the present version (Winter2008). To validate the chosen distracters, an open version was passed to two groups of about 30 students each. This permitted to include some hitherto unsuspected answers that were included and passed on to the next iteration. The Winter2008 version displays an alpha coefficient of 0,667 with a standard error of measurement of 11,1 %.

The qualitative portion followed a similar validation process but on a reduced scale due to time constraints. The protocol was followed by 6 students on a voluntary basis at the end of a shortened physics laboratory session. They were not formally interviewed but they did express some comments that permitted to adapt some wording ambiguities and scale back the protocol to more realistic goals that can be attained in 50 minutes. The interview process was formally introduced in the next version as was the videotaping of the session. The modified protocol was passed by two dyads and it worked satisfactorily. The qualitative protocol was then passed by three dyads of fourth semester students. They were remunerated 20\$ each for 60 minutes of participation and were guaranteed complete anonymity.

Description of written questionnaire and general results

The questionnaire was distributed in the first week of the winter 2008 semester to 171 second year students in their physics class. The professor explained that their participation was facultative, that all copies were anonymous so no results could be traced back to them, and that there would be no post-test. Most students completed the task in 25 minutes. The professor observed a strong commitment to the questionnaire. Nevertheless, with the objective of rendering the results more robust, every copy with any missing entry, be it a single item, was discarded. Thus the actual number of valid copies was 151.

The overall average was 37,2% (S.D. 19,3%) and the grade distribution histogram is presented in figure 16. Boys displayed an average of 43,0 % (S.D. 19,2 %, $n = 77$) and girls displayed an average of 31,1 % (S.D.17,5 %, $n = 74$).

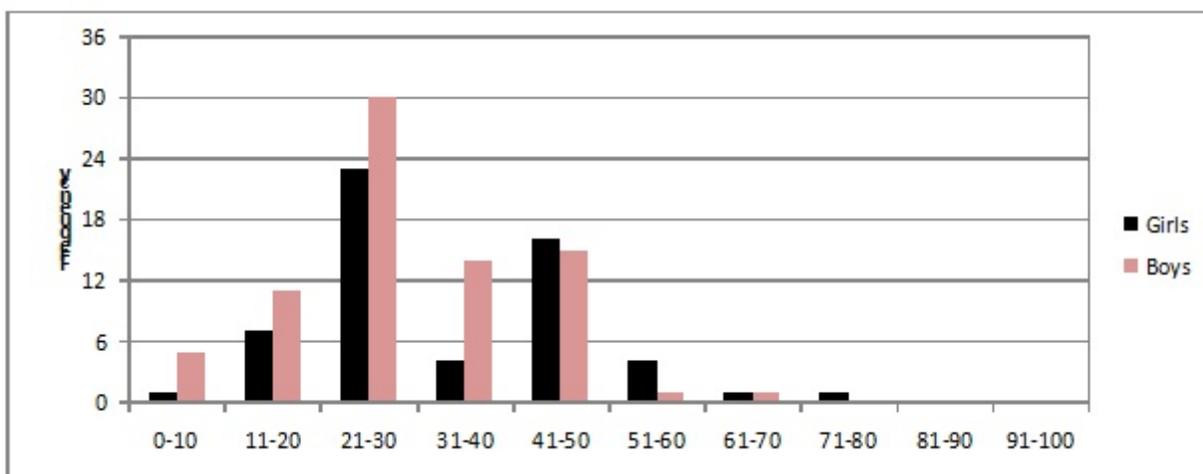


Figure 16 Overall results histogram

Question by question results are indicated in table XXX along with a detailed description of each question. Questions that were adapted from Deardorff and Abbott are indicated.

Table XXX - Results of written questionnaire.

Topics covered by each question of the Winter2008 version (Fac = success rate, Disc.= discrimination coefficient Rpbis = point biserial correlation). All results in %.

	Fac.	Disc	Rpbis
1 Calculating the uncertainty of the volume of a parallelepiped of known sides	21	61	55
2 Reading uncertainty on a graduated scale with a fine pointer	17	3	2
3 Estimating the uncertainty of a hamster's weight given three data points and an imperfect scale	14	26	24
4 Calculating the uncertainty of $\sin A$, given $A = 82^\circ \pm 1^\circ$ (Deardorff)	19	45	32
5 Choosing the best suggestion to improve the precision of the experimental acceleration result given $h = (6,2 \pm 0,1)$ m, $t = (1,14 \pm 0,08)$ s and $a = 2h/t^2$ (Deardorff)	52	57	39
6 Given, $M_p = a(R^3/T^2)$ calculate the uncertainty of M_p given R and T	39	80	62
7 Estimating the width and it's uncertainty of one diskette from a picture of ten diskettes stacked with a ruler in front of them (Abbott)	16	21	22
8 Given the measure of one side of a square, calculate the uncertainty of its perimeter	85	54	38
9 Given the measure of one side of a square, calculate the uncertainty of its area	41	91	65
10 Extrapolating a lagoon population (and its uncertainty) of hermit-crabs from given sample area and population (both with uncertainty).	46	90	66
11 Selecting the best weighing strategy to measure the mass of one small steel ball.	24	44	43
12 Evaluating the uncertainty of the radius of a cylinder given the uncertainty of its diameter	36	66	50
13 Evaluating the significance of a difference	56	56	40
14 Calculating the uncertainty propagation of an exponential function (bacterial growth)	49	78	49
15 Selecting the main reason to quantify the uncertainty (no good answer).			
16 Your level of confidence of your competence in uncertainty quantification.			
17 Your age			
18 Your sex			

Table XXXI illustrates the Pearson moment correlation coefficient for each combination of items. Results significant at the 0,05 and 0,01 (two-tailed) significance level are indicated.

Table XXXI - Correlation coefficient matrix.

(* = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$)

	Q. 1	Q. 2	Q. 3	Q. 4	Q. 5	Q. 6	Q. 7	Q. 8	Q. 9	Q. 10	Q. 11	Q. 12	Q. 13	Q. 14
Q. 1		0,11	0,20**	0,12	0,13	0,32**	0,04	0,18*	0,39**	0,38**	0,11	0,12	0,11	0,16**
Q. 2	0,11		0,04	-0,10	0,00	-0,1	0,05	-0,07	-0,12	-0,17*	-0,07	-0,05	-0,11	-0,07
Q. 3	0,20**	0,04		0,02	-0,01	0,09	-0,04	0,03	0,15	0,06	-0,03	0,05	0,01	0,08
Q. 4	0,12	-0,10	0,02		0,22**	0,23**	0,11	-0,05	0,03	0,09	0,01	0,20**	0,03	0,07
Q. 5	0,13	0,00	-0,01	0,22**		0,42**	0,05	0,02	0,10	0,24**	0,16**	-0,01	-0,05	-0,02
Q. 6	0,32**	-0,08	0,09	0,23**	0,42**		0,03	0,21**	0,26**	0,48**	0,16**	0,22**	0,08	0,15**
Q. 7	0,04	0,05	-0,04	0,11	0,05	0,03		-0,03	0,02	-0,03	0,08	0,20**	0,03	-0,02
Q. 8	0,18*	-0,07	0,03	-0,05	0,02**	0,21	-0,03		0,32**	0,30**	0,09	0,15	0,06	0,19**
Q. 9	0,39**	-0,12	0,15	0,03	0,10	0,26**	0,02	0,32**		0,50**	0,23**	0,36**	0,22**	0,27**
Q. 10	0,38**	-0,17**	0,06	0,09	0,24**	0,48**	-0,03	0,30**	0,50**		0,25**	0,19**	0,25**	0,20**
Q. 11	0,11	-0,07	-0,03	0,01	0,16**	0,16**	0,08	0,09	0,23**	0,25**		0,15	0,14	0,22**
Q. 12	0,12*	-0,05	0,05	0,20**	-0,01	0,22**	0,20**	0,15	0,36**	0,19**	0,15		0,13	0,20
Q. 13	0,11	-0,11	0,01	0,03	-0,05	0,08	0,03	0,06	0,22**	0,25**	0,14	0,13		0,34**
Q. 14	0,16**	-0,07	0,08	0,07	-0,02	0,15**	-0,02	0,19**	0,27**	0,20**	0,22**	0,20	0,34**	

Description of semi-directed laboratory and general results

Results from the semi-directed laboratory comprise three main source of data: videotaping of sessions, semi-structured interviews immediately following the completion of the experiment and written notes taken during the laboratory by the students themselves. To assist in interpreting results, the full version of the protocol is presented in figure 17.

Viscosity is a measure of the flowing resistance of a liquid. Logically, if a ball is dropped in two different liquids, the maximum speed (limit) attained would be greater in the less viscous liquid. This property can be utilised to evaluate the viscosity coefficient. When a sphere is moving at slow speed (<10 m/s) in a liquid, it can be shown that the liquid exerts a friction force given by : $f_{visquous} = 6\pi\eta vr$ where v represents the speed of the sphere, r the radius of the sphere and η the viscosity coefficient.

Goal : Determine the viscosity coefficient of baby shampoo at room temperature.

A preliminary result gave $\eta = (2,6 \pm 0,6)$ kg/(m·s) at $T = (21,5 \pm 0,2)$ C.

Directives :

- You must produce a hand-written and not edited report onsite.
- Write and draw as much as you can.
- You are allowed to use the reference manuals and, if you get stuck, you can consult the professor.
- No specific protocol will be given, It is your duty to find a proper method.

Available material :

2 chronometers (smallest graduation : 0,01 s); 2 graduated cylinders (smallest graduation : 2 mL); Digital balance (smallest graduation : 0,1 g); Micrometer (smallest graduation : 0,01 mm); 30 cm ruler (smallest graduation : 1 mm); Steel balls (approximately 200); Laboratory guide; Mechanics physics book; Paper sheet to take notes; Pencils; Calculator; Baby shampoo.

Figure 17 Semi-directed laboratory protocol.

The videotaped recordings were not analysed for this paper but offered a way to revisit the strategies deployed by the dyads. The team interview following the completion of the experiment was semi-structured, to allow for unexpected contingencies or behaviours, and was designed to elicit the reasoning leading to specific numerical evaluation of uncertainty values.

To complete the tasks, the students had to measure the following quantities: time with a digital chronometer, mass with a digital scale, length with a ruler and diameter with a micrometer. The derived final quantity, the viscosity coefficient, is obtained via the following equation

(containing only measured quantities and constants): $\eta = \frac{mgt}{3\pi ld}$

where m represents the mass of one steel ball, g represents the local Earth gravitational acceleration ($9,81 \text{ m/s}^2$), t represents the time the steel ball spent at constant speed in the liquid, l represents the distance covered by the steel ball at constant speed in the liquid and d represents the diameter of one steel ball. The same competencies explored in the paper version could be found in the semi-structured laboratory: measurement uncertainty, uncertainty propagation and uncertainty budget.

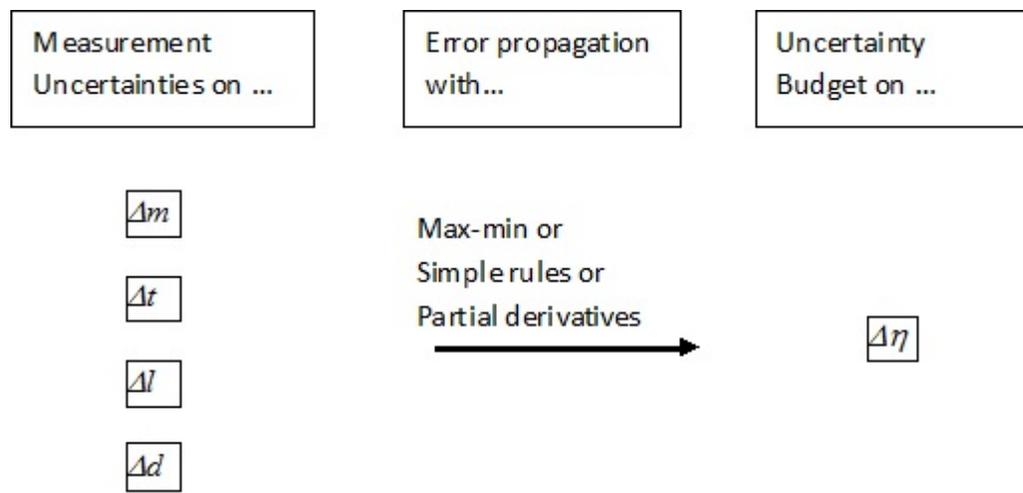


Figure 18 Similarities between quantitative and qualitative instruments.

Salient results

It is worthwhile to note that the students were not required to quantify experimental uncertainty. One of our implicit objectives was to verify if the teams would “spontaneously” deploy the known methods to evaluate a numerical estimate on uncertainty. Obviously the context was informal but embedded in a scholarly setting, with scientific material and with clues cuing toward the incorporation of uncertainty. Of the four teams that participated in the final version only one did not quantify uncertainty to its full extent but still tried to minimize uncertainty and quantified it in intermediate steps. In the preliminary version, every team also quantified experimental uncertainty. This could be viewed as the illustration that students are confident in their knowledge of uncertainty quantification. Also, the teams had complete access to a laboratory manual if they had any hesitations. Only one team did indeed consult the manual and only to confirm their equation (which was correct).

Measurement uncertainty

Measurement uncertainty on m

The strategy employed to measure the mass of the steel balls has been unanimous: place one ball on the digital scale and take a reading. This created the reported value $m = (0,3 \pm 0,1)\text{g}$. About half of the teams expressed concerns about this high relative uncertainty (33%) and said so in their report when looking at the uncertainty budget but none suggested a stacking strategy of weighing simultaneously a greater number of the obviously similar, nearly identical, steel balls provided with the experiment. A high achieving student even wrote : “ *the balance is crazy*” after measuring successively 10 individual balls and getting exactly the same result. In

the interview portion, students expressed a strong misconception that you cannot measure the mass more precisely than the given precision of the scale.

Measurement uncertainty on t

When measuring the time it took for the steel balls to drop to the bottom of the graduated cylinder, all of the teams employed a repeated measurement strategy. The time values were then averaged (after removal of outlier values) and this created their accepted numerical value. Some teams also used two chronometers, one for each member, to measure time simultaneously. These value were averaged and an average of averages was then calculated for the multiple trials. A typical result reported by this team was $t = (8,83 \pm 0,03)$ s. In this latter case, the spread of time values was approximately 0,4 s. All the other teams had similar spreads but they universally reported an uncertainty of 0,01 s. When asked to justify their value, they all said that this was the correct uncertainty since it represents the precision of the digital chronometers even though they were aware of the human limitations of manual timing.

Measurement uncertainty on l

Different strategies were applied to evaluate l . Some teams noticed that the graduation on the cylinder were 1 cm apart and use them as a ruler. Most of the other teams measured the height of the shampoo meniscus and used that value afterward, oblivious to the fact that this introduces a systematic error since the limit speed is not attained instantaneously at the liquid-air interface. One team added more shampoo to lower the relative uncertainty on l . The reported values of Δl were 0,05 or 0,1 mm completely ignoring the non trivial parallax error.

Measurement uncertainty on d

The measurement of the diameter with the micrometer was a challenge for students since they were not comfortable with the instrument. After proper coaching, they got the correct value. When estimating the uncertainty, most of the teams asked what they should report. Not having an answer from that strategy, they settled on the smallest graduation, not taking into account the small bumps and bruises on the imperfect, but clearly spherical, steel balls. Half the teams went on to report the uncertainty on the radius by using the same value than the uncertainty of the diameter ! Again when interviewed they expressed the misconception that one cannot be more precise than the instrument.

Propagation of uncertainties

The experimental uncertainty on the value of η was determined by a variety of methods: one team used the max-min, one used the simple rules, one used the linear sum of partial derivatives and one gave up after some meager attempts when team members realized the quantification of uncertainty was not compulsory. The teams used the methods correctly except for some difficulty to properly compute the partial derivatives.

Budget uncertainty

As noted previously, one team noted early the high relative uncertainty on the mass and even though they ultimately used the max-min method, they still noted this as the most problematic value. The team using the simple rules methods evaluated each individual relative contribution

but missed to notice the importance of the mass uncertainty contribution due to a transcription error (0,01 g instead of 0,1 g as the reported uncertainty). The team using the partial derivatives method could not evaluate the most prominent contribution to the experimental uncertainty from their calculations so they double checked by using the simple rules methods.

General discussion

The following discussion will be mostly based on the results of the written questionnaire but will draw as much parallel as possible with the semi-directed laboratory. We will endeavour to look at the data set from an educational research perspective, trying to find recurrent misconceptions, identifying the best predictors of success and tentatively mapping the conceptual landscape emerging from the pattern of answers. For this latter objective, we have developed a quantitative tool: the specific discrimination coefficient.

Specific discrimination coefficients matrix

The specific discrimination coefficients matrix can be thought of as a means to evaluate the coherence (but not the correctness) of the conceptual network emerging from the comparison of the success of each item given the success (or lack thereof) in other items. If two items are related, for example, they both cover the same competency, it could be expected that students would get them both or miss them both. Alternatively, if items cover unrelated subjects, missing one should not affect the probability to be successful in the other. The specific discrimination coefficient of each pair of items was calculated in the following manner: [% of students succeeding question y given they succeeded in question

x] - [% of students succeeding question y given they missed question x]. Results are given in table XXXII. Negative specific discrimination coefficients below -0,1 are in light grey, those above 0,3 but lower than 0,5 are in a deeper shade of grey and those above 0,5 are in the darkest shade of grey.

Table XXXII - Specific discrimination coefficients matrix.

Specific discrimination coefficients below -0,1 are in light grey, those above 0,3 but lower than 0,5 are in a deeper shade of grey and those above 0,5 are in the darkest shade of grey

	Q. 1	Q. 2	Q. 3	Q. 4	Q. 5	Q. 6	Q. 7	Q. 8	Q. 9	Q. 10	Q. 11	Q. 12	Q. 13	Q. 14
Q. 1		0,11	0,23	0,09	0,12	0,36	0,05	0,15	0,52	0,45	0,15	0,20	0,16	0,26
Q. 2	0,12		0,04	-0,10	-0,03	-0,10	0,03	-0,09	-0,15	-0,26	-0,07	-0,05	-0,15	-0,10
Q. 3	0,28	0,05		0,03	-0,03	0,12	-0,03	0,03	0,17	0,06	-0,03	0,08	-0,01	0,10
Q. 4	0,10	-0,09	0,02		0,27	0,26	0,10	-0,02	0,04	0,10	0,04	0,31	-0,02	0,08
Q. 5	0,08	-0,02	-0,02	0,17		0,41	0,05	-0,01	0,09	0,25	0,17	0,00	-0,03	-0,02
Q. 6	0,24	-0,06	0,07	0,17	0,43		0,03	0,16	0,23	0,48	0,14	0,25	0,10	0,20
Q. 7	0,06	0,04	-0,03	0,12	0,10	0,05		-0,07	0,05	-0,06	0,10	0,25	0,07	-0,03
Q. 8	0,18	-0,10	0,03	-0,03	-0,02	0,29	-0,07		0,44	0,40	0,08	0,18	0,11	0,26
Q. 9	0,34	-0,09	0,09	0,02	0,09	0,22	0,03	0,23		0,50	0,18	0,34	0,22	0,27
Q. 10	0,29	-0,15	0,03	0,06	0,25	0,46	-0,03	0,21	0,49		0,20	0,20	0,28	0,24
Q. 11	0,13	-0,06	-0,02	0,03	0,23	0,18	0,08	0,06	0,23	0,27		0,15	0,18	0,27
Q. 12	0,14	-0,03	0,04	0,21	-0,01	0,25	0,14	0,10	0,36	0,22	0,12		0,14	0,16
Q. 13	0,11	-0,09	0,00	-0,01	-0,03	0,10	0,04	0,06	0,22	0,29	0,13	0,14		0,35
Q. 14	0,17	-0,06	0,05	0,05	-0,02	0,19	-0,01	0,13	0,27	0,24	0,20	0,15	0,35	

As an example of using such a table, let us examine the combination of items 1 and 9. The students that have answered item 1 correctly are more likely to be successful in item 9 than those having failed item 1 (the actual numbers are 0,83 and 0,31 representing respectively the proportion of students successful in item 9 given the fact that they succeeded in item 1 (0,83) and the proportion of students successful in item 9 given the fact that they missed item 1 (0,31)). The entire table is not symmetric about the diagonal since different students

may display different combination of success/failure in those two items. A close approximation can be obtained via the Pearson moment correlation matrix but the numerical values are different since the specific discrimination coefficient removes partially the proportion of students having failed item y from the statistic.

Looking at table XXXII, it appears that the conceptual network that students have established concerning uncertainty quantification is not coherent. Many questions relating to same competency display starkly different success rates but more problematically the students selecting a given distracter in question x are often not selecting the logical equivalent in question y . Let us examine in more detail the results of the main section of the written questionnaire and its interaction with the qualitative section.

Measurement uncertainty

In the “real” experiment, students were adamantly using the quoted precision of the apparatus as their estimate on uncertainty on the digital scale or graduated ruler (sometime using half of the smallest graduation). On the written questionnaire, students displayed the same tendency when asked to evaluate the reading uncertainty of a fine needle placed in front of a coarse grid (question 2). Even though the actual image clearly shows that the reading should be read as $4,10 \pm 0,05$, most students (84) selected $4,1 \pm 0,5$ (half the smallest graduation). This may be an obstacle created by the curriculum itself. In many laboratory manuals, the uncertainty on graduated scales is stated as half of the smallest

division. Students seem to apply this by rote not having developed the habit to gauge the range of values that are compatible with a given reading as the estimate of the uncertainty. Séré *et al.* report a similar evidence (Séré, Journaux and Larcher, 1993, p. 431).

The fact that a vast majority of students selected the wrong answer in question 2 explains its many negative specific discrimination coefficients with other questions. Since many “good” students missed question 2, they are still likely to succeed in other questions. Thus, the blind application of the implied rule of systematically using $\frac{1}{2}$ the smallest graduation as the reading uncertainty does not impede the learning of subsequent competencies.

The most challenging question in the written questionnaire was related to the proper estimation of the uncertainty of repeated measurements with an instrument of given precision (Item 3) which was answered correctly by 23 students. Those students had an average of 48% on the whole test, which is clearly better than the overall success rate. However, it is not very different than the test average determined question by question looking at the students answering each question correctly. For example, students answering question 1 correctly (30) displayed a test average of 59 %. As the specific discrimination coefficient illustrates, success in question 3 does not guarantee success in other parts of the test. For example, of those 23 students only 5 knew the right answer in question 11. However, the situation is not as dire as it can appear. The most popular option in question 3 was to use [half the spread] as the estimate for uncertainty (68) closely followed by using

the precision of the scale (50). In that sense, this represents 60% of students (91) using [half the spread] to estimate to the uncertainty value.

As we have seen in the qualitative instruments, and somewhat contrarily to the point and set paradigm of Lubben and Millar (1996), students are not adverse to repeat measurements and are on the lookout for outliers. They never manifested the opinion that their first measurement has precedence over the following measurements and were quite aware that there is no right answer. In the point and set paradigm, this would classify our students near the top echelon of “set” believers. But they still manifested difficulty estimating the uncertainty of a single measurement and were not prone to use stacking strategies. The written questionnaire illustrates the same difficulties. We would interpret this result as an indication that using statistical methods to quantify uncertainty is one component of a larger continuum of competencies that must be learned concomitantly.

We saw that the students did not make the leap to weigh simultaneously many steel balls to minimize measurement uncertainty. In the written questionnaire, two questions were related to stacking. In question 7, 10 diskettes were stacked and placed in front of a ruler graduated in millimeter [correct answer: divide by 10 the reading uncertainty of 0,5 mm]. In question 11, it is asked the best strategy to weigh the more precisely a grain of rice. [correct answer: weigh simultaneously 10 grains]. Of the 24 students who correctly answered question 7, only 10 answered question 11 correctly. The specific discrimination coefficient for those two questions (SDC 7-11) is -0,06 which means that there is a higher

probability that one student would answer question 11 correctly if he was incorrect in question 7. But the SDC 11-7 displays a value of 0,08. This can be interpreted as an indication that students actively convinced of the validity of stacking strategy are slightly more likely to succeed when evaluating the uncertainty of a simultaneous measurement. In question 11, 32% of students (49) expressed the opinion that any method of measurement would give the same precision as the rated tolerance of the scale (0,01 g). Of those 49, 34 selected the incorrect answer in question 7 where the uncertainty is given by the tolerance of the ruler, displaying a deeply ingrained, and coherent, misconception that you cannot “beat the machine”.

Another question relates indirectly to stacking. Item 12 asks what is the correct uncertainty of the radius of a cylinder of known diameter. We saw that students in the semi-directed laboratory manifested the misconception of keeping the same value for both. In the written questionnaire, the most popular option was exactly that (37% of students selecting that the uncertainty of the radius is identical to the uncertainty of the diameter). But only 14 of the 24 students that succeeded in question 7 answered question 12 correctly. Worst, 6 of those chose an answer giving the uncertainty of the radius as double the diameter uncertainty.

Uncertainty propagation

In the written questionnaire, students using the max-min method were not very consistent in their competency. This lack of mastery of such a basic rule is stunning since students used it on numerous occasions (a professor was surprised by the poor results for question

4 since he just corrected a lab report where an eerily similar calculation had to be made and all reports showed correct results. The population under study produced the exact same report the year before). Success in question 4 is a good precursor of success in question 12 even though the relationship between those questions is not obvious.

The simple rules method is the most strongly consistent throughout the students' answers. Uncertainty on a multiplication is the object of questions 1, 6, 9 and 10. Those questions display strong specific discrimination coefficients but rather low success rates (respectively, 20, 38, 42 and 47%). The (relatively) high success rate of question 10 came as a surprise since this question is situated in a context altogether new to the students (determining the uncertainty of the hermit-crab population of a lagoon knowing the number on a sample surface). Students answering question 1 correctly (30) answered question 10 correctly in a proportion of 83 %. But students failing question 1 by adding absolute uncertainties (42) did the same in question 10 in a proportion of only 29%. To further illustrate the coherence displayed by students answering question 1 correctly, the exact same proportion noted before were successful in question 9 (83%).

An interesting observation has been mentioned before and deserves further exploration. The question being the better predictor of the overall success in the test as a whole was question 1. Students successful in this question (30) displayed a test average of 59 %. What were the next three best predictors ? Question 6, 9 and 10 ! To clarify the following discussion, we will reproduce question 1 in figure 19.

#1) You measure a badly damaged rectangular prism ("cube") with an old ruler and find (in mm): 4 ± 1 , 5 ± 1 and 5 ± 2 .

Which of the following represents a **reasonable** estimate of the uncertainty of the volume (in mm³):

- A) 0,85
 - B) 1
 - C) 2
 - D) 4
 - E) 60
-

Figure 19 Question 1 of the Winter2008 version.

The purpose of this question was to verify if students have developed a sense for the numerical significance of uncertainty value. Using the simple rules of uncertainty propagation leads to an uncertainty value of 85 mm³. Since this is not represented in the options, students are compelled to choose but because the actual volume is 100 mm³ the uncertainty may appear shockingly large and students may revert to more “reasonable” estimates, closer to the measurement uncertainties. The combination of choices B, C and D was chosen respectively by 14, 28 and 42 students, representing a proportion of 56% of all students. For such “experts” having more than 90 hours of laboratory experience, this is rather disappointing. But the silver lining is that once students are competent in the calculation of uncertainty propagation and can judge the face validity of an uncertainty estimates, they are more likely to be competent in every facet of uncertainty quantification. For example, 70% of students successful in question 1 used [half the spread] or [half the spread + tolerance] to report the uncertainty of repeated measurements. But only 23% of

students using [half the spread] or [half the spread +tolerance] to report the uncertainty of repeated measurements answered question 1 correctly. This can be viewed in parallel with Deardorff assertion that learning measurement estimation is more important than learning to quantify uncertainty. The evidence seems to point to a concurrent development of both abilities.

Still, those 30 “top” students exhibited the very same previously mentioned misconceptions. They manifested the belief that it is impossible to be more precise than the reported tolerance (question 11) in a proportion of 37 % (compared to 32% for the rest of the students!). There is also a silver lining here, these 30 students were correct in question 11 in a proportion of 37% (compared to 22% for the rest) and chose a reading uncertainty of half the smallest graduation even when not appropriate (question 2) in a proportion of 33% (compared to 44% for the rest of the students). This latter observation lead us strongly to believe that this represents a didactical obstacle; an informal analysis of a laboratory manual having revealed that in about 90% of the instances where a reading uncertainty must be taken, the reading uncertainty is equalled to $\frac{1}{2}$ of the smallest graduation.

Of the 30 students successful in question 1, 25 declared themselves to be very confident or moderately confident in their ability to quantify uncertainty, a proportion of 83%. All 34% of the other students had the same levels of confidence. It is interesting to observe that students declaring themselves very confident (4) displayed a test average of 61%, those moderately confident (82), an average of 42% and those not confident (65), an average of

29%. Obviously, students are quite aware of the conceptual gaps in their knowledge of uncertainty quantification.

Uncertainty budget

We saw than in the semi-directed laboratory, half of the teams checked their uncertainty budget. In the written questionnaire, one question was explicitly related to the uncertainty budget: determining the best way to diminish the experimental uncertainty on a derived product, and half of the students correctly identified the best parameter to ameliorate (the one with the highest relative uncertainty). Not surprisingly, those students fared better in questions related to simple rules of product and division but their overall test average was only 45% (only questions 2, 8 and 13 have shown worst results).

To conclude this discussion, and as a case in point of the difficulty to properly apply the basic concepts of experimental uncertainty, let us examine a recent mistreatment of the quantification of the propagation of uncertainties in a well respected scientific journal. In 2005, Bryden, Longworth and Cunningham published a paper in the journal *Nature* evaluating if the meridional overturning circulation in the Atlantic Ocean is showing signs of weakening (Bryden, Longworth & Cunningham, 2005). Many speculate that a sudden flux of fresh water caused by the melting of the Greenland ice cap or a 4 to 6 C global temperature increase would terminate this meridional overturning circulation; therefore rendering such a measurement critical to evaluate if global warming is already affecting weather patterns. However, the authors made a curious mistake in their treatment of

measurement uncertainty as the physicist Peter Chylek of the Los Alamos National Laboratory pointed out in a comment published in *Physics Today*:

« According to Bryden and coauthors, the 1957 transport in a layer shallower than 1000 m was 22.9 ± 6 Sverdrups ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) compared with the transport of 14.8 ± 6 Sv in 2004. The ± 6 Sv represents an uncorrelated error of each measurement. Bryden subtracts the two quantities and presents the results as 8.1 ± 6 Sv (instead of 8.1 ± 12 Sv or ± 8.5 Sv, depending on the character of errors), which is an incorrect result. It is a mystery how such an error was missed by the editors and reviewers of the original paper. The observed change of 8.1 Sv is well within the uncertainty of the measurement. The correct conclusion from the data presented in Bryden's paper should have been that no statistically significant change in Atlantic meridional overturning circulation at 25° N between 1957 and 2004 has been detected. » (Chylek, 2007)

As we have pointed out, such an oversight is not mysterious given the many subtleties of the quantification of experimental uncertainty (anecdotally, question 6 of the test, which covered exactly the concept of the significance of a difference, was successfully answered by only 56% of students). Obviously, the difficulties presented here persist after instruction

and can be found among experts. Maybe teachers and students can take solace from that fact.

Educational implications

One of the most troubling findings of this study is the gender gap that emerged from the written questionnaire. Boys outperformed girls by 12 % (43,0 compared to 31,1%) and a t-test revealed that the difference was significant at the 0,0001 level. For the most revealing question 1, boys displayed an average of 30,0% and girls 9,5%. The questions with the more pronounced differences were, unsurprisingly: 6, 9 and 10. 54% of girls declared themselves not confident in their ability to quantify uncertainty compared to 32% for boys. The lone girl in the semi-directed laboratory dyad was in the team that did not quantify uncertainty. Girls obtained a better average only on question 2 which could be interpreted as a positive sign since this question requires the use of common sense rather than rote learning.

Why girls, who typically outperform boys in the institution where the study took place, performed poorly remains a mystery. This observation should be taken into account by teachers, for example in instituting a proper pedagogical design where students can get enough feedback through formative assessment so they can grow more confident in their abilities.

Laboratory manuals should also avoid the propagation of the erroneous conception that the uncertainty reading on a scale is always $\frac{1}{2}$ the smallest division. That may be the case in some well defined circumstances such as the measure of volume with a graduated cylinder but it is clearly too simplistic in many other measurement situations. For example, when reading the speed of a car on a speedometer, there often is no fine grained graduation between coarse graduations augmenting by steps of 20 km/h, but nobody going 110 km/h would answer that he or she is unsure if its speed is actually 100 or 120 km/h. Laboratory manuals should not refrain from tapping into the common sense developed by students, and everybody else, navigating in our technological world. Students should not leave the “real world” behind when stepping into the teaching laboratory.

Another obstacle that students need to surmount is their tendency to give the tolerance of the apparatus as the numerical value of the uncertainty. In a sense, this is similar to Piaget’s centration, as, for example, when a child focuses on the height of the water level and reaches the wrong conclusion when comparing the volume of two liquids contained in different glasses. A teaching laboratory would be a good place to create centration conflicts when the spontaneous tendency to attribute the tolerance for the uncertainty creates unreasonable contradictions. An example would be to evaluate the dimension of an oleic acid molecule by measuring the size of the circle created in water by a single drop of known volume and concentration. The results can be evaluated with a reasonable relative uncertainty which when converted in absolute numbers is smaller than the smallest

graduation of the ruler by 7 orders of magnitude. For other concrete examples see Allie *et al.* (2003), Backman (2008) and Lippmann (2005).

As the teachers that have tried to implement a more reflexive curriculum may attest, learning the quantification of uncertainty is very difficult. Rebecca Lippmann (2005) saw only 42% of students consistently using proper statistical techniques to estimate uncertainties after instruction compared to approximately 20 % before instruction. So progress can be expected but many more studies are needed to identify the main obstacles impeding the learning of experimental uncertainty quantification.

Conclusion

A mixed method research design consisting of a validated multiple choice test and a semi-directed laboratory permitted to explore the conceptual map of college science students relating to the quantification of experimental uncertainty. The written instrument, distributed to 151 fourth semester students, was analysed through classical item analysis and via a novel tool that illustrates coherent patterns of response. Even though the population under study had more than 90 hours of high level laboratory experience, the overall results were low and coherence was lacking. The main misconceptions or erroneous beliefs highlighted by the questionnaire were also present in the actual work of dyads in a semi-directed laboratory. Those prevalent “misconceptions” are centration on the instrument tolerance as the lower limit on measurement uncertainty and the blind application of the rule

of thumb that measurements on a graduated scale have an uncertainty of $\frac{1}{2}$ the smallest division. The conceptual mapping of coherence between choices revealed that many students use different strategies in similar contexts, displaying that the conceptual network relating to experimental uncertainty is not yet solidly set. It was shown that students comfortable in their ability to use uncertainty propagation and able to judge the face validity of a numerical estimate of experimental uncertainty were the most successful and were the most likely to use proper repeated measurements. The converse was shown to be not true. A gender gap emerged from the data set, boys outperforming girls by an extremely statistically significant level. The origin of this gap is unknown and would merit the attention of further studies.

Acknowledgments

We would like to express our gratitude to Duane Lee Deardorff and David Scot Abbott for their kind permission to use some questions from their thesis work.

CHAPITRE 9 - DISCUSSION GÉNÉRALE

«Seul un sot mesure la profondeur de l'eau avec ses deux pieds.»

Proverbe sud-africain

À la lecture des trois articles précédents, il apparaît clairement que le premier n'a comme point commun avec les deux suivants que l'utilisation d'outils quantitatifs liés à l'analyse de la cohérence des choix de réponses à un questionnaire à correction objective; il ne serait pas approprié de les relier dans une discussion générale. Toutefois, certains éléments généraux de discussion ayant été omis dans les articles pour des raisons de concision, nous allons revenir brièvement sur chacun d'entre eux pour y jeter un regard plus englobant. Nous en profiterons également pour déployer toute l'étendue de notre méthodologie quantitative lorsque les outils pertinents ont été développés postérieurement à l'écriture de l'article. Nous tenterons toutefois d'analyser les caractéristiques communes des deux derniers articles qui partagent une bonne partie de leurs assises conceptuelles. Nous regarderons également certaines limitations intrinsèques à l'utilisation des indices de discrimination spécifique et considérerons les implications didactiques plus larges que l'on peut déduire des résultats obtenus.

9.1 Mécanique newtonienne

Un des éléments qui se trouve absent du premier article est une réinterprétation des résultats selon le modèle théorique des p-prims d'Andrea DiSessa (1993). Comme nous l'avons mentionné, les p-prims ne constituent pas des conceptions erronées en soi mais des petits quanta de connaissance intuitives liés à notre interaction avec notre environnement physique. Ces quanta sont activés selon le contexte et les contingences matérielles de la situation décrite et ne sont pas en eux-mêmes vrais ou faux.

Toutefois, ce modèle théorique postulant que les conceptions préalables ne représentent que des instanciations de primitives incorrectement invoquées dans un contexte donné permet difficilement de réanalyser les choix de réponses sans devoir spéculer sur la nature des p-prims activées par les diverses questions. Prenons l'exemple des questions 13 et 14 du FCI. Les deux se rapportant formellement à la troisième loi de Newton, on pourrait également argumenter qu'elles sont associées à des p-prims différentes. La question 13 générant l'instanciation de la p-prim « *la force comme agent de mouvement* » (*force as a mover*) (pousser un objet au repos le fait bouger dans la direction de la poussée) et la question 14 suscitant la p-prim « *poussée continue* » (*continuous push*) (un mouvement continu demande une poussée continue). Les différences marquées dans les taux de succès à ces deux questions pourraient être liées à cette différence. Des entretiens d'explicitation menés auprès d'étudiants ayant manifestés des prises de position conceptuelles probablement liées à l'instanciation des p-prims mentionnées devraient être menées pour investiguer davantage cette interprétation théorique des résultats obtenus. Il serait aussi intéressant de mener des entretiens d'explicitation auprès d'étudiants semblant peu cohérent dans leur activation des p-prims.

Il appert donc, à la lecture du tableau XXXIII de l'annexe 14, que peu de questions affichent une cohérence conceptuelle clairement démontrée. Les deux questions semblant les plus reliées seraient la 11 et la 14, deux questions se rapportant à la troisième loi de Newton ($IDS_{11/14} = 0,52$). En soi, cela peut être considéré comme une bonne nouvelle mais il faut prendre ces résultats avec un grain de sel, car seulement 12 répondants ayant réussi la question 11, cela ne représente qu'une proportion de 5,5 % de notre population totale. De plus, on pourrait s'attendre à ce que ces 12 étudiants réussissent également la question 13, portant elle aussi sur la troisième loi de Newton, mais tel n'est pas le cas de manière aussi prononcée ($IDS_{11/13} = 0,29$). Les autres questions apparemment liées à Q11 (1, 2, 18 et 27) n'ont aucun rapport avec la troisième loi de Newton.

Notre analyse d'une telle situation serait de supposer que les 12 étudiants réussissant Q11 ont des bases en physique légèrement supérieures à celles des autres étudiants, leur permettant de mieux réussir globalement.

Les indices de discrimination spécifique pour les questions 4 et 10 sont également assez faibles ($IDS_{4/10} = 0,19$; $IDS_{10/4} = 0,21$) indiquant que les étudiants réussissant un des deux items ont une probabilité marginalement plus grande de réussir l'autre que les étudiants l'ayant raté. Ces questions se rapportant au principe d'inertie dans un contexte où un mouvement circulaire uniforme se voit brusquement retirer la force centripète contraignant un objet à tourner, on pourrait s'attendre à une certaine ressemblance entre les réponses à ces questions. Un couple de questions ayant montré un IDS relativement élevé est 8 et 27 ($IDS_{8/27} = IDS_{27/8} = 0,47$), deux items traitant du principe d'inertie après avoir reçu une poussée perpendiculaire au sens initial du mouvement. L'absence manifeste de compréhension globale du principe d'inertie peut toutefois être inférée à partir de la faiblesse des IDS entre les autres couples de question ($IDS_{4/8} = 0,11$; $IDS_{4/27} = 0,07$; $IDS_{8/10} = 0,24$).

Dans le même ordre d'idées, les questions 6 et 26 traitent de la trajectoire d'un objet laissé à lui-même après avoir reçu une poussée perpendiculaire à sa vitesse ($IDS_{6/26} = 0,37$; $IDS_{26/6} = 0,41$). Il est encourageant de constater que les étudiants qui réussissent l'une réussissent, généralement l'autre. On peut postuler, encore une fois, que la même primitive phénoménologique est activée mais cela demeure spéculatif.

Tel qu'il en été fait mention dans l'article 1, il ressort de l'analyse des résultats que les étudiants ne sont ni newtoniens, ni aristotéliens, ni « buridaniens ». Rappelons que ces résultats ont été obtenus en prétest, donc au début de la session mais il faut souligner que les étudiants ont étudié la mécanique newtonienne l'année précédente (secondaire V). Manifestement, ce cours a laissé peu d'empreintes cognitives, à tout le moins dans la

compréhension des principaux concepts. Une évidence anecdotique vient toutefois nuancer quelque peu cette affirmation. Une analyse des résultats obtenus au FCI par des étudiants débutant leur cours de mécanique de secondaire V montre généralement des moyennes avoisinant 25 %, ce qui est très près du seuil de réponses aléatoires (20%). La moyenne obtenue par notre population a été de 33,5 %.

Ainsi, les résultats au FCI ont été réanalysés à la lumière de ce nouvel outil quantitatif. Les matrices des IDS et des IDSP sont présentées dans les quatre premiers tableaux de l'annexe 14. Pour illustrer le rôle potentiel des IDSP pour démontrer, ou à tout le moins illustrer, une cohérence conceptuelle entre les questions, nous avons analysé à posteriori les résultats en post-test de 127 étudiants. Il est important de noter que les populations en prétest et en post-test sont différentes. La moyenne en prétest a été de 33,5% (écart-type = 14,0%, $N = 217$) et la moyenne en post-test de 57,4 % (écart-type = 20,0 %, $N = 127$). Selon les auteurs même du FCI, cela devrait indiquer que la population, dans l'ensemble, ne peut être qualifiée de newtonienne; pour cela, un seuil de 80 % devrait être obtenu.

Dans les tableaux de l'annexe 14, la même convention graphique que celle de l'article 3 a été employée, c'est-à-dire que les IDS et les IDSP inférieurs à 0,1 sont surlignés en gris pâle, ceux supérieurs à 0,3 mais inférieurs à 0,5 en gris plus foncé et ceux supérieurs à 0,5 en gris le plus foncé. Un tableau montrant une forte cohérence conceptuelle donnera donc une apparence générale foncée tandis qu'une apparence gris pâle démontre un vagabondage conceptuel de question en question. Notez qu'il est tout-à-fait possible que les IDS ou les IDSP soient négatifs même si les deux items sont bien réussis tout comme ils peuvent être positifs pour deux items ratés. Comme il en a été fait mention, ces outils quantitatifs (IDS et IDSP) montrent la cohérence du réseau conceptuel et non sa « correctitude ».

Il est donc évident, au regard des résultats affichés dans les tableaux présentés en annexe, que le réseau conceptuel est nettement plus cohérent en post-test surtout tel qu'il ressort d'un coup d'oeil sommaire sur la matrice des IDSP.

9.2 Articles 2 et 3

Puisque les articles 2 et 3 traitent de problématiques similaires et qu'une partie de leurs questions sont identiques, il est pertinent de comparer les résultats obtenus en ce qui a trait à la cohérence conceptuelle. Rappelons que l'article 2 tentait d'établir un lien entre la maîtrise des procédures de quantification de l'incertitude instrumentale avec deux habiletés intellectuelles : la capacité de reconnaître une fonction mathématique dans un ensemble de données expérimentales exprimées sous forme graphique et la capacité de mettre en branle une démarche raisonnée de résolution de problème lorsqu'un contrôle des variables efficient est employé. Trois résultats importants ressortaient de l'article 2 : 1) Il n'existe pas de corrélation significative entre la pensée formelle (telle qu'évaluée par la maîtrise du contrôle des variables dans une expérience scientifique correctement menée) et la quantification correcte de l'incertitude expérimentale. 2) Il n'existe pas de corrélation significative entre l'habileté intellectuelle à associer une représentation graphique de données à un modèle mathématique (modélisation mathématique) et la quantification correcte de l'incertitude expérimentale. 3) On observe une absence flagrante de maîtrise des concepts et des procédures associés à la quantification de l'incertitude expérimentale.

Devant ce dernier constat, il est apparu nécessaire de pousser davantage l'exploration des aptitudes métrologiques des étudiants, car l'article 2 ne contenait que huit questions reliées à la quantification de l'incertitude expérimentale.

Comme nous l'avons mentionné, les résultats à ce dernier questionnaire ont été assez décevants étant donné le faible niveau de difficulté des questions en relation avec l'expertise présumée des étudiants ayant complété plus de 90 h de laboratoires d'enseignement en physique et en chimie; laboratoires pour lesquels la quantification de l'incertitude expérimentale était exigée de manière systématique. De plus, leurs connaissances au sujet de la quantification de l'incertitude expérimentale ont été évaluées lors d'examens pratiques et théoriques dans aux moins trois matières scolaires (mécanique, électricité et chimie des solutions). Il faut toutefois nuancer ces conclusions dans la mesure où nos instruments de mesure n'ont pas générés des coefficients alpha aussi élevés que nous l'aurions souhaités. Il serait alors nécessaire de les confirmer avec de plus grands échantillons.

Étant donné le lien étroit entre les questionnaires des articles 2 et 3, il paraît pertinent de regrouper et de présenter côte-à-côte, tous les IDS et les IDSP associés aux articles 2 et 3, tel que le présentent les tableaux XXXIII à XXXIX de l'annexe 14. Rappelons qu'un résumé des questions des deux questionnaires peut être trouvé dans les articles 2 et 3 et que les questionnaires détaillés sont présentés aux annexes 7 et 8. La convention graphique habituelle a été respectée, les IDS et les IDSP inférieurs à 0,1 étant surlignés en gris pâle, ceux supérieurs à 0,3 mais inférieurs à 0,5 en gris plus foncé et ceux supérieurs à 0,5 en gris le plus foncé.

Quelques résultats se démarquent. Il a été mentionné, dans l'article 2, le fort lien unissant les questions 20 et 21. La première demandait de choisir les pendules à faire osciller pour vérifier si la longueur d'un pendule influence sa période (contrôle des variables) et la question 21 offrait un choix d'énoncés qui permettait de justifier le choix précédent. Les résultats ont montrés que 97% des étudiants choisissant le bon pendule en 20 sélectionnaient la justification appropriée en 21. De même, les autres couples de réponses montraient une forte cohérence conceptuelle. On constate donc que les IDSP pour ces deux

questions se situent aux alentours de 0,85, la plus forte valeur obtenue, tous questionnaires confondus.

On constate également que la plupart des IDS supérieurs à 0,3 le sont également pour les IDSP avec quelques exceptions notables, dont les questions 1, 6, 9 et 10 de l'article 3. Cela peut paraître embêtant en raison du rôle central que ces questions ont joué dans cet article, mais comme nous l'avons mentionné, les IDS s'interprètent plus directement et sans attribuer une correction associée à la proportion totale d'étudiants se répartissant entre les diverses combinaisons de réussite/échec entre deux items. Toutefois, les $IDSP_{9/1}$, $IDSP_{9/10}$, $IDSP_{6/10}$, $IDSP_{10/6}$ demeurent élevés. Le « problème » vient donc de la question 1 qui a été réussie par un petit nombre d'étudiants qui voient donc leurs réponses noyées dans la masse. Les IDSP ont donc fonctionné tel que prévu mais cela illustre l'importance d'analyser les deux coefficients de manière concomitante.

Des valeurs des IDSP des données quantitatives issues des questionnaires des articles 2 et 3, il se dégage globalement une absence de cohérence conceptuelle. Si on avait pu prévoir un tel constat dans le premier cas, l'article 2 traitait de trois sujets distincts, il peut paraître surprenant que les étudiants semblent montrer une telle absence de maîtrise des concepts liés à la quantification de l'incertitude expérimentale. Si on prend les résultats des IDSP prétests comme étalon de référence, il semble que malgré 90 heures passées dans des laboratoires scientifiques, les étudiants sont encore des utilisateurs ingénus d'algorithmes de calculs et de procédures qu'ils connaissent mais dont ils n'ont pas la pleine commande.

9.3 Considérations didactiques

Les absences inférées de cohérence conceptuelle en prétest pour le FCI et en « post-test » pour la quantification de l'incertitude expérimentale n'ont pas les mêmes implications didactiques étant donné les contraintes imposées par la structure académique, la pléthore

d'informations disponibles dans les publications en didactique de la physique et la rareté des publications dans le second domaine.

Les contraintes liées à la structure académique sont issues du fait que la mécanique newtonienne est enseignée dans le cadre bien précis et circonscrit d'un cours associé à un seul enseignant et comportant des objectifs clairement énoncés et universellement partagés. En ce qui a trait à la quantification de l'incertitude expérimentale, son apprentissage est dilué au sein de plusieurs cours distribués au sein de disciplines qui n'ont pas exactement les mêmes attentes et exigences. Si l'attribution causale de l'absence de compétence démontrée en quantification de l'incertitude expérimentale à la dilution de la présentation des divers concepts sur plusieurs disciplines et plusieurs cours demeure spéculative, il apparaît raisonnable de lui prêter une part dans l'étiologie de cette difficulté constatée. D'un point de vue didactique, des attentes différentes entre professeurs peuvent être perçues, implicitement ou explicitement, comme un bris de contrat qui vient dévaluer les concepts enseignés et qui entraîne la confusion.

Comme nous l'avons mentionné dans la discussion du troisième article, la méthodologie qualitative utilisée a fait ressortir une erreur de centration typique qui consiste à attribuer la tolérance d'un appareil numérique ou analogique comme valeur de l'incertitude. Cette erreur commune pourrait faire l'objet d'interventions didactiques destinées à créer des conflits cognitifs entre cette conception naïve et le résultat de la quantification de l'incertitude expérimentale associée à la mesure d'un objet dont les dimensions donnent des valeurs où il serait nettement suspect d'utiliser la tolérance de l'instrument (par exemple, $0,003 \pm 0,1$).

Comme nous l'avons vu, les étudiants ayant développé un sens critique envers la plausibilité d'une estimation numérique de l'incertitude expérimentale sont plus à même de mieux maîtriser les algorithmes de calcul et d'employer des stratégies pertinentes pour

réduire l'incertitude. Il serait donc pertinent de multiplier les activités réflexives pour que les étudiants aient l'occasion de confronter leurs estimés personnels à ceux des autres et aux résultats obtenus. Il serait aussi possible de mettre en branle une structure didactique qui favorise la métacognition vu le rôle critique de l'intuition personnelle pour quantifier adéquatement l'incertitude expérimentale. Il serait toutefois vital que cette structure soit commune à toutes les disciplines pour ne pas diluer le message, du moins peut-on le supposer.

Les entretiens semi-dirigés tenus à la fin des séances de résolution de problèmes en laboratoire ont permis de conclure que les étudiants ne peuvent pas expliquer l'origine des règles employées pour quantifier l'incertitude expérimentale. Pourquoi additionner les incertitudes relatives lors d'une multiplication ? « *Parce que c'est comme ça !* »

Il semble raisonnable de supposer que la connaissance de la logique sous-tendant les équations employées permettrait d'en accepter le bien fondé et favoriserait l'encodage dans la mémoire à long terme. À tout le moins, les équations pourraient être retrouvées à partir de principes premiers qui semblent cruellement faire défaut aux étudiants.

Toutefois, les recommandations précédentes ne doivent pas venir s'ajouter à des laboratoires déjà bien chargés. Il serait pertinent d'étudier en détail si les attentes explicites et implicites que l'on prête aux laboratoires de sciences (travailler en équipe, maîtriser des outils informatiques d'acquisition de données, faire un montage à partir de schémas et suivre un protocole, apprendre des notions théoriques, produire des communications scientifiques, quantifier l'incertitude expérimentale, ...) n'amènent une surcharge cognitive.

Toujours en relation avec la structure didactique des laboratoires, l'étiologie de l'erreur typique d'utiliser la moitié de la plus petite graduation d'un instrument analogique comme

valeur de l'incertitude de lecture, erreur qui est ressortie très fortement tant dans l'instrument quantitatif que dans l'instrument qualitatif du troisième article, pourrait être issue d'obstacles didactiques, c'est-à-dire de conséquences néfastes d'apprentissages effectivement réalisés mais surgénéralisés. Bien qu'hypothétique, cette attribution causale semble couler de source étant donné la contradiction manifeste entre les aptitudes réelles des étudiants à interpoler une valeur sur un cadran gradué et la verbalisation de cette conception, manifestement solidement ancrée. Comme il semble raisonnable de supposer que les étudiants ont entamé leurs études collégiales avec la capacité de faire une lecture sur un cadran, leur tendance à associer à toute lecture une incertitude égale à la moitié de la plus petite graduation leur a été inculquée, probablement par la force de l'habitude de l'appliquer aveuglément.

Bien que dénué de toute forme de données qualitatives ou quantitatives pour donner de la substance à cette dernière affirmation, on peut commencer à s'en convaincre en regardant la figure 20 qui représente un cadran d'une montre sans graduations.



Figure 20 Cadran d'une montre sans graduation.

Si on demande à quiconque de lire l'heure, la réponse sera fort probablement « un peu passé 10h10 ». Toutefois, l'hésitation des individus ne serait pas entre 10h et 11h mais, peut-on supposer, entre 10h10 et 10h13.

Une telle question ayant été posée dans les questionnaires quantitatifs des articles 2 et 3, la relecture, à postériori, des réponses des étudiants donnerait que, selon leur compréhension personnelle des canons scientifiques de l'évaluation de l'incertitude de lecture sur un appareil comportant un cadran gradué, l'heure pourrait être écrite par $10h10 \pm 30$ minutes (moitié de la plus petite division) en « contradiction » avec leur intuition. Comme nous l'avons mentionné, cette attribution causale demeure spéculative et il faudrait davantage d'études pour parvenir à établir si ce n'est plutôt les capacités de lecture elles-mêmes qui sont en cause bien que cela paraisse peu probable.

Pour revenir sur le second article, une considération didactique importante qui pourrait en être tirée est la nécessité de montrer explicitement la méthode générale du contrôle des variables qui semble être acquise pour la plupart des étudiants mais sans avoir jamais été formalisée. Il apparaît donc la nécessité d'établir clairement le vocabulaire scientifique approprié relié au contrôle des variables (variables dépendantes, co-dépendantes, indépendantes, paramètre, constante, ...) De même, les graphiques gradués logarithmiquement devraient être employés de manière beaucoup plus systématique étant donné leur grande importance scientifique et la capacité des étudiants inscrits à des études supérieures de les maîtriser étant donné leur bagage mathématique.

Revenons maintenant vers la physique newtonienne et l'article 1. Une conclusion qui semble ressortir des résultats obtenus est qu'il apparaît inutile de déployer une ingénierie didactique pour faire évoluer les conceptions aristotéliennes ou moyenâgeuses des étudiants vu qu'elles ne sont pas vraiment présentes sous une forme manifeste et cohérente

dans l'esprit des répondants. Le réseau conceptuel en prétest étant globalement peu cohérent, il est difficile de prêter aux étudiants le « mérite » d'employer une physique bien définie pour répondre aux questions du FCI. Naturellement, cela ne veut pas dire qu'il soit inutile de faire évoluer les conceptions des étudiants, mais seulement qu'il serait faire fausse route de partir de la physique d'Aristote ou de Buridan pour développer des activités didactiques. Cela est davantage vrai pour la physique aristotélicienne qui a montré bien peu de partisans, mais si on interprète les réponses des étudiants comme étant la manifestation d'une croyance en l'impetus, pour prendre un exemple, les mêmes étudiants ne semblent plus y croire lors d'une question subséquente.

Ces résultats contredisent ceux obtenus par Huang (2003) et Bao, Hogg et Zolman (2002) qui montraient que les étudiants adoptaient largement des modèles qui pouvaient être interprétés comme étant aristotéliens ou moyenageux. Cette contradiction peut avoir plusieurs sources. Premièrement, les clientèles étudiées sont différentes (étudiants universitaires en biologie pour Huang et en ingénierie pour Bao, Hogg et Zollman) Deuxièmement, que ce soit l'utilisation de la TRI ou du calcul de la distribution en trois classes (*class model density matrix*), la classification des réponses selon l'un des trois modèles demeure spéculative, et ce même si les chercheurs ont validé leurs inférences à partir de quelques entrevues, de plus, les regroupements collectifs dissipent l'absence de cohérence individuelle. Ce que semble montrer nos résultats est que les étudiants appliquent des physiques différents à chaque question. Comme nous l'avons mentionné, nous ne pouvons pas savoir si cela provient de l'activation de p-prims variées ou si les classifications intuitives en catégories ontologiques changent selon le contexte de la question. À tout le moins, il semble possible de répondre à la question de savoir si les catégories ontologiques naïves sont statiques ou dynamiques. Étant donné l'absence de stabilité dans les réponses (cohérence dichotomique globale faible), si les conceptions des étudiants doivent être classées dans diverses catégories ontologiques, ces ontologies personnelles sont dynamiques et fluctuantes.

Si on adopte plutôt un paradigme piagétien pour interpréter les résultats obtenus, il semble que le processus d'assimilation-accommodation soit en oeuvre pour inscrire les concepts de la physique mécanique newtoniennes dans des schèmes de pensée opératoire. L'apprentissage de la mécanique suscite fréquemment des conflits cognitifs entre l'assimilation des concepts formels enseignés et l'accommodation de schèmes de pensée issus de l'expérience personnelle et qui doivent, apparemment, être modifiés. Nous en avons vu un exemple avec la troisième loi de Newton qui semble peu maîtrisée par les participants même si elle leur a été enseignée formellement l'année précédente. Cette loi étant contre-intuitive pour de nombreuses personnes, les conceptions initiales restent peu ébranlées par les interventions didactiques. Toutefois, l'aspect principal de ce travail était d'évaluer si ces connaissances initiales ou personnelles formaient un réseau cohérent, c'est-à-dire s'il était possible de détecter des schèmes de pensée récurrents ce qu'il n'a pas été possible de faire. Ce résultat négatif n'est toutefois vraisemblablement pas dû à une quelconque incapacité intellectuelle car, comme nous l'avons constaté dans le deuxième article, nos répondants étaient rendus au stade de la pensée formelle, tel qu'évalué par les items portant sur le contrôle des variables.

Une indication que le processus d'accommodation est cours se constate au post-test du FCI dont, même si la moyenne globale a été relativement basse (57 %), a permis de montrer une plus grande cohérence conceptuelle tel que l'atteste les résultats synthétisés dans la matrice des IDSP (annexe 14). Un regard attentif à cette dernière montre toutefois que de nombreux coefficients montrent des valeurs négatives indiquant une absence de cohérence globale. Par exemple, la plus faible valeur de tous les IDSP a été de -0,682 ($IDSP_{10/15}$)! Cependant, comme ces deux questions abordent des concepts différents (première loi de Newton pour la question 10 et deuxième loi de Newton pour la question 15), un tel écart ne peut être considéré comme une absence de maîtrise d'un concept en particulier. Par contre, si on regarde attentivement la ligne associée à la question 15 dans le tableau de la page 340, on

constate que la grande majorité des IDSP sont négatifs. Quelles implications didactiques doit-on en retirer ? Avant de poursuivre la discussion, reproduisons la question 15 du FCI (la bonne réponse est C).

15. *Lorsqu'une balle de caoutchouc lâchée du repos rebondit sur le plancher, la direction de son mouvement est inversée car ;*

- A. *L'énergie de la balle est conservée.*
- B. *La quantité de mouvement de la balle est conservée.*
- C. *Le plancher exerce une force sur la balle qui stoppe sa chute puis la propulse vers le haut.*
- D. *Le plancher est dans le chemin de la balle et la balle doit continuer de bouger.*
- E. *Aucune de ces réponses.*

Un premier élément important à noter est que la moyenne globale de réussite est passée de 42% en prétest à 18 % en post-test ! Dans ce dernier cas, 73% des étudiants ont choisi les distracteurs A ou B alors que seulement 36% les sélectionnaient en prétest. Il semble donc qu'un obstacle didactique soit encore une fois à mettre en cause car les étudiants utilisent hors contexte des termes techniques qu'ils ont rencontré dans leur cours de physique en négligeant le seul concept pertinent à la question soit la deuxième loi de Newton. Il est possible que l'énoncé de la question induise l'association avec les notions d'énergie (l'exemple architypique pour expliquer la notion d'énergie donné en classe et dans les volumes de physique étant celui d'un objet que l'on hisse et que l'on laisse tomber) et de quantité de mouvement (on retrouve le mot mouvement dans l'énoncé de la question). Les coefficients IDSP négatifs montrent toutefois que même les étudiants ratant cette question réussissent les autres. Difficile alors de les caractériser dans l'ensemble comme étant « newtonien » puisque à une question dont la bonne réponse demande de réfléchir à partir des notions de forces, près de 80% préfèrent ne pas le faire mais que, malgré tout, cela ne les empêche pas de réussir d'autres questions liées à la deuxième loi de Newton. Notons

aussi que seulement 2% des étudiants en prétest et 0% en post-test ont choisi de répondre D, le distracteur associé au mode de pensée aristotélicien.

CHAPITRE 10 - CONCLUSIONS

« L'homme qui porte une montre sait toujours quelle heure il est, celui qui en porte deux n'en est jamais certain »

Origine inconnue

Au terme de cette thèse, se dégagent plusieurs éléments de conclusion qui méritent d'être mis en exergue. Nous allons tout d'abord faire un retour sur les questions de recherche qui ont été explicitées au chapitre 3. Nous présenterons ensuite les limites de cette recherche puis établirons un certain nombre d'avenues de recherche qui semblent découler des résultats obtenus ou des limites inhérentes à la présente méthodologie.

10.1 Retour sur les questions de recherche

Comme il a été mentionné au chapitre 3, la thématique centrale de cette thèse était la création d'un outil quantitatif pour établir la cohérence conceptuelle inférée des réponses à un test à correction objective. Nous avons donc étudié les réponses en prétest et en post-test à un test largement étudié et validé par de multiples études, le *Force Concept Inventory* (FCI). Nous avons aussi développé deux instruments quantitatifs associés à diverses compétences utiles dans les laboratoires de sciences. Les résultats ont été décrits dans trois articles constituant les chapitres 6, 7 et 8 de cette présente thèse mais dont les conclusions principales seront rassemblées ici. Mais, auparavant, revenons sur la question de recherche principale.

10.1.1 Question de recherche principale

Réitérons la question de recherche principale : **est-il possible d'explorer la cohérence conceptuelle manifestée par un groupe d'étudiants par le biais de l'homogénéité interne de leurs choix de réponses à un test standardisé?**

Pour répondre à cette question, il a été nécessaire d'opérationnaliser la cohérence conceptuelle en deux notions connexes: la cohérence dichotomique et la cohérence concomitante. Nous avons vu que la création de deux indices, soient l'indice de discrimination spécifique (IDS) et l'indice de discrimination spécifique pondéré (IDSP), permet de faire ressortir sous une forme compacte la cohérence dichotomique démontrée par les étudiants. En ce qui a trait à la cohérence concomitante, l'outil de choix a été l'étude détaillée des tableaux de Burt.

La question de recherche subsidiaire pour laquelle nous voulions obtenir des éléments de réponses était : **est-ce que le réseau conceptuel, spéculativement mis en lumière par l'analyse de l'homogénéité interne des choix de réponses à un test standardisé, est cohérent dans toutes ses dimensions?**

Puisque ces dimensions prennent une acception différente selon les concepts à l'étude, on ne peut y répondre d'une façon globale et universelle. Dans cette thèse, nous nous sommes limité à trois grands domaines dont les résultats ont été colligés dans trois articles: la mécanique newtonienne (article 1), l'interdépendance d'habiletés intellectuelles propres au laboratoire (contrôle des variables - modélisation mathématique - quantification de l'incertitude expérimentale) (article 2) et diverses facettes de la quantification de l'incertitude expérimentale (article 3).

10.1.2 Mécanique newtonienne (article 1)

La principale question de recherche en relation avec la mécanique newtonienne était : **est-ce que les étudiants manifestent les mêmes difficultés ou conceptions erronées avant instruction pour des questions traitant de sujets similaires?**

Nous avons montré assez clairement que les réponses des étudiants attestent une absence de cohérence que ce soit dans l'application des principes corrects ou dans la manifestation de croyances erronées. Par exemple, les étudiants répondant à une question en employant spéculativement un raisonnement basé sur la conservation d'un impetus circulaire lors d'une question ne l'emploient plus lors d'une question subséquente manifestement similaire. De même, les étudiants répondant correctement à une question sur la troisième loi de Newton démontrent une probabilité assez faible d'en réussir une autre portant sur ce même sujet. Les matrices des IDS et des IDSP ont démontré clairement une cohérence conceptuelle très faible en prétest et légèrement améliorée en post-test.

10.1.3 Maturation de la pensée logique, de la pensée mathématique et quantification de l'incertitude expérimentale (article 2)

La question de recherche développée dans le second article était: **est-ce que l'habileté à quantifier l'incertitude expérimentale et l'habileté à associer un graphique à une fonction mathématique sont corrélées à l'habileté du contrôle des variables ?**

La réponse sans équivoque est non. Nous avons pu constater une absence de liaison entre ces trois grands domaines par nos trois métriques quantitatives (coefficients de corrélation de Pearson, IDS et IDSP). Toutefois, une étude détaillée de chacun de ces domaines a illustré des problématiques différentes pour chacun d'entre eux. En ce qui a trait au contrôle des variables, les étudiants montrent une capacité formelle à le mettre en oeuvre mais une carence dans la connaissance du vocabulaire approprié (variable indépendante, etc.). Au

niveau de la modélisation mathématique d'un ensemble de données représentées graphiquement, on observe encore une fois des compétences mathématiques globalement satisfaisantes mais un manque d'expertise probablement lié à un manque de pratique. Pour la quantification de l'incertitude expérimentale, les résultats ont été catastrophiques pour presque tous les étudiants. Bref, les difficultés manifestées dans ce dernier domaine ne sont pas dues à un manque d'habiletés mathématiques ou à des lacunes intellectuelles liées au développement non encore pleinement réalisé de la pensée formelle. L'article 3 viendra détailler davantage les difficultés rencontrées par les étudiants en relation avec la quantification de l'incertitude expérimentale.

Nous avons établi une question subsidiaire : **Est-ce que la maîtrise de la pensée formelle est corrélée à l'âge des étudiants ?**

La réponse à cette question est oui mais avec une petite surprise car la corrélation observée est négative, cela semblant défier toute logique. On pourrait en effet s'attendre à ce que les étudiants plus âgés soit plus à même de mettre en oeuvre un mode de pensée opératoire formelle (quatrième stade classique de Piaget). Cependant, dans le contexte de la présente étude, les étudiants plus âgés passant le test sont probablement des étudiants ayant eu un parcours scolaire irrégulier parsemé d'échecs et/ou d'abandons. Ainsi les étudiants âgés de 17 ans ou moins ont eu une moyenne globale au FCI supérieure à celle obtenue par les étudiants de 18 ans, eux-même ayant surclassé les étudiants de 19 ans ou plus.

10.1.4 Étude détaillée des compétences en quantification de l'incertitude expérimentale (article 3)

Dans le troisième article, l'instrument quantitatif utilisé dans l'article précédent a été modifié pour ne comporter que des questions traitant de l'incertitude expérimentale. La

principale question de recherche étant : **est-ce que les réponses indiquent que le réseau conceptuel inféré est cohérent ?**

Selon les résultats obtenus, nous devons encore répondre non avec toutefois une nuance principale car, en bonne partie, les étudiants appliquant correctement les règles simples de propagation des incertitudes lors de multiplications ou de divisions ont globalement tendance à être conséquents dans toutes les questions. Comme nous l'avons vu dans l'article 3 et dans la discussion, de nombreuses conceptions préalables semblent entraver l'acquisition des principaux concepts de la quantification de l'incertitude expérimentale. Ces conceptions erronées sont largement cohérentes et répandues.

Pour mieux valider les inférences spéculatives, un instrument qualitatif a permis d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes: **est-ce que les étudiants ayant à réaliser une expérience de laboratoire semi dirigée où ils ont à quantifier l'incertitude expérimentale déploient des stratégies cohérentes avec celles qui leur ont été enseignées et est-ce que les principales difficultés identifiées par l'instrument quantitatif sont récurrentes dans un contexte réel ?**

Pour ce qui est des stratégies, les étudiants ont montré peu de souci d'intégrer dans leurs estimations les principales difficultés logistiques, par exemple les erreurs de parallaxe ou la difficulté à estimer la position exacte où la vitesse devient constante. Il ont par contre été à même d'appliquer les stratégies de base reliées à l'utilisation d'un instrument de mesure c'est-à-dire la quantification de l'incertitude instrumentale. Par exemple, l'application, souvent abusive, de l'estimation de l'incertitude expérimentale par la moitié de la valeur numérique de la plus petite division ou comme étant égale à la valeur de la plus petite valeur affichable sur un appareil. Pour la deuxième partie de la question, il est clair au vu du travail en laboratoire effectué par les étudiants que les mêmes difficultés rencontrées lors de la passation de l'instrument quantitatif sont représentées en contexte réel : centration sur

la résolution d'un appareil de mesure, qu'il soit analogique ou numérique et difficulté à identifier les principales sources d'incertitudes.

10.2 Limites de cette recherche

Bien que nous avons pu développer deux outils quantitatifs qui permettent de visualiser la cohérence du réseau conceptuel démontré par les choix de réponses à un instrument à correction objective (IDS et IDSP), les implications de cette cohérence (ou de son absence) ne sont pas toujours claires. Si deux questions montrent une absence de cohérence alors qu'elles couvrent des concepts identiques, l'étiologie de cette incohérence demeure un objet de spéculation.

Comme nous l'avons vu, les IDSP semblent mieux à même de faire ressortir la cohérence globale. Ils ont toutefois le défaut de dévaluer les réponses d'une sous-population qui se verrait noyée dans la masse. Il faut donc les regarder simultanément avec les IDS, ce qui alourdit l'analyse.

Pour des échantillons dont la taille ne dépasse pas 200 individus, nous avons vu également que les IDS sont fréquemment semblables aux coefficients de corrélation de Pearson et qu'ils sont soumis aux mêmes limitations (sensibilité à la quasi unanimité et valeurs devenant indéfinies pour certains patrons de réponses).

L'évaluation de la cohérence concomitante étant établie par l'analyse des tableaux de Burt, ceux-ci présentent le défaut d'être de dimension pharaonique. En effet, un questionnaire comme le FCI comportant 29 items à cinq choix de réponses génère un tableau de Burt dont la taille est de 145×145 soit 21025 cellules à analyser! Pour contourner cette difficulté, la macro développée pour la présente thèse surligne les cellules semblant montrer des conceptions préalables globalement partagées par les répondants. Le critère étant que pour un distracteur particulier choisi par plus de quatre étudiants, si plus de la moitié de ceux-ci

se concentrent sur un même distracteur d'une autre question (donc si deux mauvaises réponses sont majoritairement sélectionnées), les conceptions semblent communes. Pour établir une gradation, un code de couleurs différent a été employé pour les taux d'accord situés entre 50% et 75 %, entre 75 % et 90 % et pour 90 % et plus. Néanmoins, cela laisse de nombreuses cellules à analyser et de nombreuses cellules potentiellement intéressantes non mises en évidence. De plus, pour les questions globalement ratées pour lesquelles un distracteur particulier a recueilli l'assentiment de la majorité, presque toutes les cellules associées à ce distracteur deviennent surlignées ce qui surcharge le champ visuel.

En ce qui a trait aux inférences établies sur la cohérence du réseau conceptuel, il faut signaler qu'elles ne sont valables que pour la population de cette étude. Il serait nécessaire d'augmenter considérablement l'échantillonnage pour les généraliser à l'ensemble de la population estudiantine ne serait-ce qu'en raison des caractéristiques intrinsèques de notre population qui étudie dans une institution qui comporte des critères d'entrées plus restrictifs que la moyenne. L'avantage indéniable a été d'obtenir des résultats non biaisés par un manque d'expertise ou un manque de sérieux lors de la passation des instruments quantitatifs; comme il a été mentionné dans l'article 2, les résultats obtenus dans une autre institution dont les critères de sélection sont moins contraignants ont révélé des lacunes nettement plus considérables que celles qui ont été mises en lumière au sein de la population principale. Toutefois, le manque de représentativité de notre échantillon vient éliminer la possibilité d'établir des inférences globales.

10.3 Directions possibles pour des recherches ultérieures

Comme pour toute recherche, des considérations logistiques et budgétaires sont venues restreindre l'étendue des avenues de recherche. Pour affiner notre regard sur l'évaluation de la cohérence conceptuelle, il serait pertinent de poursuivre les démarches entamées ou de porter un regard neuf sur les données recueillies. Ainsi, comme la présente étude a généré une quantité considérable de données quantitatives, nombre d'entre elles peuvent

encore être réanalysées en relation avec des données connexes ou même encore être analysées pour la première fois. Par exemple, il serait intéressant de mener une analyse des facteurs principaux à partir des tableaux de Burt et des matrices des IDS et IDSP. Cela permettrait d'avoir une classe de procédure pour attaquer de grandes matrices et proposer des classes de modèles nouveaux en examinant les vecteurs propres trouvés. Il serait aussi pertinent de mettre en application les modèles de traitement issus de la TRI pour paramétriser nos items selon leur degré de cohérence conceptuelle.

Dans le même ordre d'idée, mais en portant notre attention sur les données qualitatives cette fois, il serait pertinent de réanalyser les séquences vidéos obtenues lors de la réalisation d'une activité concrète de laboratoire selon divers modèles théoriques. Pour la présente étude, nous avons principalement porté notre attention sur les traces écrites et sur les entretiens d'explicitation, délaissant l'analyse complète des séquences d'actions. Par exemple, il serait extrêmement intéressant de vérifier sur quels éléments théoriques ou pragmatiques, les étudiants dédient la majeure partie de leur discussion.

Une autre faiblesse à laquelle il pourrait être pertinent de remédier est le faible nombre de dyades ayant participé au protocole qualitatif. Nous avons volontairement limité leur nombre en raison de l'aspect subsidiaire de cette méthodologie de recherche par rapport à notre problématique principale. Il serait aussi possible d'augmenter la durée des entretiens d'explicitation pour aller plus en profondeur quant aux motifs sous-jacents aux diverses décisions prises durant la séance et quant aux fondements épistémologiques personnels dictant les manières de quantifier l'incertitude expérimentale.

Ayant établi que la structure didactique actuelle lors des laboratoires de sciences dans l'institution étudiée n'est pas très efficace pour faire acquérir les notions de base de la quantification de l'incertitude expérimentale, il apparaît clairement la nécessité de redéfinir

les objectifs poursuivis par les laboratoires ou les méthodes employées pour faire évoluer les conceptions concernant la quantification de l'incertitude expérimentale. L'outil quantitatif développé dans l'article 3 pourrait alors servir d'étalon de référence pour jauger l'efficacité d'un nouveau design didactique par le biais d'une méthodologie prétest/post-test, ou à tout le moins en fin de parcours si les enseignants sont préoccupés par la contamination temporelle que peut impliquer une reprise de test.

Évidemment, toute séquence didactique s'inscrivant dans un continuum d'activités académiques issues de toutes les disciplines auxquelles les étudiants sont confrontés de manière simultanée, il serait pertinent d'étudier l'effet délétère de l'exposition concomitante d'un même concept mais opérationnalisé différemment selon les disciplines. Il serait aussi pertinent d'étudier la structure didactique des séances de laboratoires proprement dites pour vérifier si les étudiants ne sont pas en surcharge cognitive.

Un des faits saillants des données recueillies dans le volet quantitatif du troisième article est le large écart séparant les garçons et les filles dans la moyenne globale obtenue. En effet, un test-t de Student a révélé que la différence entre la moyenne de ces deux sous-populations était statistiquement significative avec une probabilité de 0,01% que l'écart observé ne soit dû qu'au seul hasard. Il serait souhaitable d'étudier l'étiologie de cette disparité et que les structures didactiques mises en place pour que les étudiants acquièrent correctement les rudiments de la quantification de l'incertitude expérimentale soient jugées également sur leur capacité à oblitérer cette iniquité.

En terminant, revenons sur le premier article traitant de la physique newtonienne. Une des principales faiblesses des données présentées dans la discussion (chapitre 9) est l'absence de données appariées prétest/post-test. Il serait judicieux d'évaluer l'évolution de la cohérence conceptuelle démontrée par les mêmes étudiants au début et à la fin du cours de mécanique. Une étude des différences dans les patrons de réponses selon les intérêts des

étudiants (sciences pures ou sciences de la santé) pourrait également révéler des différences dont l'origine pourrait être inférée comme la mise en oeuvre d'épistémologies personnelles distinctes.

Concernant ce dernier aspect, nous n'avons pas pu détecter des ontologies personnelles à partir du patron des choix de réponses ni pu juger du rôle des p-prims dans la sélection d'un distracteur particulier. Les outils développés dans cette présente thèse pourraient éventuellement servir de point de départ pour une telle étude à partir des données recueillies à un instrument à choix de réponses mais il semble que ce dernier doive être conçu *ab initio*, à partir de ces prémisses. Le FCI couvre un vaste éventail de conceptions erronées dont beaucoup ressemblent aux idées d'Aristote ou de Buridan mais il permet difficilement une étude systématique selon des modèles théoriques qui n'ont pas été pris en compte lors de son élaboration.

Disposant désormais d'un outil quantitatif qui fait ressortir des items montrant une certaine proximité conceptuelle tel que l'attestent les réponses des participants, il serait opportun de mener des entretiens d'explicitation pour approfondir davantage sur cette cohérence présumée.

LISTE GLOBALE DES RÉFÉRENCES

- ABBOTT, D. (2003) «Assessing Student Learning about Measurement and Uncertainty», dissertation doctorale, North Carolina State University.
- ALLIE, S., A. BUFFLER, L., KAUNDA, B. CAMPBELL et F. LUBBEN (1998) «First-year physics students' perception of the quality of experimental measurements», *International Journal of Science Education*, **20**, 447-459.
- ALLIE, S., A. L. BUFFLER, B. CAMPBELL, F. LUBBEN, D., EVANGELINOS, D. PSILLOS et O. VALASSIADES (2003) «Teaching measurement in the introductory physics laboratory», *Physics Teacher*, **41** (7), 394-401.
- ALTERS, B. J. (1997) «Whose nature of science», *International Journal of Science Teaching*, **34** (1), 39-55.
- ARONS, A. (1997) *Teaching Introductory Physics*, Wiley.
- ARONS, A. B. et R. KARPLUS (1976) «Implications of accumulating data on levels of intellectual development», *American Journal of Physics*, **44** (4), 396.
- BACKMAN, P (2008) «Using a Meniscus to Teach Uncertainty in Measurement», *Physics Teacher*, **46** (2), 100-103.
- BAO, L., K. HOGG et D. ZOLLMAN (2002) «Model analysis of fine structures of student models: An example with Newton's third law», *American Journal of Physics*, **70** (7), 766-778.
- BAO, L. et E.F. REDISH (2001) «Concentration analysis: A quantitative assessment of student states», *Physics Education Research, American Journal of Physics Supplement*, **69** (7), S45- S53.
- BÉCU-ROBINAULT, K. (2002) *Modelling activities of students during a traditional labwork*, dans Niedderer H. and Psillos D. (Eds) *Teaching and learning in the science laboratory*, Kluwer Academic Publisher.
- BEICHNER, R. J. (1994) «Testing student interpretation of kinematics graphs», *American Journal of Physics*, **62**, 750-762.
- BEICHNER, R.J. (1996) «The impact of video motion analysis on kinematics graph interpretation skills», *American Journal of Physics*, **64**, 1272-1277.

- BELL-GREDLER, M. E. (1986) *Learning and Instruction : Theory into Practice*, New York : Macmillan Publishing Co.
- BERG, C. et D. PHILLIPS (1994) «An investigation of the relationship between the logical thinking structures and the ability to construct and interpret line graphs», *Journal of Research in Science Teaching*, **31** (4), 323- 344.
- BERGER, K.S. (2000) *Psychologie du développement*, 4^e ed., Montréal : Modulo.
- BOISCLAIR, G. et J. PAGÉ (2004) *Guide des sciences expérimentales : Observations, mesures, rédaction de rapport de laboratoire*, 3^e édition, Ottawa : ERPI..
- BORAM, R. D. et J. W. RENNER (1985) «Measured formal thought and that required to understand formal concepts in college level physical science.» Article présenté au 58e congrès annuel du *National Association for Research in Science Teaching*. French Lick Springs, IN.
- BOWEN, G.M. et W.M. ROTH (2005) «Data and graph interpretation practices among preservice science teachers», *International Journal of Science Teaching*, **40** (10), 1063-1088.
- BURT, C. (1950) «The factorial analysis of qualitative data», *Journal of Statistical Psychology*, **3** (3), 166-185.
- BRYDEN, H. L., H. R. LONGWORTH et S. A. CUNNINGHAM (2005) «Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25°N», *Nature*, 438, 655.
- CHI, M. et J.D. SLOTTA (1993) «The ontological coherence of intuitive physics», *Cognition and Instruction*, **10** (2 & 3), 249-260.
- CHYLEK, P. (2007) «Uncertainty over weakening circulation», *Physics Today*, **60** (3), 10.
- CLERK, D. et M. RUTHERFORD (2000) «Language as a confounding variable in the diagnosis of misconceptions», *International Journal of Science Education*, **22** (7), 703-717.
- COELHO, S. M. et M.-G. SÉRÉ (1998) «Pupils' reasoning and practice during hands-on activities in the measurement phase», *Research in Science & Technological Education*, **16** (1), 79-96.

- COLETTA, V.P. et J.A. PHILLIPS (2005) «Interpreting FCI scores: Normalized gain, preinstruction scores, and scientific reasoning ability», *American Journal of Physics*, **73** (12), 1172-1182.
- COLETTA, V.P. J.A. PHILLIPS et J.J. STEINERT (2007) «Interpreting force concept inventory scores: Normalized gain and SAT scores», *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, **3**, 010106.
- CRONBACH, L.J. (1951) «Coefficient alpha and the internal structure of tests», *Psychometrika*, **16**, 297-335.
- CRONBACH, L.J. et R.J. SHAVELSON (2004) «My current thoughts on coefficient alpha and successor procedures», *Educational and Psychological Measurement*, **64**, 381-418.
- DEARDORFF, D. L. (2001) «Introductory physics students treatment of measurement uncertainty», dissertation doctorale, North Carolina State University.
- DE SERRES, M. (2003) *Intervenir sur les langages en mathématiques et en sciences*, Mont-Royal, Québec: Modulo.
- DING, L. et R. BEICHNER (2009) «Approaches to data analysis of multiple-choice questions», *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, **5**, 020103.
- DISESSA, A. A. (1993) «Toward an Epistemology of Physics», *Cognition and Instruction*, **10** (2), 105 - 225.
- DRIVER. R. (1989) “Students’ conceptions and the learning of science”, *International Journal of Science Education*, **11** (5), 481-490.
- EFLIN, J. T., S. GLENNAN et G. REISCH (1999) «The nature of science: a perspective from the philosophy of science», *International Journal of Science Teaching*, **36** (1), 107-116.
- HAMMER, D. et A. ELBY (2003) «Tapping Epistemological Resources for Learning Physics», *Journal of the Learning Sciences*, **12**(1), 53 - 90.
- FEYNMAN, R. (2000) *Vous voulez rire, monsieur Feynman*, Paris : Odile Jacob.
- FORNASINI, P. (2008) *The uncertainty in physical measurements*, Springer.

- GERSON, R. et R. A. PRIMROSE (1977) «Results of a remedial laboratory program based on a Piaget model for engineering and science freshmen», *American Journal of Physics*, **45**, 649-651.
- GILOVICH, T. (1991) *How we know what isn't so : the fallibility of human reason in everyday life*, Toronto : Free Press Maxwell Macmillan.
- GIPSON, M. et M. R. ABRAHAM (1985) «Relationships between formal-operational thought and conceptual difficulties in genetics problem solving.» Article présenté au 58e congrès annuel du *National Association for Research in Science Teaching*. French Lick Springs, IN.
- GOLDHABER, D. (1988) *Psychologie du développement*, Montréal : Éditions Études Vivantes.
- GUPTA, A. (2008) « Novice Ontologies in Physics », conférence prononcé dans le cadre de la conférence annuelle de l'*American Association of Physics Teachers*. Canda: Edmonton.
- GOTT, R. et S. DUGGAN (1995) *Investigative work in the science curriculum*, Buckingham : Open University Press.
- GUNSTONE, R. F. et R. WHITE (1981) «Understanding gravity », *Science Education*, **65**, 291 - 299.
- GUTIERREZ, R. et J. OGBORN (1992) «A causal framework for analysing alternative conceptions», *International Journal of Science Education*. **14** (2), pp 201-220.
- HAKE, R.R. (1998) «Interactive-engagement versus traditionnal methods : A six-thousand-students survey of mechanics test data for introductory physics courses», *American Journal of Physics*, **66**, 64-74.
- HALLOUN, I.A. et D. HESTENES (1985a) «The initial knowledge state of college physics students», *American Journal of Physics*, **53** (11), 1043-1048.
- HALLOUN, I.A. et D. HESTENES (1985b) «Common sense concepts about motion», *American Journal of Physics*, **53** (11), 1056-1065.
- HEGARTY-HAZEL, E. (ed.) (1990) *The student laboratory and the science curriculum*, New-York : Routledge.

- HENDERSON, C. (2002) «Common concerns about the Force Concept Inventory», *Physics Teacher*, **40** (9), 542-547.
- HESTENES D. et I.A. HALLOUN (1995) «Interpreting the force concept inventory: A response to March 1995 critique by Huffman and Heller», *Physics Teacher*, **33** (8), 502.
- HESTENES, D., M. WELLS et G. SWACKHAMMER (1992) «Force Concept Inventory», *Physics Teacher*, **30**, 141-158.
- HOFSTEIN, A. et V. N. LUNETTA (1982) «The role of the laboratory in science teaching : neglected aspects of research», *Reviews of Educational Research*, **52**, 201-217.
- HOWELL, M.P. (1998) *Méthodes statistiques en sciences humaines*, Paris : De Boeck Université.
- HUANG, C.W. (2003) «Psychometric analyses based on evidence-centered design and cognitive science of learning to explore students' problem-solving in physics», dissertation doctorale, Maryland University.
- HUBERMAN, A.M. et M.B. MILES (1991) *Analyse des données qualitatives, recueil de nouvelles méthodes*, Bruxelles : De Boeck-Université.
- HUFFMAN, D. et P. HELLER (1995). «What does the force concept inventory actually measure?», *Physics Teacher*, **30**, 141-158.
- INHELDER, B. et J. PIAGET (1955) *De la logique de l'enfant à la logique de l'adolescent : essai sur la construction des structures opératoires formelles*. Paris : Presses Universitaires de France.
- ISO (ed.) (1993) *Guide for the expression of uncertainty in measurement*, Suisse : Organisation internationale de normalisation.
- ISO (ed.) (1994) *Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure -- Partie 1: Principes généraux et définitions*. Suisse : Organisation internationale de normalisation.
- JOHNSTON, A.T., SOUTHERLAND, S.A. (2000) «A reconsideration of science misconceptions using ontological categories», présentée à la réunion annuelle de la National Association for Research in Science Teaching.

- KEATING, D.P. (1990) Adolescent thinking. in S.S. FELDMAN et G.R. ELLOITT (Eds.), *At the threshold: The developing adolescent*, Cambridge MA : Harvard University Press.
- KIRSCHNER, P.A. et M.A. MEESTER (1988) «The laboratory in higher education: Problems, premises and objectives», *Higher education*, **17**, 81-98.
- KNUTH, E.J. (2000) «Understanding connections between equations and graphs», *The Mathematics teacher*, **93** (1), 48-53.
- KRUGLAK, H. (1954) «The measurement of laboratory achievement», *American Journal of Physics*, **22**, 442.
- KRUGLAK, H. (1954) «The measurement of laboratory achievement. Part II paper-pencil laboratory achievement tests», *American Journal of Physics*, **22**, 452.
- LAURIER, M.D., R. TOUSIGNANT et D. MORISSETTE (2005) *Les principes de la mesure et de l'évaluation des apprentissages*, 3^e édition, Montréal: Gaëtan Morin.
- LAWSON, A.E. (1978) «The development and validation of a classroom test of formal reasoning», *Journal of Research in Science Teaching*, **15** (1), 11-24.
- LAWSON, A.E. (1994) «Research on the acquisition of science knowledge: epistemological foundations of cognition» dans D.L. GABEL (Dir.) *Handbook of research in science teaching and learning*, New York : Mc Millan, 131-176.
- LAZAROWITZ, R. et P. TAMIR (1994) «Research on using laboratory instruction in science» dans D.L. GABEL (Dir.) *Handbook of research in science teaching and learning*, New York : Mc Millan, 94-128.
- LEACH J. (2002) «Students' understanding of the nature of science and its influence on labwork» dans PSILLOS, D. et H. NIEDDERER *Teaching and learning in the science laboratory*, Kluwer academic publishers, Pays-Bas.
- LEGENDRE, R. (1993) *Dictionnaire actuel de l'éducation*, 2^e édition, Paris et Montréal: Eska et Larousse.
- LEINHARDT, G., O. ZASLAVSKI et M. K. STEIN (1990) «Functions, graphs and graphing: Tasks, learning and teaching», *Review of Educational Research*, **60** (1), 1-64.

- LIPPMANNKUNG, R.F. (2003) «Students' understanding of measurement and uncertainty in the physics laboratory: Social construction, underlying concepts, and quantitative analysis», dissertation doctorale, University of Maryland.
- LIPPMANNKUNG, R.F. (2005) «Teaching the concepts of measurement: An example of a concept-based laboratory course», *American Journal of Physics*, **78** (3), 771-777.
- LUBBEN, F. et R. MILLAR (1996) «Children's ideas about the reliability of experimental data», *International Journal of Science Education*, **18**, 955-968.
- LUNETTA, V. N. (2003) «The school science laboratory : Historical perspectives and contexts for contemporary teaching » in FRASER, B. J. et K. G. TOBIN (ed.) *International Handbook of science education, tome I*, Pays-Bas : Kluwer. 249-262.
- MARTIN, M.O., I.V S. MULLIS, E.J. GONZALEZ et S.J. CHROSTOWSKI (2004) *Findings From IEA's Trends in International Mathematics and Science Study at the Fourth and Eighth Grades*, Chestnut Hill, MA: TIMSS & PIRLS International Study Center, Boston College.
- 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. (1997) «Students' conceptions and problem solving in mechanics», in A. Tiberghien, Jossem E., L. & Barojas J. (Eds). *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education*, I.C.P.E.
- MCDERMOTT, L.C. et E. REDISH (1999) «Resource letter : PER-1: Physics Education Research», *American Journal of Physics*, **67**, 755-767.
- MCDERMOTT, L.C., M. ROSENQUIST et E.H. VAN ZEE (1987) «Student difficulties in connecting graphs and physics: Examples from kinematics», *American Journal of Physics*, **55**, 503-513.
- MCKENZIE, D.L. et M.J. PADILLA (1986) «The construction and validation of the test of graphing in science (TOGS)», *Journal or Research in science teaching*, **23** (7), 571-579.
- MCCLOSKEY, M., A. CARAMAZZA et B. GREEN (1980) «Curvilinear motion in the absence of external forces: Naive beliefs about the motion of objects », *Science*, **210**, 1139-1141.

- MEDAWAR, P. D. (1963) «Is the scientific paper a fraud ?», *The Listener*, 12 sept., p. 310-312.
- MILLAR, R. et V. HAMES (2001) «Using diagnostic assessment to improve students' learning in science : Some preliminary findings from work to develop and test diagnostic tools», in *Third Conference of the European Science Education Research Association (ESERA)*, Grèce : Thessalonique.
- NIEDDERER, H., TIBERGHIE, A., BUTY, C., HALLER, K., HUCKE, L., SANDER, F., FISCHER, H., SCHECKER, H., AUFSCHNAITER, S.V., et WELZEL, M. (1998) «Category based analysis of videotapes from labwork (CBAV) - Method and results from four case-studies». Working paper 9 from the european project *Labwork in Science Education* (Targeted Socio-Economic Research Programme, Project PL 95-2005), 51 pages.
- OLDS, S.W. et D.E. PAPALIA (2000) *Développement de la personne*, Montréal : Éditions Études Vivantes.
- OLDS, B., R. STEVELER,, R. MILLER et M.A NELSON (2004) «Preliminary results from the development of a concept inventory in thermal and transport sciences ». Paper presented at the American Society for Engineering Education Annual Conference, Salt Lake City.
- PILLAY, S. A., BUFFLER, F. LUBBEN et S. ALLIE (2008) «Effectiveness of a GUM-compliant course for teaching measurement in the introductory physics laboratory», *European Journal of Physics*, **29**, 647-659.
- PETERS, P. C. (1982) «Even honors students have conceptual difficulties with physics», *American Journal of Physics*, **50** (6), 501-508.
- POINCARÉ, H. (1943) *La science et l'hypothèse*, Paris : Flammarion.
- PSILLOS, D. et H. NIEDDERER (2002) *Teaching and learning in the science laboratory*, Kluwer academic publishers, Pays-Bas.
- REIF, F. et M. ST-JOHN (1979) «Teaching physicists' thinking skills in the laboratory», *American Journal of Physics*, **47**, 950-957.
- ROTH, W.-M. (2003) *Toward an Anthropology of Graphing*, Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

- ROTH, W.-M. et R. DUIT (1997) «Learning in real time: how understandings emerge from physics students' laboratory activities ». In M.G. Shafto and P. Langley (eds), *Proceedings of the Ninth Conference of the Cognitive Science Society* (Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum), 1028.
- ROTH, W.-M. et M. K MCGINN (1996) «Graphing: Cognitive ability or practice?», *Science Education*, **81** (1), 91-106.
- REBELLO, N.S. et D.A. ZOLLMAN (2003) «The effect of distracters on student performance on the force concept inventory», *American Journal of Physics*, **72** (1), 116 -125.
- SAGLAM, M. et R.M. MILLAR (2006) «Upper high school students' understanding of electromagnetism», *International Journal of Science Education*, **28** (5), 543- 566.
- SAVINAINEN, A. et J. VIIRI (2004) *A case study evaluating Students' representational coherence of Newton's first and secon laws*, In MARX, J. S. FRANKLIN et K. CUMMINS (Eds) *Proceedings of the Physics Education Reaserach Conference*, Wisconsin : Madison.
- SAVINAINEN, A. et J. VIIRI (2008) « The force concept inventory as a measure of students' conceptual coherence», *International Journal of Science and Mathematics Education*, **6**, 719- 640.
- SAVINAINEN, A., P. NIEMINEN, J. VIIRI, J. KORKEA-AHO et A. TALIKKA (2007) «FCI-based Multiple Choice Test for Investigating Students' Representational Coherence», *Proceedings of the Physics Education Research Conference* (Greenboro, NC), 176-179.
- SÉRÉ, M.-G., R. JOURNEAUX et C. LARCHER (1993) «Learning statistical analysis of measurement errors», *International Journal of Science Education*, **15** (4), 427-438.
- SINCLAIR, R.C., M.M. MARK, S.E. MOORE, C.A. LAVIS et A.S. SOLDAT (2000) «An electoral butterfly effect», *Nature*, **408**, 665-666.
- STEINBERG, R.N. et M.S. SABELLA (1997) «Performance on multiple-choice diagnostics and complementary exam problems», *Physics Teacher*, **35**, 150-155.
- STIGLER, S.M. (1986) *The history of statistics : The measurement of uncertainty before 1900*, Boston, MA : The Belknap Press of Harvard University Press.

- TARDIF, J. (1992) *Pour un enseignement stratégique : l'apport de la psychologie cognitive*, Montréal: les Éditions Logiques, 480 p.
- TAYLOR, J.R. (1997) *Error analysis : the study of uncertainties in physical measurements*, Sausalito, CA : University Science Books.
- TAYLOR, B.N. et C.E. KUYATT (1994) *NIST Technical Note 1297 : Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*, Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology.
- THORNTON, R.K. et D.R. SOKOLOFF (1998) «Assessing student learning of Newton's laws: The Force and Motion Conceptual Evaluation and the Evaluation of Active Learning Laboratory and Lecture Curricula», *American Journal of Physics*, **66** (4), 338 -352.
- THOUIN, M. (2004) *Enseigner les sciences et la technologie au préscolaire et au primaire*. Québec : Éditions MultiMondes.
- TOBIN, K.G. et W. CAPIE (1981) «The development and validation of a group test of logical thinking», *Educational and Psychological Measurement*, **41**, 413-423.
- TOUMA, G. (2007) *Un paradigme d'expérimentation au laboratoire de science pour l'identification et l'optimisation statistique d'un modèle algébrique*, Dissertation doctorale, Université de Montréal.
- VAN DER MAREN, J.M. (1996) *Méthodes de recherche pour l'éducation, 2e édition*, Montréal : PUM; Bruxelles : De Boeck-Université.
- VAN DRIEL, J.H. et H. VERLOOP (1999) «Teachers' knowledge of models and modelling in science», *International Journal of Science Education*, **21** (11), 1141-1153.
- VERMERSCH, P. (1984) «L'observation systématique dans l'étude du fonctionnement cognitif», *Psychologie Française*, **29**, 3-4, 297-302.
- VERMERSCH, P. (1996) «L'explicitation de l'action», *Cahiers de linguistique sociale*, 1996, **28-29**, 113-120.
- VERMERSCH, P. (2006) *L'entretien d'explicitation*, Paris, ESF.
- VIENNOT, L. (1979) «Spontaneous reasoning in elementary dynamics», *European Journal of Science Education*, **1** (2), 205-21.
- VOLKWYN, T.S., S. ALLIE, A. BUFFLER et F. LUBBEN (2008) «Impact of a conventional introductory laboratory course on the understanding of measurement», *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, **4**, 1-10.
- VOSNIADOU, S. (1994) «Capturing and modeling the process of conceptual change», *Learning and Instruction*, **4**, 45-69.

- VOSNIADOU, S. (2002) *On the nature of naive physics*, in Margarita Limón et Lucia Mason, *Reconsidering Conceptual Change: Issues in Theory and Practice*, Pays-Bas: Springer.
- WAVERING, M.J. (1989) «Logical reasoning necessary to make line graphs», *Journal of Research in Science Teaching*, **26** (5), 373-379.
- WELZEL M, K. HALLER, M. BANDIERA, D. HAMMELEV, P. KOUMARAS, H. NIEDDERER, A. C. PAULSEN, K. BÉCU-ROBINAULT et S. VON AUFSCHNAITER (1998) «Teachers' objectives for labwork. Research tools and cross country results». Working paper 6 from the european project *Labwork in Science Education* (Targeted Socio-Economic Research Programme, Project PL 95-2005), 109 pages.

Annexe 1 - Conventions et définitions

Il existe de nombreux indices statistiques pour évaluer la fidélité d'un examen. Voici ceux qui seront employées ici ainsi que les conventions adoptées.

N_{total}	Nombre de répondants
N_{corrects}	Nombre de répondants ayant répondu correctement à l'item
$N_{\text{hauts-total}}$	Nombre de répondants classés dans le quartile supérieur
$N_{\text{hauts-corrects}}$	Nombre de répondants classés dans le quartile supérieur et ayant répondu correctement à l'item
$N_{\text{bas-total}}$	Nombre de répondants classés dans le quartile inférieur
$N_{\text{bas-corrects}}$	Nombre de répondants classés dans le quartile inférieur et ayant répondu correctement à l'item

Écart-type

(Eq. 11 Écart-type)
$$\sqrt{\frac{\sum (Note - Moyenne)^2}{N_{\text{total}} - 1}}$$

Coefficient de facilité (fac.)
$$N_{\text{corrects}} / N_{\text{total}}$$

(Eq. 12 Coefficient de facilité)

Coefficient de discrimination (disc.)

$$(N_{\text{hauts-corrects}} / N_{\text{hauts-total}}) - (N_{\text{bas-corrects}} / N_{\text{bas-total}})$$

(Eq. 13 Coefficient de discrimination)

Corrélation bisériale de point par option (Rpbis)

$$\frac{[NOTE_MOY_{r.a.c.o.}] - [NOTE_MOY_{r.a.c.a.o.}]}{N_{total} * \acute{E}cart - type_{Global}} \sqrt{N_c * N_{non_c}}$$

(Eq. 14 Corrélation bisériale de point par option)

r.a.c.o. = répondants ayant choisi l'option

r.a.c.a.o. = Répondants ayant choisi une autre option

N_c = Nombre de répondant ayant choisi l'option

N_{non_c} = Nombre de répondant n'ayant pas choisi l'option

Corrélation bisériale de point par item (Rpbis - item)

$$\frac{[NOTE_MOY_{r.a.r.i.}] - [NOTE_MOY_{r.a.p.r.i.}]}{N_{total} * \acute{E}cart - type_{Global}} \sqrt{N_{i.r.} * N_{i.n.r.}}$$

(Eq. 15 Corrélation bisériale de point par item)

r.a.r.i. = Répondants ayant réussi l'item

r.a.p.r.i. = Répondants n'ayant pas réussi l'item

$N_{i.r.}$ = Nombre de répondant ayant réussi l'item

$N_{i.n.r.}$ = Nombre de répondant n'ayant pas réussi l'item

Coefficient α de l'examen si l'item est enlevé (Alpha si abs.)

$$\frac{N_{items} - 1}{N_{items} - 2} * \left[1 - \frac{\sum VARIANCE_{des_choix_par_item_sauf_celui_enlevé}}{VARIANCE_{addition_des_choix_par_repondant_sans_l'item}} \right]$$

(Eq. 16 Coefficient alpha de l'examen si l'item est enlevé)

Coefficient KR20 (KR20)

Voir : Coefficient alpha de Cronbach-Guttman

Coefficient KR21 (KR21)

$$\left(\frac{N_{items}}{N_{items} - 1} \right) \left[1 - \frac{MOYENNE * (N_{items} - MOYENNE)}{N_{items} * VARIANCE_{notes}} \right]$$

(Eq. 17 Coefficient KR21)

Erreur standard de mesure (en pourcentage) (ESM %)

$$ÉCART - TYPE \% * \sqrt{1 - \alpha}$$

(Eq. 18 Erreur standard de mesure en pourcentage)

Erreur standard de mesure (en valeur absolue) (ESM abs.)

(Eq. 19 Erreur standard de mesure en valeur absolue)

$$\text{ÉCART - TYPE}_{\text{absolu}} * \sqrt{1 - \alpha}$$

Disc. moy. Moyenne des coefficients de discrimination

Coefficient α de Cronbach (ou Cronbach – Guttman) (alpha)

$$\left[\frac{N_{\text{items}}}{N_{\text{items}} - 1} \right] \times \left[1 - \frac{\sum \text{VARIANCE}_{\text{des_choix_par_item}}}{\text{VARIANCE}_{\text{addition_des_choix_par_repondant}}} \right]$$

(Eq. 20 Coefficient alpha de Cronbach-Guttman)

Corrélations entre les données brutes (mise en rang et Likert) et les items cognitifs binaires (0 ou 1) [Corr. bin.-glob.]

Fonction COEFFICIENT.CORRELATION de Excel®

Matrice de la probabilité bilatérale de la statistique t de Student pour tous les coefficients de Corrélations [Sig.Corr]

Fonction LOI.STUDENT de Excel®

Matrice de la probabilité bilatérale de la statistique t de Student pour tous les coefficients de Corrélations binaires-globaux [Sig. Corr. bg]

Fonction LOI.STUDENT de Excel®

Annexe 2 - Test of Logical Thinking (TOLT)

Item 1 Orange Juice #1

Four large oranges are squeezed to make six glasses of juice. How much juice can be made from six oranges?

1. 7 glasses
2. 8 glasses
3. 9 glasses
4. 10 glasses
5. other

Item 2 Reason

1. The number of glasses compared to the number of oranges will always be in the ratio 3 to 2.
2. With more oranges, the difference will be less.
3. The difference in the numbers will always be two.
4. With four oranges the difference was 2. With six oranges the difference would be two more.
5. There is no way of predicting.

Item 3 Orange Juice #2

How many oranges are needed to make 13 glasses of juice?

1. $6 \frac{1}{2}$ oranges
2. $8 \frac{2}{3}$ oranges
3. 9 oranges
4. 11 oranges
5. other

Item 4 Reasons

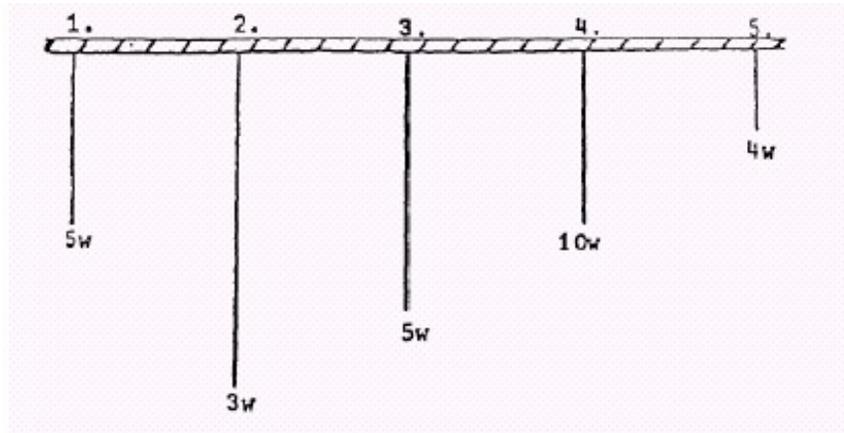
1. The number of oranges compared to the number of glasses will always be in the ratio of 2 to 3
2. If there are seven more glasses, then five more oranges are needed.
3. The difference in the numbers will always be two.
4. The number of oranges will always be half the number of glasses.
5. There is no way of predicting the number of oranges.

Item 5 The Pendulum's Length

Suppose you wanted to do an experiment to find out if changing the length of a pendulum changed the amount of time it takes to swing

back and forth. Which pendulums would you use for the experiment?

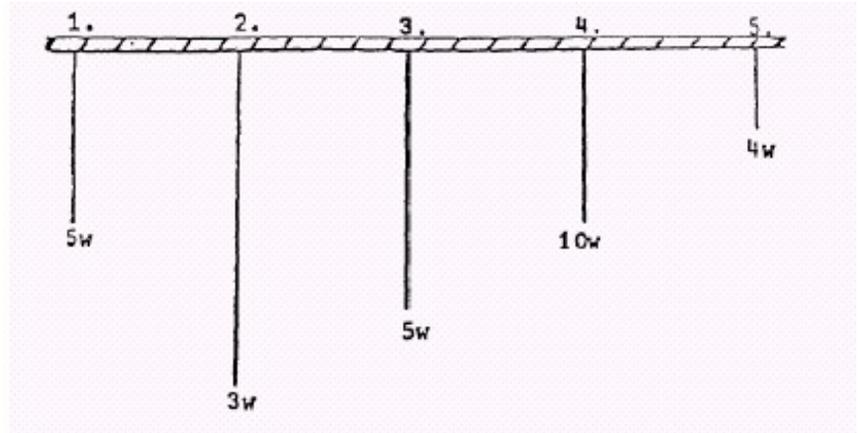
1. 1 and 4
2. 2 and 4
3. 1 and 3
4. 2 and 5
5. all

**Item 6 Reason**

1. The longest pendulum should be tested against the shortest pendulum.
2. All pendulums need to be tested against one another.
3. As the length is increased the number of washers should be decreased.
4. The pendulums should be the same length but the number of washers should be different.
5. The pendulums should be different lengths but the numbers of washers should be the same.

Item 7 The Pendulum's Weight

Suppose you wanted to do an experiment to find out if changing the weight on the end of the string changed the amount of time the pendulum takes to swing back and forth. Which pendulums would you use for the experiment?



1. 1 and 4
2. 2 and 4
3. 1 and 3
4. 2 and 5
5. all

Item 8 Reason

1. The heaviest weight should be compared to the lightest weight.
2. All pendulums need to be tested against one another.
3. As the number of washers is increased the pendulum should be shortened.
4. The number of washers should be different but the pendulums should be the same length.
5. The number of washers should be the same but the pendulums should be different lengths.

Item 9 The Vegetable Seeds

A gardener bought a package containing 3 squash seeds and 3 bean seeds. If just one seed is selected from the package, what are the chances that it is a bean seed?

1. 1 out of 2
2. 1 out of 3
3. 1 out of 4
4. 1 out of 6
5. 4 out of 6

Item 10 Reasons

1. Four selections are needed because the three squash seeds could have been chosen in a row.
2. There are six seeds from which one bean seed must be chosen.
3. One bean seed needs to be selected from a total of three.
4. One half of the seeds are bean seeds.
5. In addition to a bean seed, three squash seeds could be selected from a total of six.

Item 11 The Flower Seeds

A gardener bought a package of 21 mixed seeds. The package contents listed:

3 short red flowers

4 short yellow flowers

5 short orange flowers

4 tall red flowers

2 tall yellow flowers

3 tall orange flowers

If just one seed is planted, what are the chances that the plant that grows will have red flowers?

1. 1 out of 2

2. 1 out of 3

3. 1 out of 7

4. 1 out of 21

5. other

Item 12 Reason

1. One seed has to be chosen from among those that grow red, yellow or orange flowers.

2. $\frac{1}{4}$ of the short and $\frac{4}{9}$ of the tall are red.

3. It does not matter whether a tall or a short is picked. One red seed needs to be picked from a total of seven red seeds.

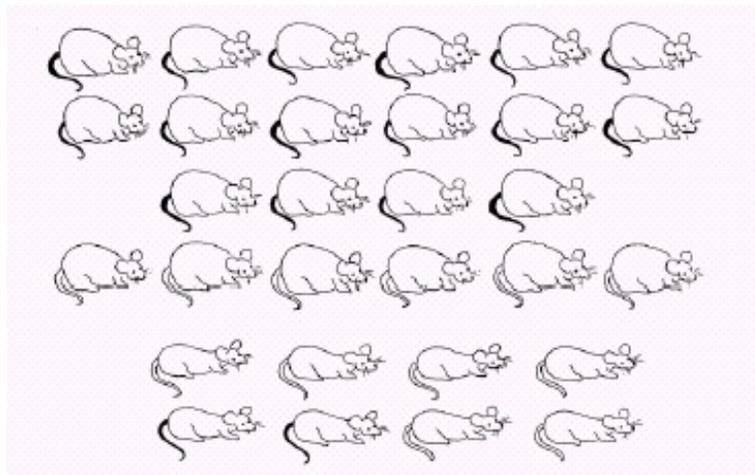
4. One red seed must be selected from a total of 21 seeds.

5. Seven of the twenty one seeds will produce red flowers.

Item 13 The Mice

The mice shown represent a sample of mice captured from a part of a field. Are fat mice more likely to have black tails and thin mice more likely to have white tails?

1. Yes
2. No

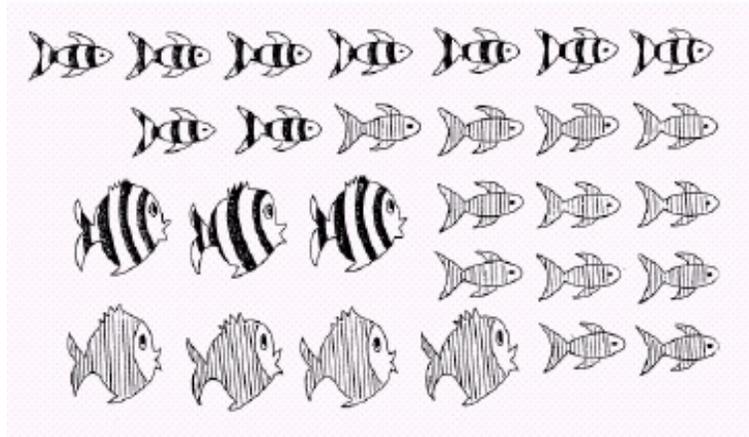
**Item 14 Reason**

1. $\frac{8}{11}$ of the fat mice have black tails and $\frac{3}{4}$ of the thin mice have white tails.
2. Some of the fat mice have white tails and some of the thin mice have white tails.
3. 18 mice out of thirty have black tails and 12 have white tails.
4. Not all of the fat mice have black tails and not all of the thin mice have white tails.
5. $\frac{6}{12}$ of the white tailed mice are fat.

Item 15 The Fish

Are fat fish more likely to have broad stripes than thin fish?

1. Yes
2. No

**Item 16 Reason**

1. Some fat fish have broad stripes and some have narrow stripes.
2. $\frac{3}{7}$ of the fat fish have broad stripes.
3. $\frac{12}{28}$ are broad striped and $\frac{16}{28}$ are narrow striped.
4. $\frac{3}{7}$ of the fat fish have broad stripes and $\frac{9}{21}$ of the thin fish have broad stripes.
5. Some fish with broad stripes are thin and some are fat.

Annexe 3 - Cahier des charges de la macro d'analyse d'items

1. S'insère dans le menu " outils " en tant qu' "Analyse d'items ".
2. Traduit en chiffres (de 1 à 5) des résultats littéraux (de A à E) sur une nouvelle feuille Excel. (Par exemple, les données peuvent provenir de l'analyse automatisée de feuilles optiques par un équipement approprié)
3. Permet d'analyser simultanément des données associées à des items cognitifs, de mise en rang et d'appréciation (Likert).
4. Permet deux grandes rubriques d'analyses : Analyse classique d'items et Analyse introspective des choix
5. Génère un fichier index pour pouvoir naviguer entre les différentes analyses.
6. Génère des hyperliens sur la feuille Excel pour une navigation aisée.

ANALYSE CLASSIQUE D'ITEMS

ITEMS COGNITIFS

7. Convertit, dans un tableau à part, les données brutes en résultats binaires (0 = échec, 1 = réussite)
8. Permet d'associer des résultats numériques aux répondants, identifiés par trois indicatifs potentiels (par exemple : prénom, nom, code alphanumérique).
9. Même chose que précédemment mais cela fonctionne tout aussi bien même si les données sont parfaitement anonymes.
10. Indique la moyenne et l'écart type de l'examen (en % et en absolu) et par item.
11. Sépare les répondants (anonymes ou non) en trois catégories : haut (75e percentile et plus), bas (25e percentile et moins) et intermédiaire.
12. Indique la note maximale obtenue, la note minimale obtenue et les notes servant des séparateurs pour le 25e percentile, le 50e et le 75e percentile.
13. Pour chaque item :
 - Coefficient de facilité.
 - Coefficient de discrimination.
 - Indique la proportion de hauts ayant répondu correctement
 - Indique la proportion de bas ayant répondu correctement
 - Analyse de fréquence pour la globalité des répondants.
 - Analyse de fréquence pour les répondants hauts.
 - Analyse de fréquence pour les répondants bas.
 - Calcul du coefficient de corrélation bisériale de point (RPBIS) par option.
 - Calcul du coefficient de corrélation bisériale de point (RPBIS) par item.
 - Calcul du coefficient alpha de Cronbach (identique à KR20) si l'item est enlevé.
14. Fabrique l'histogrammes des notes obtenues (en %).

15. Répartit les notes obtenues (en %) par décade.
16. Calcule le coefficient KR20.
17. Calcule le coefficient KR21.
18. Calcule l'erreur standard de mesure (ESM) (% et absolu).
19. Calcule la moyenne des coefficients de discrimination.
20. Identifie les répondants dont les choix de réponses montrent un taux de coïncidences supérieur à 80 % (détection éventuelle de fraudes).
21. Établit la matrice de cohérence, i.e. la proportion des étudiants qui ont réussi l'item y ayant réussi l'item x .
22. Illustre visuellement les occurrences supérieures à 50%, 75% et 90 %.
23. Établit la matrice d'anti-cohérence, i.e. la proportion des étudiants qui ont réussi l'item y ayant raté l'item x .
24. Illustre visuellement les occurrences supérieures à 50%, 75% et 90 %.
25. Établit la matrice des coefficients de discrimination spécifiques, i.e. la proportion des étudiants qui ont réussi l'item y ayant réussi l'item x - la proportion des étudiants qui ont réussi l'item y ayant réussi l'item x .
26. Illustre visuellement les occurrences supérieures à 50%, 75% et 90 % et inférieures à 10%.

ITEMS DE MISE EN RANG

27. Élimine les répondants ayant choisi des ex aequo.
28. Calcule le coefficient W de Kendall.
29. Interprète statistiquement le coefficient W par un test de chi carré unilatéral à $p < 0,05$.

ITEMS D'APPRÉCIATION (LIKERT)

30. Calcule le coefficient alpha de Cronbach.
31. Évalue l'effet d'enlever chaque item sur le coefficient alpha.

ANALYSES COMMUNES

32. Cumule les fréquences (par exemple, combien de répondants ont choisi l'option A à la question 1) incluant les questions laissées en blanc (aucun choix sélectionné).
33. Illustre visuellement (par un histogramme) la répartition entre les divers choix pour chaque questions.
34. Calcule les principales statistiques concernant la répartition des choix pour chacune des questions (moyenne, médiane, mode, écart-type, variance, kurtosis et asymétrie)
35. Construit la matrice de corrélations entre les différents items (de toutes natures) depuis les résultat bruts.
36. Construit la matrice de la signification statistique des corrélations obtenues (test t de Student) depuis les résultat bruts.

37. Fait ressortir en jaune les corrélations significatives ($p < 0,05$, bilatéral)
38. Construit la matrice de corrélations entre les différents items (de toutes natures) depuis les résultats binaires pour les items cognitifs et les résultats bruts.
39. Construit la matrice de la signification statistique des corrélations obtenues (test t de Student) depuis les résultats binaires pour les items cognitifs et les résultats bruts.
40. Fait ressortir en jaune les corrélations significatives ($p < 0,05$, bilatéral).

TABLEAU DE BURT

41. Analyse la répartition des répondants ayant choisi les divers choix offerts étant donné leur choix à une question spécifique. Par exemple, pour tous les répondants ayant choisi le choix C à la question 27, combien ont choisi le choix A à la question 2, le choix B à la question 2, ...
42. Indique, pour chaque choix de réponses, le nombre initial de répondants l'ayant sélectionné.
43. Illustre visuellement le choix correspondant à la bonne réponse en insérant une trame verte dans la cellule correspondante.
44. Illustre visuellement les choix pour lesquels le taux de réponse est supérieur à 50%, à 75% ou égal à 100% par une mise en couleur des cellules appropriées.

Annexe 4 - Protocole qualitatif, version 1

La viscosité est une mesure de la résistance que présente un liquide à l'écoulement. Plus un liquide est visqueux plus il s'écoule lentement. Logiquement, si on laisse tomber une bille dans deux liquides différents, la vitesse maximale (limite) atteinte par la bille sera plus grande dans le liquide le moins visqueux. On peut utiliser cette propriété pour estimer le coefficient de viscosité, η . En effet, lorsqu'une sphère se déplace à une vitesse relativement faible (<10 m/s) dans un liquide, on peut montrer que celui-ci exerce une force de frottement égale à : $f = 6\pi\eta vr$ où v est la vitesse de la sphère dans le liquide, r est le rayon de la sphère et η est le coefficient de viscosité.

Les tâches qui vous sont assignées sont les suivantes :

- Déterminez le coefficient de viscosité du shampoing Baby Johnson à température ambiante ;
- Déterminez s'il change linéairement avec la température ;
- Si possible, déterminez cette relation.

Une mesure préliminaire a donné $\eta = (11,0 \pm 1,2)$ kg/(m·s) à une température $T = (21,5 \pm 0,2)$ °C.

Directives :

- Vous devrez produire un rapport sur place. Celui-ci peut être fait à la main et sans retouche.
- Laissez-le plus de traces écrites possibles, en autant que ça ne vous ralentisse indûment.
- Vous avez le droit de consulter un manuel de référence (et aussi le « professeur » mais seulement en cas de dernier recours si vous êtes dans un cul-de-sac)
- Aucun protocole détaillé ne sera disponible, il vous incombe de proposer une approche plausible (de toute façon, il n'existe pas bonne méthode unique)

Matériel disponible :

- o 2 chronomètres (p.p.g¹ : 0,01 s)
- o 2 cylindres gradués en plastique (p.p.g : 2 mL)
- o Balance à plateaux (p.p.g : 0,1 g)
- o Micromètre (p.p.g : 0,01 mm)
- o Règle de 30 cm (p.p.g : 1 mm)
- o Thermomètre numérique (p.p.g : 0,1 °C)
- o Billes d'acier (environ 20)
- o Aimant

¹ Plus petite graduation

- o Godet d'aluminium
- o Bac en plastique
- o Papier buvard
- o Eau chaude et eau froide
- o Contenant haut
- o Boisclair et Pagé
- o Manuel : Physique mécanique
- o Feuilles de notes
- o Crayons à mine, efface, crayons à l'encre
- o Calculatrice
- o Ordinateur avec Excel
- o Du shampoing.

Annexe 5 - Protocole qualitatif, version 2

La viscosité est une mesure de la résistance que présente un liquide à l'écoulement. Plus un liquide est visqueux plus il s'écoule lentement. Logiquement, si on laisse tomber une bille dans deux liquides différents, la vitesse maximale (limite) atteinte par la bille sera plus grande dans le liquide le moins visqueux. On peut utiliser cette propriété pour estimer le coefficient de viscosité, η . En effet, lorsqu'une sphère se déplace à une vitesse relativement faible (<10 m/s) dans un liquide, on peut montrer que celui-ci exerce une force de frottement égale à : $f = 6\pi\eta vr$, où v est la vitesse de la sphère dans le liquide, r est le rayon de la sphère et η est le coefficient de viscosité.

La tâche qui vous est assignée est la suivante :

Déterminez le coefficient de viscosité du shampooing Baby Johnson à température ambiante ;

Une mesure préliminaire a donné $\eta = (2,6 \pm 0,6)$ kg/(m·s) à une température $T = (21,5 \pm 0,2)$ °C.

Directives :

- Vous devrez produire un rapport sur place. Celui-ci peut être fait à la main et sans retouche.
- Laissez-le plus de traces écrites possibles, en autant que ça ne vous ralentisse indûment.
- Vous avez le droit de consulter un manuel de référence (et aussi le « professeur » mais seulement en cas de dernier recours si vous êtes dans un cul-de-sac)
- Aucun protocole détaillé ne sera disponible, il vous incombe de proposer une approche plausible (de toute façon, il n'existe pas bonne méthode unique)

Matériel disponible :

- 2 chronomètres (p.p.g¹ : 0,01 s)
- 2 cylindres gradués en plastique (p.p.g : 2 mL)

¹ Plus petite graduation

- Balance numérique (p.p.g : 0,1 g)
- Pied à coulisse (p.p.g : 0,1 mm)
- Règle de 30 cm (p.p.g : 1 mm)
- Billes d'acier (environ 100)
- Godets d'aluminium (pèses-matières)
- Bac en plastique
- Papier buvard
- Boisclair et Pagé (Guide des sciences expérimentales)
- Manuel : Physique mécanique
- Feuilles de notes
- Crayons à mine, efface, crayons à l'encre
- Calculatrice
- Du shampoing.

Annexe 6 - FCI

INVENTAIRE DES CONCEPTS DE MÉCANIQUE (FCI)

Note : Ce test est la traduction d'un examen américain utilisé dans plusieurs collèges et universités offrant des cours de physique. Il permet à un professeur de bien cerner quelles sont les connaissances préalables de ses étudiants et, par la suite, de bien mesurer l'efficacité de son enseignement des concepts centraux à la mécanique newtonienne. **En aucune façon**, il ne servira dans le calcul de votre note globale. Le but du test est d'évaluer vos conceptions pas votre **intelligence** ou vos aptitudes. Vous repasserez le même test à la fin de la session.

Durée : 50 minutes.

DIRECTIVES

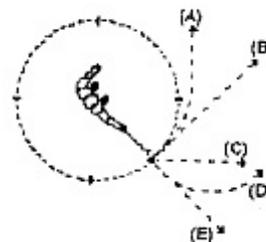
1. Ne rien écrire sur le questionnaire.
2. Inscrivez votre numéro de dossier (DA) dans les espaces appropriés.
3. Choisissez une seule réponse par question. Si aucune ne vous satisfait, choisissez celle qui vous semble la meilleure.
4. Répondez à toutes les questions.

1. Deux balles métalliques sont de la même grosseur mais l'une pèse deux fois plus que l'autre. Les balles sont lâchées au même moment depuis le sommet d'un édifice. Le temps que mettent les balles pour arriver au sol sera :
 - A. Environ deux fois plus court pour la plus lourde.
 - B. Environ deux fois plus court pour la plus légère.
 - C. Environ le même pour les deux.
 - D. Nettement plus court pour la plus lourde, mais pas nécessairement de moitié.
 - E. Nettement plus court pour la plus légère, mais pas nécessairement de moitié.

2. Imaginez une collision frontale entre un camion et une petite automobile. Durant la collision,
 - A. Le camion exerce une force plus grande sur l'auto que celle-ci sur le camion.
 - B. L'auto exerce une force plus grande sur le camion que celui-ci sur l'auto.
 - C. Aucune force n'est appliquée par l'un sur l'autre, l'automobile se fait écraser par le simple fait d'être devant le camion.
 - D. Le camion exerce une force sur l'auto mais celle-ci n'en exerce pas sur le camion.
 - E. Le camion exerce une force sur l'auto et celle-ci exerce la même force sur le camion.

3. Deux billes d'acier, l'une pesant deux fois plus que l'autre, roulent à la même vitesse et tombent à partir d'une table horizontale. Dans cette situation :
 - A. Les deux billes touchent le sol à environ la même distance horizontale de la base de la table.
 - B. La plus lourde touche le sol à une distance horizontale de la base de la table valant à peu près la moitié de celle parcourue par la plus légère.
 - C. La plus légère touche le sol à une distance horizontale de base de la table valant à peu près la moitié de celle parcourue par la plus lourde.
 - D. La plus lourde touche le sol plus près de la base de la table que la plus légère mais sans être nécessairement de moitié.
 - E. La plus légère touche le sol plus près de la base de la table que la plus lourde mais sans être nécessairement de moitié.

4. Une balle massive est attachée à une corde et tourne en rond dans un plan horizontal tel qu'illustré sur la figure. Au point illustré sur la figure, la corde se brise au niveau de la balle. Si on observait ces événements depuis un point d'observation situé directement au-dessus, indiquez la trajectoire de la balle après que la corde se soit brisée.

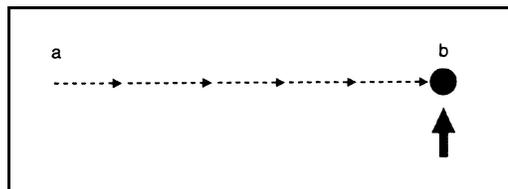


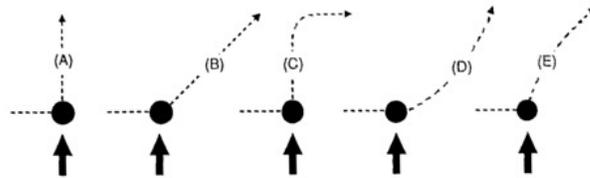
5. Un garçon lance une balle d'acier directement à la verticale. **En négligeant tout effet relié à la résistance de l'air**, la (les) force(s) agissant sur la balle jusqu'à son retour au sol est (sont) :

- A. Son poids dirigé verticalement vers le bas ainsi qu'une force dirigée vers le haut et décroissant constamment.
- B. Une force dirigée vers le haut et décroissant constamment de l'instant où la balle quitte la main jusqu'à son point le plus élevé après quoi agit une force gravitationnelle dirigée vers le bas et qui augmente au fur et à mesure que la balle se rapproche de la Terre.
- C. Une force gravitationnelle constante dirigée vers le bas ainsi qu'une force dirigée vers le haut qui décroît constamment jusqu'au point le plus élevé, après quoi agit seule la force gravitationnelle.
- D. Uniquement la force gravitationnelle dirigée vers le bas.
- E. Aucune de ces réponses, la balle retombe sur la Terre car c'est son mouvement naturel.

• *Référez-vous à l'énoncé suivant et à la figure ci-dessous pour répondre aux questions 6-7-8-9 :*

Une rondelle de hockey, vue depuis le dessus sur le schéma, glisse à vitesse constante, du point a au point b, sur une surface horizontale sans frottement. Lorsque la rondelle atteint le point b, elle reçoit une brève poussée horizontale dans la direction indiquée par la flèche.





6. Quelle sera la trajectoire adoptée par la rondelle **après** avoir reçu la brève poussée ?

7. La vitesse de la rondelle juste **après** avoir reçu la brève poussée ;

- A. Est égale à la vitesse v_0 qu'elle possédait avant.
- B. Est égale à la vitesse v qu'elle acquiert de la poussée, indépendamment de v_0 .
- C. Est égale à la somme arithmétique des vitesses v_0 et v .
- D. Est plus petite que v_0 et v .
- E. Est plus grande que v_0 et v , mais plus petite que leur somme arithmétique.

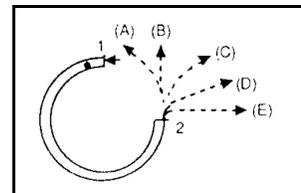
8. Le long de la trajectoire **sans frottement** que vous avez choisie, de quelle façon évolue la vitesse **après** la poussée :

- A. Aucun changement.
- B. Augmente continuellement.
- C. Diminue continuellement.
- D. Augmente pour un temps puis diminue par après.
- E. Constante pour un temps puis diminue par après.

9. Les principales forces agissant sur la rondelle le long de la trajectoire que vous avez choisie après la poussée sont :

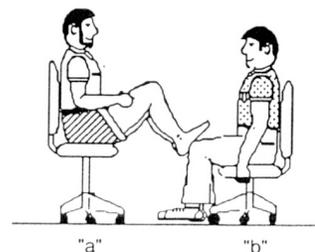
- A. La force gravitationnelle dirigée vers le bas et la pression atmosphérique.
- B. La force gravitationnelle dirigée vers le bas et la force horizontale de quantité de mouvement orientée **dans la direction du mouvement**.
- C. La force gravitationnelle dirigée vers le bas, la force de la table dirigée vers le haut, et une force horizontale orientée **dans la direction du mouvement**.
- D. La force gravitationnelle dirigée vers le bas et la force de la table dirigée vers le haut.
- E. La gravité n'agit pas sur la rondelle, elle tombe en raison de sa tendance intrinsèque d'aller rejoindre sa place naturelle.

10. La figure accompagnant ce problème représente un canal semi-circulaire fermement ancré à une **table horizontale**. Une balle pénètre dans le canal au point 1 et ressort au point 2. Quelle trajectoire représente le plus fidèlement la direction de la balle après qu'elle soit sortie et qu'elle roule sur la table.



11. Deux étudiants sont assis sur des chaises montées sur roulettes et se font face tel qu'illustré sur la figure suivante. L'étudiant A dont la masse vaut 95 kg place ces pieds nus sur les genoux de B dont la masse vaut 77 kg. L'étudiant A pousse brusquement sur les genoux de B provoquant le déplacement des deux chaises. Dans cette situation,

- Aucun des deux étudiants n'exerce de force sur l'autre.
- L'étudiant A exerce une force sur B, mais B n'exerce pas de force sur A.
- Les deux étudiants exercent une force sur l'autre mais B exerce une force supérieure.
- Les deux étudiants exercent une force sur l'autre mais A exerce une force supérieure.
- Les deux étudiants exercent l'un sur l'autre une force de grandeur égale.

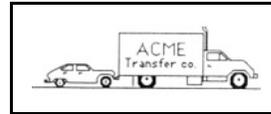


12. Un livre repose sur le dessus d'une table. Des forces énumérées ci-après, laquelle ou lesquelles s'applique(nt) sur le livre :

- La force gravitationnelle dirigée vers le bas.
 - Une force exercée vers le haut par la table.
 - Une force nette exercée vers le bas par la pression de l'air.
 - Une force nette exercée vers le haut par la pression de l'air.
- 1 seulement.
 - 1 et 2.
 - 1, 2 et 3.
 - 1, 2 et 4.
 - Aucune de ces réponses car le bloc étant au repos aucune force ne s'exerce sur lui.

- *Référez-vous à la figure et à l'énoncé suivant pour répondre aux questions 13-14.*

Un camion tombe en panne sur la route et se fait pousser vers une ville par une voiture compacte.

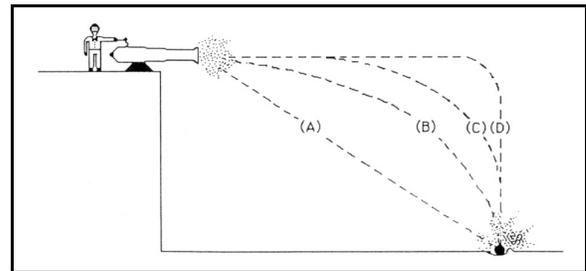


13. Alors que l'auto **prend de la vitesse** en poussant le camion ;
- La grandeur de la force exercée par l'auto poussant le camion est égale à celle du camion poussant l'auto en retour.
 - La grandeur de la force exercée par l'auto poussant le camion est moindre que celle du camion poussant l'auto en retour.
 - La grandeur de la force exercée par l'auto poussant le camion est supérieure à celle du camion poussant l'auto en retour.
 - Puisque le moteur de l'auto fonctionne, celle-ci exerce une force sur le camion alors que le moteur de ce dernier est en panne et par conséquent il ne peut pas pousser en retour sur l'auto. Le camion se fait pousser simplement car il est devant l'auto.
 - Ni le camion ni l'auto n'exercent de force l'un sur l'autre, le camion se fait pousser simplement car il est devant l'auto.
14. Après que la personne dans l'auto, **qui pousse encore le camion**, atteint la vitesse de croisière qu'elle désire maintenir pour continuer le trajet à vitesse constante ;
- La grandeur de la force exercée par l'auto poussant le camion est égale à celle du camion poussant l'auto en retour.
 - La grandeur de la force exercée par l'auto poussant le camion est moindre que celle du camion poussant l'auto en retour.
 - La grandeur de la force exercée par l'auto poussant le camion est supérieure à celle du camion poussant l'auto en retour.
 - Puisque le moteur de l'auto fonctionne, celle-ci exerce une force sur le camion alors que le moteur de ce dernier est en panne et par conséquent il ne peut pas pousser en retour sur l'auto. Le camion se fait pousser car il est devant l'auto.
 - Ni le camion ni l'auto n'exercent de force l'un sur l'autre, le camion se fait pousser simplement car il est devant l'auto.

15. Lorsqu'une balle de caoutchouc lâchée du repos rebondit sur le plancher, la direction de son mouvement est inversée car ;

- A. L'énergie de la balle est conservée.
- B. La quantité de mouvement de la balle est conservée.
- C. Le plancher exerce une force sur la balle qui stoppe sa chute puis la propulse vers le haut.
- D. Le plancher est dans le chemin de la balle et la balle doit continuer de bouger.
- E. Aucune de ces réponses.

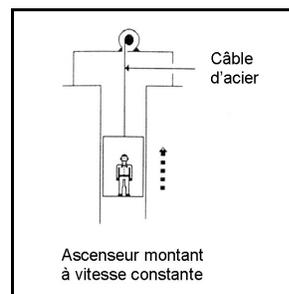
16. Quelle trajectoire représente le mieux le mouvement du boulet de canon ?



17. Une pierre tombant du toit d'une maison d'un seul étage vers la surface de la Terre;

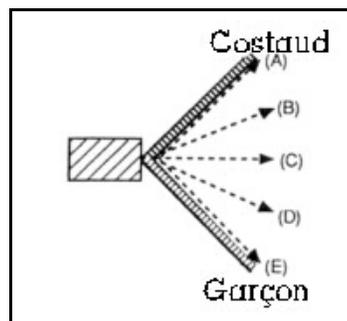
- A. Atteint sa vitesse maximale assez tôt après avoir été lâchée puis tombe à vitesse constante.
- B. Accélère en tombant, surtout parce que plus la pierre s'approche de la Terre plus l'attraction augmente.
- C. Accélère en tombant en raison de la force gravitationnelle constante agissant dessus.
- D. Tombe en raison de la tendance intrinsèque à tous les objets de tomber vers la Terre.
- E. Tombe en raison de l'action combinée de la force gravitationnelle et de la pression de l'air la poussant vers le bas.

18. Un ascenseur, illustré à la figure ci-contre, est tiré vers le haut dans une cage d'ascenseur par un câble d'acier. La résistance de l'air est négligeable. Lorsque l'ascenseur se dirige vers le haut à **vitesse constante** ;



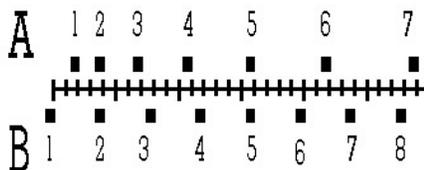
- A. La force exercée par le câble, dirigée vers le haut, est plus grande que celle de la gravité, dirigée vers le bas.
- B. La force exercée par le câble, dirigée vers le haut, est égale à celle de la gravité, dirigée vers le bas.
- C. La force exercée par le câble, dirigée vers le haut, est plus petite que celle de la gravité, dirigée vers le bas.
- D. L'ascenseur monte car le câble raccourcit et non pas en raison d'une force exercée par le câble.
- E. La force exercée par le câble, dirigée vers le haut, est plus grande que l'action combinée de la gravité et de la pression de l'air, dirigées vers le bas.

19. Deux hommes, un costaud et un jeune garçon, tirent aussi fort qu'ils le peuvent sur deux cordes attachées à une caisse, tel qu'illustré dans la figure de droite. Laquelle des trajectoires indiquées correspondra le mieux à la direction de la caisse qui se fait tirer ?

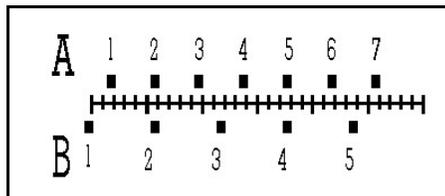


20. Les positions successives de deux mobiles sont représentées à toutes les 0,20 seconde par les carrés numérotés, tel qu'illustré sur la figure suivante. Les mobiles se déplacent vers la droite. Est-ce que les blocs ont parfois la même vitesse ?

- A. Non.
- B. Oui, à l'instant 2.
- C. Oui, à l'instant 5.
- D. Oui, à l'instant 2 et 5.
- E. Oui, à un instant compris dans l'intervalle 3 à 4.

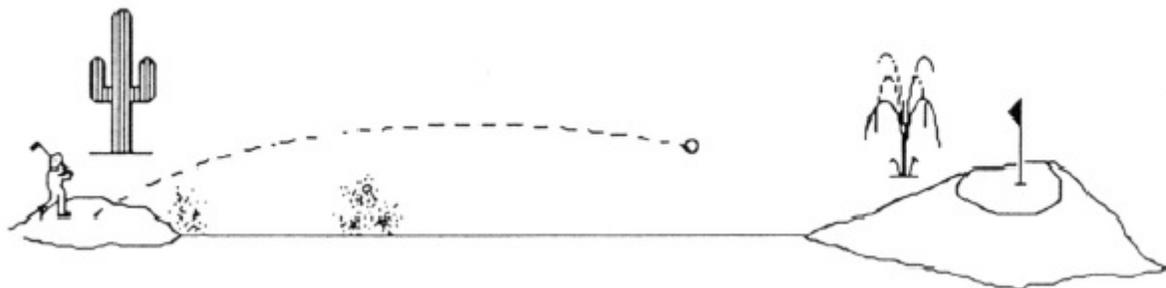


21. Les positions successives de deux mobiles sont représentées à des intervalles de temps égaux par les carrés numérotés, tel qu'illustré sur la figure suivante. Les mobiles se déplacent vers la droite. Les accélérations des blocs sont reliées de la façon suivante :



- A. Accélération de $a >$ accélération de b .
- B. Accélération de $a =$ accélération de $b > 0$.
- C. Accélération de $b >$ accélération de a .
- D. Accélération de $a =$ accélération de $b = 0$.
- E. Informations insuffisantes pour répondre à la question.

22. On observe qu'une balle de golf frappée dans une allée adopte la trajectoire illustrée

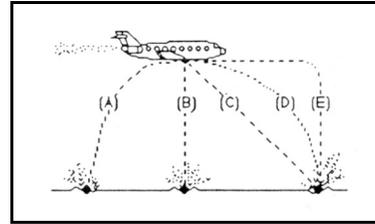


sur la figure suivante.

Des forces énumérées ci-après, laquelle ou lesquelles s'applique(nt) sur la balle pour la totalité de son vol ?

1. La force gravitationnelle.
 2. La force de l'impact.
 3. La force de la résistance de l'air.
- A. 1 seulement.
 - B. 1 et 2.
 - C. 1, 2 et 3.
 - D. 1 et 3.
 - E. 2 et 3.

23. Une boule de quille tombe accidentellement de la soute d'un avion volant horizontalement. Tel que vu depuis le sol, quelle sera la trajectoire de la boule après avoir quitté l'avion ?

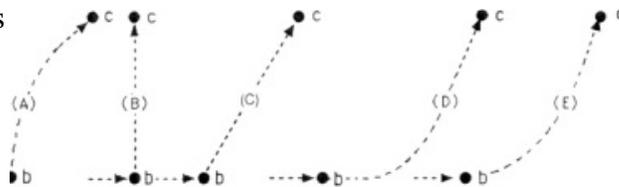


- *Référez-vous à la figure et à l'énoncé suivant pour répondre aux questions 24-25-26-27.*

Une fusée dérive de côté dans l'espace du point a au point b et n'est sujette à aucune force extérieure. Au point b, les moteurs de la fusée lui donnent une poussée dirigée dans une direction perpendiculaire à la ligne ab. Les moteurs s'éteignent par la suite lorsque la fusée atteint un point c.



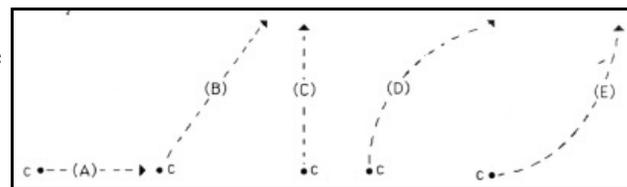
24. Quelle trajectoire représente le plus fidèlement le trajet emprunté par la fusée entre b et c ?



25. La vitesse de la fusée du point b au point c ;

- Est constante.
- Augmente continuellement.
- Diminue continuellement.
- Augmente puis demeure constante.
- Demeure constante puis diminue.

26. Au point c les moteurs de la fusée s'éteignent. Quelle sera la trajectoire de la fusée après le point c ?



27. Après le point c , la vitesse de la fusée ;

- A. Est constante.
- B. Augmente continuellement.
- C. Diminue continuellement.
- D. Augmente puis demeure constante.
- E. Demeure constante puis diminue.

28. Une grosse boîte est poussée sur le sol à une **vitesse constante** de 4 m/s. Que pouvez-vous conclure à propos des forces agissant sur la boîte ?

- A. Si la force appliquée sur la boîte double, la vitesse constante passera à 8 m/s.
- B. La force appliquée sur la boîte se déplaçant à vitesse constante doit être plus grande que son poids.
- C. La force appliquée sur la boîte se déplaçant à vitesse constante doit être égale à la somme des forces de frottement qui résistent au mouvement.
- D. La force appliquée sur la boîte se déplaçant à vitesse constante doit être plus grande que la somme des forces de frottement qui résistent au mouvement.
- E. Une force est appliquée sur la boîte pour la faire bouger mais les forces externes tel le frottement ne sont pas réelles , elles ne font que s'opposer au mouvement.

29. Si la force appliquée sur la boîte du problème précédent cesse soudainement d'être exercée, la boîte va ;

- A. S'arrêter immédiatement.
- B. Continuer à vitesse constante pour un court laps de temps puis va ralentir jusqu'à l'arrêt.
- C. Commencer immédiatement à ralentir jusqu'à l'arrêt.
- D. Continuer à vitesse constante.
- E. Augmenter sa vitesse pour un court laps de temps puis va ralentir jusqu'à l'arrêt.

Annexe 7 - Questionnaire quantitatif, article 2

Concepts avancés de laboratoire

Ce test est purement formatif (il ne compte pas pour des points) et anonyme. Il permet de sonder votre interprétation de diverses notions pertinentes aux laboratoires.

Directives :

- Le test se fait sans assistance documentaire, il dure environ 30 minutes.
- Indiquez un seul choix par question sur la feuille optique à l'aide d'un crayon à mine **HB**.
- Ne rien écrire sur le présent questionnaire.
- Vous avez le droit d'utiliser une calculatrice ou une feuille brouillon.
- Votre participation est volontaire et très appréciée.

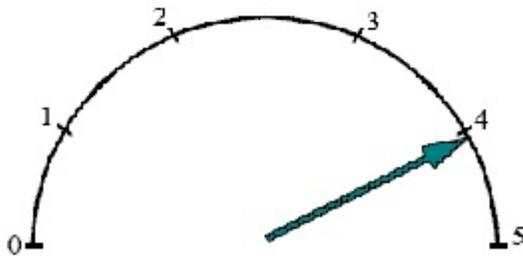
#1) Votre professeur vous donne un petit prisme rectangulaire (« cube ») assez amoché. Des mesures des côtés prises avec une règle très abîmée ont donné (en mm) :

$$4 \pm 1, 5 \pm 1 \text{ et } 5 \pm 2.$$

Parmi les résultats suivants, lequel représente un estimé **raisonnable** de l'incertitude sur le volume du cube (en mm³):

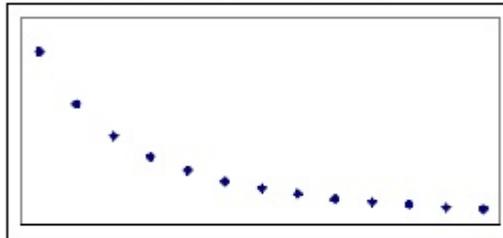
- A) 0,85
- B) 1
- C) 2
- D) 4
- E) 90

#2) Vous effectuez une lecture sur l'écran d'un appareil, tel qu'illustré à la figure suivante. Quelle est la meilleure façon d'écrire ce résultat et son incertitude de lecture ?



- A) 4,1 (incertitude inconnue)
- B) $4,10 \pm 0,01$
- C) $4,10 \pm 0,05$
- D) $4,1 \pm 0,2$
- E) $4,1 \pm 0,5$

#3) Une équipe a griffonné le graphique suivant dans leur journal de laboratoire :



Quelle fonction décrit certainement ces données:

- A) $y = -\sqrt{x}$
- B) $y = \ln x$
- C) $y = e^{-x}$
- D) $y = 1/x$
- E) Aucune de ces réponses.

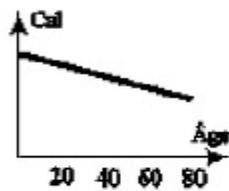
#4) Un fabricant indique que sa balance donne des résultats précis à **0,2 g**. Trois équipes ont mesuré la masse d'un hamster à des moments différents de la journée et ont successivement obtenu:

$$86,9 \text{ g}; 86,3 \text{ g}; 86,6 \text{ g}.$$

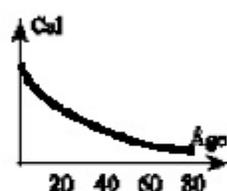
Le meilleur estimé de l'incertitude sur la masse du hamster serait:

- A) 0,1 g
- B) 0,2 g
- C) 0,3 g
- D) 0,5 g
- E) 0,8 g

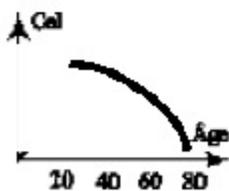
#5) Un de vos oncles affirme que la quantité quotidienne de calories qu'un individu devrait consommer à partir de l'âge de 20 ans est inversement proportionnelle à son âge. Le graphique représentant le mieux cette opinion est :



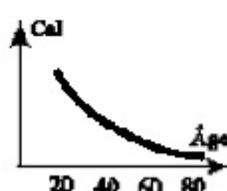
A)



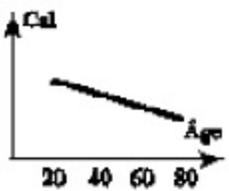
B)



C)



D)

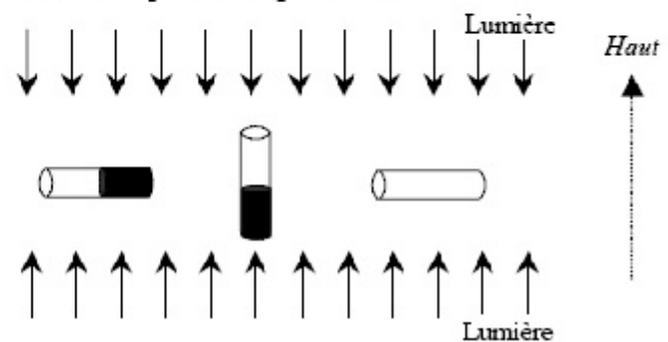


E)

#6) Une variable indépendante dans une expérience représente une quantité...

- A) Que l'on désire trouver.
- B) Qui ne change pas durant toute l'expérience.
- C) Qui n'a pas d'incidence sur notre expérience.
- D) Que l'on fait changer.
- E) Qui n'est pas affectée par les autres variables.

#7) Pour savoir si les mouches à fruits sont sensibles (s'approchent ou s'éloignent) à la lumière rouge et/ou à la gravité vous disposez de 4 tubes en verre dont vous pouvez opacifier les extrémités en y plaçant un carton noir amovible. Chaque tube contient 20 mouches. Vous allumerez une lumière rouge pour une durée de 5 minutes puis compterez le nombre de mouches dans chaque extrémité. Si les trois premiers tubes ont été disposés tel qu'illustré :



Comment devrait-on disposer le dernier tube ?

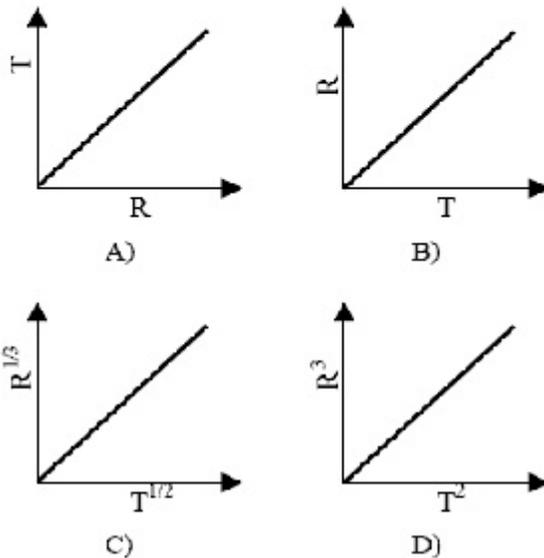


#8) On peut trouver la masse d'une étoile par la relation : $M_e = a \frac{R^3}{T^2}$ dans laquelle a est une

constante. Il faut toutefois connaître pour une des planètes en orbite autour de cette étoile : sa période (T) et sa distance moyenne depuis l'étoile (R). Si des astronomes sont capables de mesurer le rayon et la période avec une précision de 4%, quelle sera la précision sur la masse ?

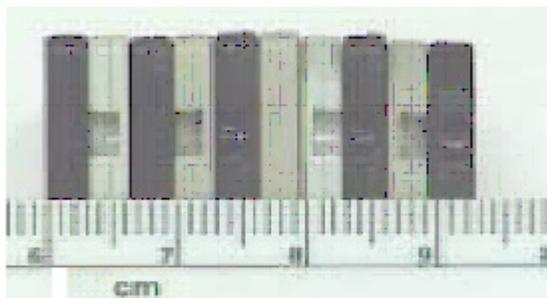
- A) 1 %
- B) 4 %
- C) 8 %
- D) 14 %
- E) 20 %

#9) La relation qui permet de trouver la masse d'une étoile étant toujours $M_e = a \frac{R^3}{T^2}$, lequel des graphiques suivants donnera une droite si on mesure la distance et la période de plusieurs planètes :



E) On ne peut pas obtenir une droite.

#10) Lequel des choix décrit le mieux l'épaisseur d'une disquette (il y a 10 disquettes identiques sur la photographie) :



- A) $0,3 \pm 0,1$ cm.
 B) $0,33 \pm 0,05$ cm.
 C) $0,325 \pm 0,005$ cm.
 D) $0,3225 \pm 0,0005$ cm.

#11) Une mesure avec un rapporteur d'angles donne : $A = 82^\circ \pm 1^\circ$. Comment devrait être écrite la réponse finale de $\sin(A)$?

- A) $\sin(A) = 1.0 \pm 0.2$
 B) $\sin(A) = 0.99 \pm 0.02$
 C) $\sin(A) = 0.990 \pm 0.002$
 D) $\sin(A) = 0.9903 \pm 0.0024$

#12) Deux étudiants mesurent la période d'un pendule dont la période théorique vaut 1,58 s. L'étudiant A utilise un chronomètre digital (précision : 0,1 s) et l'étudiant B utilise une montre à trotteuse (précision : 1 s). Ils mesurent tous les deux 10 oscillations et obtiennent :

$$\boxed{A : 13,5 \text{ s}} ; \boxed{B : 16 \text{ s}}$$

Lequel des choix suivants décrit le mieux la principale cause d'erreur :

- A) Le temps de réflexe des expérimentateurs.
 B) La montre prend de l'avance.
 C) L'amplitude du pendule est trop grande.
 D) La mesure de 9 oscillations au lieu de 10.

#13) Une expérience simple est tentée pour déterminer l'accélération d'un objet. On laisse tomber une balle de baseball du haut d'un édifice de trois étages dont on a mesuré la hauteur avec une corde et un mètre. Le temps de chute est mesuré avec un chronomètre numérique. Après trois essais, les résultats donnent (en moyenne) :

$$h = (6,2 \pm 0,1) \text{ m}, t = (1,14 \pm 0,08) \text{ s}.$$

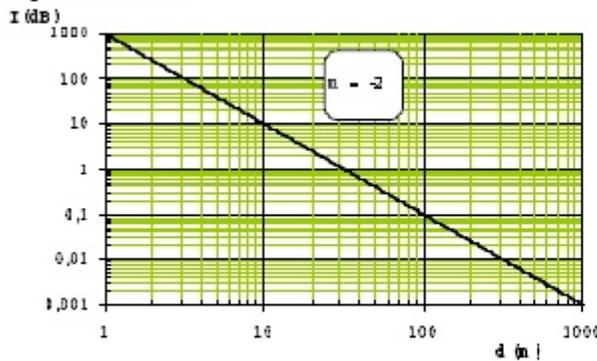
L'accélération qu'on en déduit vaut :

$$g = (9 \pm 1) \text{ m/s}^2 \text{ par la formule : } g = \frac{2h}{t^2}.$$

Quelle suggestion est la plus appropriée pour améliorer cette expérience :

- A) Diminuer l'incertitude sur la hauteur en utilisant un ruban à mesurer.
 B) Diminuer l'incertitude sur le temps à l'aide d'un système automatique d'acquisition de données.
 C) Diminuer l'incertitude sur le temps à l'aide d'un assistant qui détermine le moment précis de l'impact avec le sol.
 D) Éliminer la résistance de l'air.

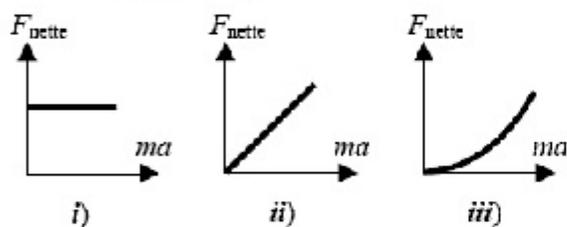
#14) Une étudiante en orthophonie étudie l'intensité (en dB) du bruit produit par la sirène d'un train en fonction de la distance (de 3 m à 1 km). Elle produit le graphique log-log suivant dont la pente vaut -2:



Quelle conclusion peut-elle en tirer concernant la relation entre l'intensité I et la distance d ? (Le symbole α se lit : « proportionnel à »)

- A) $I \propto d^{-1}$
- B) $I \propto d^{-2}$
- C) $I \propto d$
- D) $I \propto -2d$
- E) $I \propto e^{-2d}$

#15) Quelle phrase décrit le mieux la compatibilité des graphiques ci-dessous avec la deuxième loi de Newton ($F_{\text{nette}} = ma$)?



- A) Seul *i* est compatible.
- B) Seul *ii* est compatible.
- C) Seul *iii* est compatible.
- D) Ils sont tous compatibles.
- E) Ils sont tous incompatibles.

#16) Pour mesurer la viscosité d'un liquide, on mesure la vitesse maximale (v) (vitesse constante atteinte rapidement) de petites billes (de rayon r et de masse m) descendant vers le fond d'un cylindre gradué rempli du liquide. En bonne approximation, le coefficient de viscosité du

liquide peut être trouvé par : $\eta = \frac{mg}{6\pi r v}$. Une

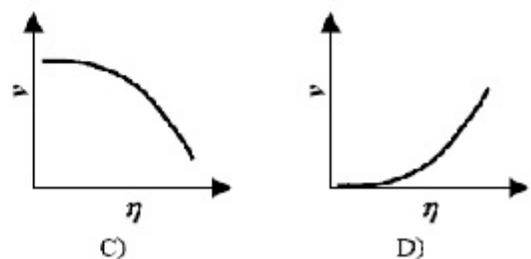
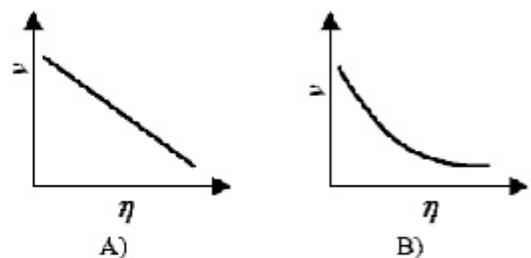
analyse préliminaire donne pour votre liquide, $\eta = (11,2 \pm 0,8) \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ à 20°C . Un autre expérimentateur désire reproduire votre résultat, quel paramètre pourra être différent :

- A) Le type de liquide (remarque: d'autres liquides ont d'autres coefficients de viscosité.)
- B) La température du liquide (remarque: la viscosité change avec la température.)
- C) La masse des billes (remarque: la vitesse maximale est reliée à la masse.)
- D) Aucun des paramètres précédents ne doit changer.

#17) Selon la formule précédente, la vitesse maximale de chute dans un liquide peut être

trouvée par : $v = \frac{mg}{6\pi r \eta}$. Lequel des graphiques

suivants décrit le mieux l'évolution de v par rapport à η ?



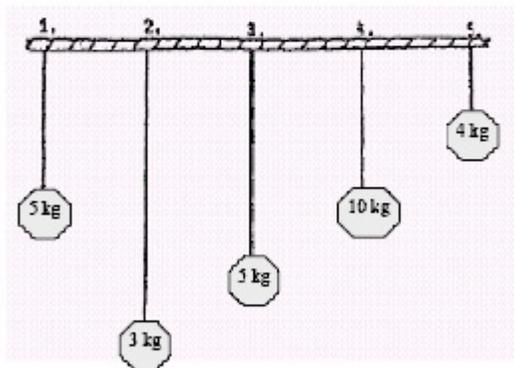
#18) Un professeur du primaire organise une expérience pour découvrir, avec ses élèves, quel modèle d'avions de papier vole le plus loin. Lequel des paramètres ci-dessous, devrait varier d'un lancer à l'autre?

- A) La personne qui lance.
- B) La vitesse du lancement.
- C) La hauteur du lancement.
- D) Le poids des avions.
- E) La forme des avions.

#19) Vous étudiez la profondeur de cratères formés par des billes de différentes grosseurs mais de même densité que vous laissez tomber dans du sable. Quel est l'intrus dans les graphiques que vous pourriez produire ?

- A) Profondeur vs poids de la bille.
- B) Profondeur vs type de sable.
- C) Profondeur vs hauteur de chute.
- D) Profondeur vs énergie cinétique avant l'impact.
- E) Profondeur vs densité de la bille.

#20) Vous désirez concevoir une expérience pour trouver si la longueur d'un pendule influence sa période. Lequel ou lesquels choisiriez-vous ?

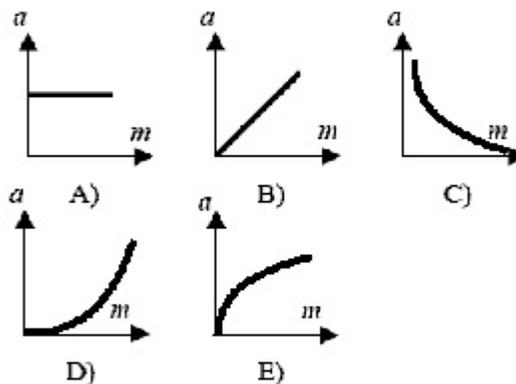


- A) 2
- B) 1 et 4
- C) 1 et 3
- D) 2 et 5
- E) Tous

#21) Laquelle des affirmations suivantes décrit le mieux votre raisonnement pour la question précédente :

- A) Le pendule le plus long doit être testé contre le plus court.
- B) Tous les pendules doivent être testés pour avoir le plus de données possibles.
- C) Puisque la corde est plus longue, la période sera plus élevée.
- D) Les pendules devraient être de même longueur mais de masses différentes.
- E) Les pendules devraient être de longueurs différentes mais de masse identique.

#22) Pour revenir à la seconde loi de Newton ($F_{\text{nette}} = ma$), Supposons que vous appliquiez la même force nette sur des objets de masses différentes. Quel graphique représentera le mieux vos résultats de l'accélération de l'objet en fonction de sa masse ?



#23) Un biologiste désire estimer la population de bernard-l'hermite (petit crustacé) d'une lagune. Il compte le nombre de spécimens dans un carré de 1 m de côté qu'il pose au fond de l'eau. Après plusieurs décompte, il en arrive à un nombre de 13 ± 3 b.L/m². Si la lagune a une superficie de 3600 ± 200 m², quelle est la population de bernard-l'hermite dans la lagune?

- A) 280 ± 70
- B) 300 ± 100
- C) $46\ 800 \pm 200$
- D) $46\ 800 \pm 600$
- E) Les réponses précédentes sont clairement fausses (valeur ou incertitude).

#24) Quelle procédure donnera le plus **précisément** la masse d'une petite bille d'acier (du type que l'on retrouve dans les roulements à billes) sur une balance dont la tolérance vaut **0,01 g**?

- A) Peser une bille.
- B) Peser dix billes différentes et faire la moyenne.
- C) Par la méthode de la masse volumique.
- D) Peser simultanément 50 billes identiques.
- E) Peu importe; toutes les méthodes donnent la même précision soit celle de la balance (0,01 g).

#25) Choisissez l'énoncé qui décrit la principale raison, selon vous, pour laquelle il est nécessaire de quantifier l'incertitude.

- A) Pour montrer qu'il y a des risques d'erreur.
- B) Pour pouvoir comparer des résultats.
- C) Pour connaître la précision d'un résultat.
- D) Pour avoir des résultats précis.
- E) Pour avoir une mesure expérimentale qui se rapproche de la valeur théorique.

#26) Quelle est votre préférence :

- A) Sciences de la santé
- B) Sciences pures et appliquées

#27) Quel est votre âge ?

- A) 17 ans ou moins
- B) 18 ans
- C) 19 ans ou plus

#28) Avez-vous déjà participé à une version antérieure de cette étude ?

- A) Oui
- B) Non

#29) À des fins statistiques, veuillez inscrire votre sexe :

- A) Masculin
- B) Féminin

Merci de votre participation !

Pour des commentaires, questions ou suggestions, communiquez avec l'auteur en envoyant un courriel à :
martin.periard@umontreal.ca

Annexe 8 - Questionnaire quantitatif, article 3

Concepts avancés de laboratoire

Ce test est purement formatif (il ne compte pas pour des points) et anonyme.

Directives :

- Le test se fait sans assistance documentaire, il dure environ 30 minutes.
- Indiquez un seul choix par question sur la feuille optique à l'aide d'un crayon à mine HB.
- Ne rien écrire sur le présent questionnaire.
- Vous avez le droit d'utiliser une calculatrice ou une feuille brouillon.
- Votre participation est volontaire et très appréciée.

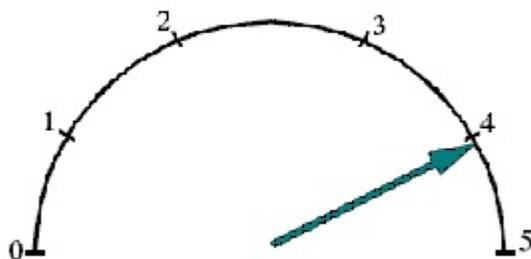
#1) Votre professeur vous donne un petit prisme rectangulaire (« cube ») assez amoiché. Des mesures des côtés prises avec une règle très abîmée ont donné (en mm) :

$$4 \pm 1, 5 \pm 1 \text{ et } 5 \pm 2.$$

Parmi les résultats suivants, lequel représente un estimé raisonnable de l'incertitude sur le volume du cube (en mm³):

- A) 0,85
- B) 1
- C) 2
- D) 4
- E) 60

#2) Vous effectuez une lecture sur l'écran d'un appareil, tel qu'illustré à la figure suivante. Quelle est la meilleure façon d'écrire ce résultat et son incertitude de lecture ?



- A) 4,1 (incertitude inconnue)
- B) $4,10 \pm 0,01$
- C) $4,10 \pm 0,05$
- D) $4,1 \pm 0,2$
- E) $4,1 \pm 0,5$

#3) Un fabricant indique que sa balance donne des résultats précis à 0,2 g. Trois équipes ont mesuré la masse d'un hamster à des moments différents de la journée et ont successivement obtenu :

$$86,9 \text{ g}; 86,3 \text{ g}; 86,6 \text{ g}.$$

Le meilleur estimé de l'incertitude sur la masse du hamster serait :

- A) 0,1 g
- B) 0,2 g
- C) 0,3 g
- D) 0,5 g
- E) 0,8 g

#4) Une mesure avec un rapporteur d'angles donne : $A = 82^\circ \pm 1^\circ$. Comment devrait être écrite la réponse finale de $\sin(A)$?

- A) $\sin(A) = 1,0 \pm 0,2$
- B) $\sin(A) = 0,99 \pm 0,02$
- C) $\sin(A) = 0,990 \pm 0,002$

#5) On détermine l'accélération d'un objet en laisse tomber une balle de baseball du haut d'un édifice de trois étages. Les résultats donnent :

$$h = (6,2 \pm 0,1) \text{ m}, t = (1,14 \pm 0,08) \text{ s}.$$

L'accélération qu'on en déduit vaut :

$$g = (9 \pm 1) \text{ m/s}^2 \text{ par la formule : } g = \frac{2h}{t^2}.$$

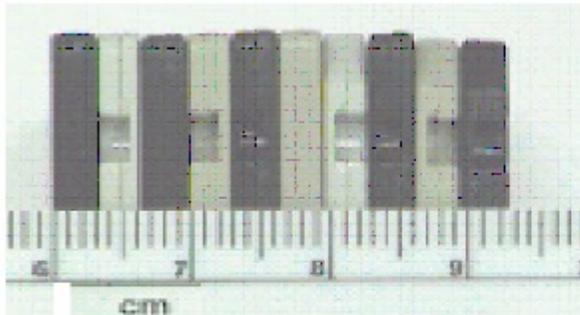
Quelle suggestion est la plus appropriée pour diminuer l'incertitude sur les résultats de cette expérience :

- A) Diminuer l'incertitude sur la hauteur.
- B) Diminuer l'incertitude sur le temps.

#6) Si $M = \frac{R^3}{T^2}$ et que l'on connaît T et R à 4%,
quelle sera la précision sur M ?

- A) 1 %
- B) 4 %
- C) 8 %
- D) 14 %
- E) 20 %

#7) Lequel des choix décrit le mieux l'épaisseur
d'une disquette (il y a 10 disquettes identiques
sur la photographie) :



- A) $0,3 \pm 0,1$ cm.
- B) $0,33 \pm 0,05$ cm.
- C) $0,325 \pm 0,005$ cm.
- D) $0,3225 \pm 0,0005$ cm.

#8) La mesure d'un des côtés d'un carré donne
($8,2 \pm 0,1$) cm. Quelle est la valeur du périmètre
(en cm) ?

- A) $34,000 \pm 0,025$
- B) $34,00 \pm 0,05$
- C) $34,0 \pm 0,1$
- D) $34,0 \pm 0,2$
- E) $34,0 \pm 0,4$

#9) La mesure d'un des côtés du même carré
donne encore ($8,2 \pm 0,1$) cm. Quelle est la valeur
de sa surface (en cm^2) ?

- A) $67,24 \pm 0,01$
- B) $67,2 \pm 0,1$
- C) $67,2 \pm 0,4$
- D) $67,2 \pm 0,8$
- E) 67 ± 3

#10) Un biologiste désire estimer la population
de bernard-l'hermite (petit crustacé) d'une
lagune. Il compte le nombre de spécimens dans
un carré de 1 m de côté qu'il pose au fond de
l'eau. Après plusieurs décomptes, il en arrive à
un nombre de (13 ± 3) b.l./ m^2 . Si la lagune a une
superficie de (3600 ± 200) m^2 , quelle est la
population de bernard-l'hermite dans la lagune?

- A) $46\,800 \pm 0,3$
- B) $46\,800 \pm 200$
- C) $46\,800 \pm 203$
- D) $46\,800 \pm 600$
- E) $47\,000 \pm 13\,000$

#11) Quelle procédure donnera le plus
précisément la masse d'un grain de riz sur une
balance dont la tolérance vaut $0,01$ g?

- A) Peser un grain.
- B) Peser dix grains différents et faire la
moyenne.
- C) Peser simultanément 10 grains.
- D) Peu importe; toutes les méthodes donnent la
même précision soit celle de la balance (0,01 g).

#12) Une mesure du diamètre d'un cylindre avec un pied à coulisse a donné : $D = (14,4 \pm 0,2)$ mm. Quelle est le rayon du cylindre (en mm) ?

- A) 7,2 (incertitude inconnue)
- B) $7,2 \pm 0,1$
- C) $7,2 \pm 0,2$
- D) $7,2 \pm 0,4$

#13) En 2003, le débit d'une rivière fut estimé à (600 ± 50) m³s⁻¹. En 2007, une mesure du débit a donné (520 ± 50) m³s⁻¹. Peut-on en conclure que le débit a changé ?

- A) Oui.
- B) Non
- C) On ne peut répondre car l'incertitude sur la différence est inconnue.

#14) Une colonie de bactérie est en croissance exponentielle, la population future pouvant être estimée par $P = (1,2 \times 10^6) e^{Rt}$ où $R = (0,44 \pm 0,06)$ min⁻¹ et t est le temps en minutes (min). Quelle sera la population après une minute ? ($t = 1$)

- A) $(1,86 \pm 0,04) \times 10^6$
- B) $(1,86 \pm 0,06) \times 10^6$
- C) $(1,86 \pm 0,07) \times 10^6$
- D) $(1,9 \pm 0,3) \times 10^6$
- E) $(1,9 \pm 1,3) \times 10^6$

#15) Choisissez l'énoncé qui décrit la principale raison, selon vous, pour laquelle il est nécessaire de quantifier l'incertitude.

- A) Pour montrer qu'il y a des risques d'erreur.
- B) Pour pouvoir comparer des résultats.
- C) Pour connaître la précision d'un résultat.
- D) Pour avoir des résultats précis.
- E) Pour avoir une mesure expérimentale qui se rapproche de la valeur théorique

#16) Quelle est votre niveau d'aisance en relation avec le calcul d'incertitude :

- A) Très à l'aise
- B) À l'aise mais avec quelques hésitations
- C) Peu à l'aise

À des fins statistiques, veuillez inscrire...

#17) votre âge :

- A) 17 ans ou moins
- B) 18 ans
- C) 19
- D) 20 ans ou plus

#18) votre sexe :

- A) Masculin
- B) Féminin

Merci de votre participation !

Pour des commentaires, questions ou suggestions, communiquez avec l'auteur en envoyant un courriel à :
martin.periard@umontreal.ca

Annexe 9 - Codes VBA de la version 74 de la macro d'analyse d'items

```
Option Explicit

Sub accueil()
formAccueil.Show
End Sub

Sub transcription()
'On Error GoTo flag100:
Dim position, position2 As Integer
Dim strNomFeuille As String
Dim strNomFeuilleDepart As String
Dim PctEffectue As Single
Dim objcell As Object
strNomFeuilleDepart = ActiveSheet.Name

strNomFeuille = InputBox("Quel est le nom de la nouvelle feuille ?", _
    " Des chiffres et des lettres ", "Anal_" & ActiveSheet.Name)

Selection.Copy
Sheets.Add
ActiveSheet.Name = strNomFeuille
strNomFeuille = ActiveSheet.Name
Cells(2, 2).Select
ActiveSheet.Paste
Selection.HorizontalAlignment = xlCenter

position = Selection.Rows.Count
position2 = Selection.Columns.Count

Dim p As Integer
Dim q As Integer
For p = 2 To position + 1
    For q = 5 To position2 + 1
        If Cells(p, q) = "A" Then Cells(p, q) = 1
        If Cells(p, q) = "a" Then Cells(p, q) = 1
        If Cells(p, q) = "B" Then Cells(p, q) = 2
        If Cells(p, q) = "b" Then Cells(p, q) = 2
        If Cells(p, q) = "C" Then Cells(p, q) = 3
        If Cells(p, q) = "c" Then Cells(p, q) = 3
        If Cells(p, q) = "D" Then Cells(p, q) = 4
        If Cells(p, q) = "d" Then Cells(p, q) = 4
    
```

```

    If Cells(p, q) = "E" Then Cells(p, q) = 5
    If Cells(p, q) = "e" Then Cells(p, q) = 5
  Next q
Next p

Range(Cells(position + 1, 2), Cells(position + 1, position2 + 1)).Select

' Je veux insérer un hyperlien vers la feuille de départ
Cells(1, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
strNomFeuilleDepart & "!A" & position + 2, TextToDisplay:="Données de départ"

'mise en page haut page
Range(Cells(2, 2), Cells(position, position2 + 1)).Select
mise_en_page

With Selection
Range(Cells(2, 5), Cells(position, position2 + 5)).Select
Selection.Copy
Cells(position + 6, 5).Select
ActiveSheet.Paste

' écrire le mot "Clé" en dessous des données et à côté de la clé
Cells(position + 1, 4).Value = "Clé"
Cells(position + 1, 4).HorizontalAlignment = xlRight

'mise en page données binaires
Range(Cells(2, 4), Cells(position + 1, position2 + 5)).Select
Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
Range(Cells(position + 6, 2), Cells(2 * position + 4, position2 + 1)).Select
mise_en_page

' identifie les numéros des colonnes d'items de chaque catégorie
Dim rngtest As Range
Dim ci As Integer
Dim cf As Integer
Dim ri As Integer
Dim rf As Integer
Dim li As Integer
Dim lf As Integer
Dim intNbItemsCognitifs As Integer
For p = 5 To position2 + 1
  If Cells(position + 1, p).Value <> "" And Cells(position + 1, p).Value <> "=" Then ci = ci + 1
  If Cells(position + 1, p).Value <> "" And Cells(position + 1, p).Value <> "=" Then cf = Cells(position
+ 1, p).Column
  If Cells(position + 1, p).Value = "=" Then ri = ri + 1

```

```

    If Cells(position + 1, p).Value = "=" Then rf = Cells(position + 1, p).Column
    If Cells(position + 1, p).Value = "" Then li = li + 1
    If Cells(position + 1, p).Value = "" Then lf = Cells(position + 1, p).Column
Next p
Dim nl As Integer
Dim nr As Integer
    If cf <> 0 Then ci = cf - ci + 1
    If rf <> 0 Then ri = rf - ri + 1
    If lf <> 0 Then li = lf - li + 1
    intNbItemsCognitifs = cf - ci + 1
    nr = rf - ri + 1
    nl = lf - li + 1

'Corriger les items de mise en rang
Dim rng As Range
Dim n As Integer
Dim m As Integer
Dim maxi As Integer
Dim mini As Integer
Dim reste As Integer
Dim somme As Integer
Dim test As Integer
Dim testr As Boolean
testr = False
    For n = position + 6 To 2 * position + 4
        For m = ri To rf - 1
            For p = m + 1 To rf
                If Cells(n, m) = Cells(n, p) Then testr = True
            Next p
        Next m
        For m = ri To rf
            If testr = True Then Cells(n, m) = ""
        Next m
        testr = False
    Next n

'Corriger les items cognitifs
If ci = 0 Then GoTo flag
    For m = ci To cf
        For n = position + 6 To 2 * position + 4
            If Cells(n, m).Value = Cells(position + 1, m).Value Then Cells(n, m).Value = 1 Else Cells(n, m).Value = 0
        Next n
    Next m
flag:

' Calcul de la moyenne pour chaque question

```

```

Dim f As Integer
Cells(2 * position + 5, 4).Value = "Moyenne"
Cells(2 * position + 6, 4).Value = "Écart-type"
Range(Cells(2 * position + 5, 4), Cells(2 * position + 6, 4)).Select
Selection.HorizontalAlignment = xlRight
For f = 5 To position2 + 1
    Set rngtest = Range(Cells(position + 6, f), Cells(2 * position + 4, f))
    Cells(2 * position + 5, f).Value = Application.Average(rngtest)
    Cells(2 * position + 5, f).Select
    If Cells(position + 1, f) <> "" Then Selection.NumberFormat = "0.0%" _
    Else Selection.NumberFormat = "0.00"
    If Cells(position + 1, f) = "=" Then Selection.NumberFormat = "0.00"
    Cells(2 * position + 6, f).Value = Application.StDev(rngtest)
    Cells(2 * position + 6, f).Select
    If Cells(position + 1, f) <> "" Then Selection.NumberFormat = "0.0%" _
    Else: Selection.NumberFormat = "0.00"
    If Cells(position + 1, f) = "=" Then Selection.NumberFormat = "0.00"
Next f

End With

' Copie des noms et matricules
Range(Cells(2, 2), Cells(position, 4)).Select
Selection.Copy
Cells(position + 6, 2).Select
ActiveSheet.Paste

'Insère le numéro des questions dans la section données binaires
Range(Cells(position + 5, 1), Cells(2 * position + 6, position2 + 5)).Select
Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
Dim c As Integer
For c = 5 To position2 + 1
    Cells(position + 5, c).Value = "Q." & c - 4
Next c

'Intitulé pour moyennes étudiants pour items cognitifs
Cells(2 * position + 9, 5).Value = "Note (%)"
Cells(2 * position + 9, 6).Value = "Note sur " & intNbItemsCognitifs

' Copie des noms et matricules
Range(Cells(2, 2), Cells(position, 4)).Select
Selection.Copy
Cells(2 * position + 10, 2).Select
ActiveSheet.Paste

' Calcul de la note obtenue pour chaque étudiant
If ci = 0 Then GoTo flag2

```

```

For p = position + 6 To 2 * position + 4
Set rngtest = ActiveSheet.Range(Cells(p, ci), Cells(p, cf))
Cells(p + position + 4, 5).Select
Selection.NumberFormat = "0%"
Range(Cells(p + position + 4, 5), Cells(p + position + 4, 6)).Select
Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
Cells(p + position + 4, 5).Value = Application.Average(rngtest)
Cells(p + position + 4, 6).Value = Cells(p + position + 4, 5).Value * intNbItemsCognitifs
Next p

'Mise en page notes individuelles
Range(Cells(2 * position + 10, 2), Cells(3 * position + 8, 6)).Select
mise_en_page

' Calcul de la moyenne de groupe
Cells(3 * position + 9, 4).Value = "Moyenne"
Cells(3 * position + 10, 4).Value = "Écart-type"
Range(Cells(3 * position + 9, 4), Cells(3 * position + 10, 4)).Select
Selection.HorizontalAlignment = xlRight
Set rngtest = Range(Cells(2 * position + 10, 5), Cells(3 * position + 8, 5))
Cells(3 * position + 9, 5).Value = Application.Average(rngtest)
Cells(3 * position + 9, 5).Select
Selection.NumberFormat = "0.0%"
Cells(3 * position + 10, 5).Value = Application.StDev(rngtest)
Cells(3 * position + 10, 5).Select
Selection.NumberFormat = "0.0%"
Cells(3 * position + 9, 6).Value = Cells(3 * position + 9, 5).Value * intNbItemsCognitifs
Cells(3 * position + 9, 6).Select
Selection.NumberFormat = "0.00"
Cells(3 * position + 10, 6).Value = Cells(3 * position + 10, 5).Value * intNbItemsCognitifs
Cells(3 * position + 10, 6).Select
Selection.NumberFormat = "0.00"

' Calcul des quartiles
Dim intQuart As Integer
Set rngtest = ActiveSheet.Range(Cells(2 * position + 10, 5), Cells(3 * position + 8, 5))
For p = 2 * position + 10 To 2 * position + 14
Cells(p, 8).Value = Application.Quartile(rngtest, intQuart)
Cells(p, 8).Select
Selection.NumberFormat = "0%"
intQuart = intQuart + 1
Next p
Cells(2 * position + 10, 9).Value = "Note Minimale"
Cells(2 * position + 11, 9).Value = "Quartile inférieur"
Cells(2 * position + 12, 9).Value = "Quartile moyen"
Cells(2 * position + 13, 9).Value = "Quartile supérieur"
Cells(2 * position + 14, 9).Value = "Note Maximale"

```

```
' Inscrition des quartiles
Set rngtest = ActiveSheet.Range(Cells(2 * position + 10, 5), Cells(3 * position + 8, 5))
For p = 2 * position + 10 To 3 * position + 8
    If Cells(p, 5).Value < Application.Quartile(rngtest, 1) Then Cells(p, 7).Value = "Bas"
    If Cells(p, 5).Value > Application.Quartile(rngtest, 3) Then Cells(p, 7).Value = "Haut"
    If Cells(p, 5).Value <= Application.Quartile(rngtest, 3) And Cells(p, 5).Value >=
Application.Quartile(rngtest, 1) Then Cells(p, 7).Value = ""
Next p
```

```
'mise en page quartiles
Range(Cells(2 * position + 10, 8), Cells(2 * position + 14, 10)).Select
mise_en_page
flag2:
```

```
'Insère le numéro des questions pour histogrammes
Dim strNomPLage As String
```

```
Cells(3 * position + 13, 4).Value = "Vide"
Cells(3 * position + 13, 5).Value = "A"
Cells(3 * position + 13, 6).Value = "B"
Cells(3 * position + 13, 7).Value = "C"
Cells(3 * position + 13, 8).Value = "D"
Cells(3 * position + 13, 9).Value = "E"
Range(Cells(3 * position + 13, 4), Cells(3 * position + 13, 9)).Select
Selection.HorizontalAligment = xlCenter
```

```
'calcul des fréquences
```

```
Dim g As Integer
Dim histo As String
```

```
strNomFeuille = ActiveSheet.Name
g = 1
m = 0
For c = 5 To position2 + 1
Set rngtest = ActiveSheet.Range(Cells(2, c), Cells(position, c))
For p = 1 To 5
Cells(3 * position + 13 + c - 4, 4).Value = Application.CountIf(rngtest, ".")
Cells(3 * position + 13 + c - 4, 4).Select
Selection.HorizontalAligment = xlCenter
Cells(3 * position + 13 + c - 4, p + 4).Value = Application.CountIf(rngtest, p)
Cells(3 * position + 13 + c - 4, p + 4).Select
Selection.HorizontalAligment = xlCenter
Cells(3 * position + 13 + c - 4, 3).Value = "Q." & c - 4
Cells(3 * position + 13 + c - 4, 3).Select
Selection.HorizontalAligment = xlRight
Cells(3 * position + position2 + 10 + c + g, 3).Value = "Q." & c - 4
Cells(3 * position + position2 + 10 + c + g, 3).Select
```

```

Selection.HorizontalAlignment = xlRight
Cells(3 * position + position2 + 11 + c + g, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
"A1", TextToDisplay:="Haut"
Next p
Cells(3 * position + position2 + 7 + c + g, 5) = Application.Average(rngtest)
Cells(3 * position + position2 + 7 + c + g, 5).Select
Selection.NumberFormat = "0.00"
Cells(3 * position + position2 + 7 + c + g, 4).Value = "moyenne"
Cells(3 * position + position2 + 8 + c + g, 5) = Application.StDev(rngtest)
Cells(3 * position + position2 + 8 + c + g, 5).Select
Selection.NumberFormat = "0.00"
Cells(3 * position + position2 + 8 + c + g, 4).Value = "Écart-type"
Cells(3 * position + position2 + 9 + c + g, 5) = Application.Var(rngtest)
Cells(3 * position + position2 + 9 + c + g, 5).Select
Selection.NumberFormat = "0.00"
Cells(3 * position + position2 + 9 + c + g, 4).Value = "variance"
Cells(3 * position + position2 + 10 + c + g, 5) = Application.Median(rngtest)
Cells(3 * position + position2 + 10 + c + g, 5).Select
Selection.NumberFormat = "0.0"
Cells(3 * position + position2 + 10 + c + g, 4).Value = "Médiane"
Cells(3 * position + position2 + 11 + c + g, 5) = Application.Mode(rngtest)
Cells(3 * position + position2 + 11 + c + g, 4).Value = "Mode"
Cells(3 * position + position2 + 12 + c + g, 5) = Application.Kurt(rngtest)
Cells(3 * position + position2 + 12 + c + g, 5).Select
Selection.NumberFormat = "0.00"
Cells(3 * position + position2 + 12 + c + g, 4).Value = "Kurtosis"
Cells(3 * position + position2 + 13 + c + g, 5) = Application.Skew(rngtest)
Cells(3 * position + position2 + 13 + c + g, 5).Select
Selection.NumberFormat = "0.00"
Cells(3 * position + position2 + 13 + c + g, 4).Value = "Asymétrie"

'mise en page
Range(Cells(3 * position + position2 + 7 + c + g, 4), Cells(3 * position + position2 + 13 + c + g,
5)).Select
mise_en_page

' Insertion des histogrammes
Set rng = ActiveSheet.Range(Cells(3 * position + 13 + c - 4, 4), Cells(3 * position + 13 + c - 4, 9))
Dim rng2 As Range
Set rng2 = Range(Cells(3 * position + 13, 4), Cells(3 * position + 13, 9))
Charts.Add
ActiveChart.ChartType = xlColumnClustered
ActiveChart.Location Where:=xlLocationAsObject, Name:= _
strNomFeuille
ActiveChart.SetSourceData Source:=Sheets(strNomFeuille). _
Range(rng.Address), PlotBy:=xlRows

```

```

ActiveChart.SeriesCollection(1).XValues = Sheets(strNomFeuille). _
    Range(rng2.Address)
histo = "graphique " & c - 4 + m
ActiveSheet.ChartObjects(histo).Activate
ActiveChart.Legend.Select
Selection.Delete
With ActiveChart
    .HasTitle = True
    .ChartTitle.Characters.Text = "Q. " & c - 4
    .Axes(xlValue, xlPrimary).HasTitle = True
    .Axes(xlValue, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text = "Fréquence"
End With
ActiveChart.PlotArea.Select
With Selection.Border
    .ColorIndex = 16
    .Weight = xlThin
    .LineStyle = xlContinuous
End With
Selection.Interior.ColorIndex = xlNone
ActiveSheet.ChartObjects(histo).Cut
Cells(3 * position + position2 + 7 + c + g, 6).Select
ActiveSheet.Paste
ActiveWindow.Visible = False
Dim strNomFichier As String
strNomFichier = ActiveWorkbook.Name
Windows(strNomFichier).Activate
Range("G47").Select
    m = m + 1
    g = g + 15
Next c

'mise en page fréquences
Range(Cells(3 * position + 14, 4), Cells(3 * position + 14 + position2 - 4, 9)).Select
mise_en_page

'hyperliens vers données binaires
Dim nom As String
Cells(position + 9, 1).Select
ActiveCell.Value = "Données binaires"
Cells(position + 10, 1).Select
Set rngtest = Cells(position + 10, 1)
nom = "Bin" & strNomFeuille
ActiveWorkbook.Names.Add Name:=nom, RefersToR1C1:=rngtest
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
    "A1", TextToDisplay:="Haut"
Cells(2, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _

```

```
nom, TextToDisplay:="Données binaires"
```

```
'insère des hyperliens vers notes obtenues
```

```
Cells(2 * position + 11, 1).Select
```

```
ActiveCell.Value = "Notes obtenues"
```

```
Cells(2 * position + 12, 1).Select
```

```
Set rngtest = Cells(2 * position + 12, 1)
```

```
nom = "Notes" & strNomFeuille
```

```
ActiveWorkbook.Names.Add Name:=nom, RefersToR1C1:=rngtest
```

```
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _  
"A1", TextToDisplay:="Haut"
```

```
Cells(4, 1).Select
```

```
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _  
nom, TextToDisplay:="Notes obtenues"
```

```
'insère des hyperliens vers les fréquences
```

```
Cells(3 * position + 15, 1).Value = "Fréquences"
```

```
Cells(3 * position + 16, 1).Select
```

```
Set rngtest = Cells(3 * position + 16, 1)
```

```
nom = "Freq" & strNomFeuille
```

```
ActiveWorkbook.Names.Add Name:=nom, RefersToR1C1:=rngtest
```

```
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _  
"A1", TextToDisplay:="Haut"
```

```
If ci = 0 Then Cells(3, 1).Select Else Cells(5, 1).Select
```

```
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _  
nom, TextToDisplay:="Fréquences"
```

```
'insère des hyperliens vers les statistiques
```

```
Cells(3 * position + position2 + 16, 1).Value = "Statistiques"
```

```
Cells(3 * position + position2 + 17, 1).Select
```

```
Set rngtest = Cells(3 * position + position2 + 17, 1)
```

```
nom = "Stat" & strNomFeuille
```

```
ActiveWorkbook.Names.Add Name:=nom, RefersToR1C1:=rngtest
```

```
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _  
"A1", TextToDisplay:="Haut"
```

```
If ci = 0 Then Cells(4, 1).Select Else Cells(6, 1).Select
```

```
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _  
nom, TextToDisplay:="Statistiques"
```

```
' Repositionne le curseur car je commence à être perdu
```

```
Dim OuSuisJe As Integer
```

```
OuSuisJe = 3 * position + 2 * position2 + 6 + g
```

```
' Analyse d'items plus détaillée
```

```
If ci = 0 Then GoTo flag3:
```

```
Dim NbHaut As Integer
```

```
Dim NbBas As Integer
```

```

Dim NbSupCorrect As Integer
Dim NbInfCorrect As Integer
Dim Mx As Single
Dim Ma As Single
Dim rpbis As Single
Dim rvv As Integer
Dim rff As Integer

```

```

Set rngtest = ActiveSheet.Range(Cells(2 * position + 10, 7), Cells(3 * position + 8, 7))
NbHaut = Application.CountIf(rngtest, "Haut")
NbBas = Application.CountIf(rngtest, "Bas")
Cells(OuSuisJe + 4, 3).Value = "fac."
Cells(OuSuisJe + 4, 4).Value = "disc."
Cells(OuSuisJe + 4, 5).Value = "Clé"
Cells(OuSuisJe + 4, 6).Value = "Options"
Cells(OuSuisJe + 4, 7).Value = "Tous"
Cells(OuSuisJe + 4, 8).Value = "Haut"
Cells(OuSuisJe + 4, 9).Value = "Bas"
Cells(OuSuisJe + 4, 10).Value = "Rpbis"
Cells(OuSuisJe + 4, 11).Value = "Rpbis - item"
Cells(OuSuisJe + 4, 12).Value = "Alpha si abs."
Set rng = Range(Cells(OuSuisJe + 4, 3), Cells(OuSuisJe + 4, 12))
rng.Select
    Selection.HorizontalAlignment = xlCenter

```

```
Dim discompte As Single
```

```

For p = 1 To intNbItemsCognitifs
    Cells(OuSuisJe + 2 + 5 * p, 2).Value = "Q. " & ci + p - 5
    Cells(OuSuisJe + 1 + 5 * p, 3).Value = Cells(2 * position + 5, ci + p - 1).Value
    Cells(OuSuisJe + 1 + 5 * p, 3).Select
    Selection.NumberFormat = "0.00"
    For m = 0 To position - 2
        If Cells(2 * position + 10 + m, 7).Value = "Haut" And Cells(position + 6 + m, ci + p - 1).Value _
            = 1 Then NbSupCorrect = NbSupCorrect + 1
        If Cells(2 * position + 10 + m, 7).Value = "Bas" And Cells(position + 6 + m, ci + p - 1).Value _
            = 1 Then NbInfCorrect = NbInfCorrect + 1
    Next m
    If NbHaut > 0 And NbBas > 0 Then Cells(OuSuisJe + 1 + 5 * p, 4).Value = NbSupCorrect / NbHaut -
NbInfCorrect / NbBas _
    Else: Cells(OuSuisJe + 1 + 5 * p, 4).Value = "N/A"
    If NbHaut > 0 And NbBas > 0 Then discompte = discompte + Cells(OuSuisJe + 1 + 5 * p, 4)
    'Est-ce bien la bonne façon de trouver le coeff. de disc. ?
    Cells(OuSuisJe + 1 + 5 * p, 4).Select
    Selection.NumberFormat = "0.00"
    Cells(OuSuisJe + 3 + 5 * p, 4).Value = "(" & "Haut = " & NbSupCorrect & "/" & NbHaut & ")"
    Cells(OuSuisJe + 4 + 5 * p, 4).Value = "(" & "Bas = " & NbInfCorrect & "/" & NbBas & ")"

```

```

NbSupCorrect = 0
NbInfCorrect = 0
Cells(OuSuisJe + 5 * p, 6).Value = "A"
Cells(OuSuisJe + 1 + 5 * p, 6).Value = "B"
Cells(OuSuisJe + 2 + 5 * p, 6).Value = "C"
Cells(OuSuisJe + 3 + 5 * p, 6).Value = "D"
Cells(OuSuisJe + 4 + 5 * p, 6).Value = "E"
If Cells(position + 1, ci + p - 1).Value = 1 Then Cells(OuSuisJe + 5 * p, 5).Value = "*"
If Cells(position + 1, ci + p - 1).Value = 2 Then Cells(OuSuisJe + 1 + 5 * p, 5).Value = "*"
If Cells(position + 1, ci + p - 1).Value = 3 Then Cells(OuSuisJe + 2 + 5 * p, 5).Value = "*"
If Cells(position + 1, ci + p - 1).Value = 4 Then Cells(OuSuisJe + 3 + 5 * p, 5).Value = "*"
If Cells(position + 1, ci + p - 1).Value = 5 Then Cells(OuSuisJe + 4 + 5 * p, 5).Value = "*"
Cells(OuSuisJe + 5 * p, 7).Value = Cells(3 * position + 13 + p + ci - 5, 5).Value / (position - 1)
Cells(OuSuisJe + 1 + 5 * p, 7).Value = Cells(3 * position + 13 + p + ci - 5, 6).Value / (position - 1)
Cells(OuSuisJe + 2 + 5 * p, 7).Value = Cells(3 * position + 13 + p + ci - 5, 7).Value / (position - 1)
Cells(OuSuisJe + 3 + 5 * p, 7).Value = Cells(3 * position + 13 + p + ci - 5, 8).Value / (position - 1)
Cells(OuSuisJe + 4 + 5 * p, 7).Value = Cells(3 * position + 13 + p + ci - 5, 9).Value / (position - 1)
Set rngtest = Range(Cells(OuSuisJe + 5 * p, 7), Cells(OuSuisJe + 4 + 5 * p, 9))
rngtest.Select
Selection.NumberFormat = "0.0%"
Dim NbTampon As Integer
Dim NbTampon1 As Integer
Dim NbTampon2 As Integer
Dim R As Integer
Dim s As Integer
  For s = 1 To 5
    For R = 0 To position - 2
      If Cells(2 * position + 10 + R, 7).Value = "Haut" And Cells(2 + R, ci + p - 1).Value = s Then
NbTampon = NbTampon + 1
      Next R
      If NbHaut <> 0 Then Cells(OuSuisJe - 1 + s + 5 * p, 8).Value = NbTampon / NbHaut Else
Cells(OuSuisJe - 1 + s + 5 * p, 8).Value = 0
      NbTampon = 0
      R = 0
    Next s

    s = 0
    For s = 1 To 5
      For R = 0 To position - 2
        If Cells(2 * position + 10 + R, 7).Value = "Bas" And Cells(2 + R, ci + p - 1).Value = s Then
NbTampon = NbTampon + 1
        Next R
        If NbBas <> 0 Then Cells(OuSuisJe - 1 + s + 5 * p, 9).Value = NbTampon / NbBas Else
Cells(OuSuisJe - 1 + s + 5 * p, 9).Value = 0
        NbTampon = 0
        R = 0
      Next s

```

```

' RPBIS PAR DISTRACTEUR
  For q = 1 To 5
    For m = 0 To position - 2
      If Cells(2 + m, ci + p - 1).Value = q Then NbTampon1 = NbTampon1 + 1
      If Cells(2 + m, ci + p - 1).Value <> q Then NbTampon2 = NbTampon2 + 1
      If Cells(2 + m, ci + p - 1).Value = q Then rvv = rvv + Cells(2 * position + 10 + m, 6)
      If Cells(2 + m, ci + p - 1).Value <> q Then rff = rff + Cells(2 * position + 10 + m, 6)
    Next m
    If NbTampon1 > 0 Then Mx = rvv / NbTampon1
    If NbTampon2 > 0 Then Ma = rff / NbTampon2
    If Cells(3 * position + 10, 6) > 0 Then rpbis = ((Mx - Ma) * (Cells(OuSuisJe - 1 + q + 5 * p, 7) *
(1 - Cells(OuSuisJe - 1 + q + 5 * p, 7))) ^ (1 / 2)) / Cells(3 * position + 10, 6)
    If Cells(3 * position + 10, 6) = 0 Then Cells(OuSuisJe - 1 + q + 5 * p, 10) = "N/A" Else
Cells(OuSuisJe - 1 + q + 5 * p, 10).Value = rpbis
    Cells(OuSuisJe - 1 + q + 5 * p, 10).NumberFormat = "0.00 "
    NbTampon1 = 0
    NbTampon2 = 0
    rvv = 0
    rff = 0
    Mx = 0
    Ma = 0
  Next q

' RPBIS PAR ITEM
  For m = 0 To position - 2
    If Cells(position + 6 + m, ci + p - 1).Value = 1 Then NbTampon1 = NbTampon1 + 1
    If Cells(position + 6 + m, ci + p - 1).Value = 0 Then NbTampon2 = NbTampon2 + 1
    If Cells(position + 6 + m, ci + p - 1).Value = 1 Then rvv = rvv + Cells(2 * position + 10 + m, 6)
    If Cells(position + 6 + m, ci + p - 1).Value = 0 Then rff = rff + Cells(2 * position + 10 + m, 6)
  Next m
  If NbTampon1 > 0 Then Mx = rvv / NbTampon1
  If NbTampon2 > 0 Then Ma = rff / NbTampon2
  If Cells(3 * position + 10, 6) > 0 Then rpbis = ((Mx - Ma) * (Cells(2 * position + 5, ci + p - 1) *
(1 - Cells(2 * position + 5, ci + p - 1))) ^ (1 / 2)) / Cells(3 * position + 10, 6)
  If Cells(3 * position + 10, 6) = 0 Then Cells(OuSuisJe - 1 + 3 + 5 * p, 11) = "N/A" Else
Cells(OuSuisJe - 1 + 3 + 5 * p, 11).Value = rpbis
  Cells(OuSuisJe - 1 + 3 + 5 * p, 11).NumberFormat = "0.00 "
  NbTampon1 = 0
  NbTampon2 = 0
  rvv = 0
  rff = 0

' alpha si absent
Dim varRep As Single
Dim sumvarp As Single
  For m = ci To cf

```

```

    If m <> (ci + p - 1) Then sumvarp = sumvarp + Cells(2 * position + 6, m) ^ 2
Next m
For m = position + 6 To 2 * position + 4
    Cells(m, position2 + 2) = Application.sum(Range(Cells(m, ci), Cells(m, cf))) - Cells(m, ci + p - 1)
Next m
Set rngtest = Range(Cells(position + 6, position2 + 2), Cells(2 * position + 4, position2 + 2))
varRep = Application.Var(rngtest)
If varRep = 0 Then Cells(OuSuisJe - 1 + 3 + 5 * p, 12) = "N/A" Else Cells(OuSuisJe - 1 + 3 + 5 * p,
12) = (intNbItemsCognitifs - 1) / (intNbItemsCognitifs - 2) * (1 - sumvarp / varRep)
If varRep > 0 Then Cells(OuSuisJe - 1 + 3 + 5 * p, 12).NumberFormat = "0.000"
sumvarp = 0
rngtest.Select
Selection.ClearContents

'mise en page analyse items
Range(Cells(OuSuisJe + 5 * p, 3), Cells(OuSuisJe + 4 + 5 * p, 12)).Select
    Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
mise_en_page
Next p

Set rng = Range(Cells(OuSuisJe + 5, 5), Cells(OuSuisJe + 4 + 5 * intNbItemsCognitifs, 5))
rng.Select
Selection.HorizontalAlignment = xlRight

'hyperliens vers
Cells(OuSuisJe + 3 + intNbItemsCognitifs * 2.5, 1).Select
ActiveCell.Value = "Analyse items"
Cells(OuSuisJe + 4 + intNbItemsCognitifs * 2.5, 1).Select
Set rngtest = Cells(OuSuisJe + 4 + intNbItemsCognitifs * 2.5, 1)
nom = "An." & strNomFeuille
ActiveWorkbook.Names.Add Name:=nom, RefersToR1C1:=rngtest
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
    "A1", TextToDisplay:="Haut"
Cells(7, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
    nom, TextToDisplay:="Anal. classique "
flag3:

Dim OuSuisJe2 As Integer
OuSuisJe2 = OuSuisJe + 4 + 5 * intNbItemsCognitifs

' Corrélations globales
For q = 5 To position2 + 1
    For p = 5 To position2 + 1
        Set rngtest = Range(Cells(2, q), Cells(position, q))
        Set rng = Range(Cells(2, p), Cells(position, p))
        Cells(OuSuisJe2 + 4, p - 2).Value = "Q. " & p - 4
    
```

```

Cells(OuSuisJe2 + 4, p - 2).Select
Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
Cells(OuSuisJe2 + q, 2).Value = "Q. " & q - 4
Cells(OuSuisJe2 + q, 2).Select
Selection.HorizontalAlignment = xlRight
Cells(OuSuisJe2 + q, p - 2).Select
If p = q Then Selection.NumberFormat = "0" Else Selection.NumberFormat = "0.000"
If Cells(3 * position + position2 + 10 + p + (p - 5) * 15, 5) > 0 And Cells(3 * position + position2 +
10 + q + (q - 5) * 15, 5) > 0 Then ActiveCell.Value = Application.Correl(rng, rngtest) Else
ActiveCell.Value = "N/A"
    If p = q Then ActiveCell.Value = 1
Next p
Next q

```

'mise en page corrélations

```

Range(Cells(OuSuisJe2 + 5, 3), Cells(OuSuisJe2 + position2 + 1, position2 - 1)).Select
    Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
    mise_en_page

```

'hyperliens

```

Cells(OuSuisJe2 + 6, 1).Select
ActiveCell.Value = "corrélations"
Cells(OuSuisJe2 + 7, 1).Select
Set rngtest = Cells(OuSuisJe2 + 7, 1)
nom = "Cor." & strNomFeuille
ActiveWorkbook.Names.Add Name:=nom, RefersToR1C1:=rngtest
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
    "A1", TextToDisplay:="Haut"
If ci = 0 Then Cells(5, 1).Select Else Cells(8, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
    nom, TextToDisplay:="corrélations"

```

Dim OuSuisJe3 As Integer

OuSuisJe3 = OuSuisJe2 + position2

' Corrélations binaires-globales

```

For q = 5 To position2 + 1
    For p = 5 To position2 + 1
        Set rngtest = Range(Cells(position + 6, q), Cells(2 * position + 4, q))
        Set rng = Range(Cells(position + 6, p), Cells(2 * position + 4, p))
        Cells(OuSuisJe3 + 4, p - 2).Value = "Q. " & p - 4
        Cells(OuSuisJe3 + 4, p - 2).Select
        Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
        Cells(OuSuisJe3 + q, 2).Value = "Q. " & q - 4
        Cells(OuSuisJe3 + q, 2).Select
        Selection.HorizontalAlignment = xlRight
        Cells(OuSuisJe3 + q, p - 2).Select
    
```

```

    If p = q Then Selection.NumberFormat = "0" Else Selection.NumberFormat = "0.000"
    If Cells(2 * position + 6, p) > 0 And Cells(2 * position + 6, q) > 0 Then ActiveCell.Value =
Application.Correl(rng, rngtest) Else ActiveCell.Value = "N/A"
    If p = q Then ActiveCell.Value = 1
  Next p
Next q

```

```

'mise en page corrélations binaires globales
  Range(Cells(OuSuisJe3 + 5, 3), Cells(OuSuisJe3 + 1 + position2, position2 - 1)).Select
  Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
  mise_en_page

```

```

'hyperliens corrélations binaires
Cells(OuSuisJe3 + 6, 1).Select
ActiveCell.Value = "Corr. bin.-glob."
Cells(OuSuisJe3 + 7, 1).Select
Set rngtest = Cells(OuSuisJe3 + 7, 1)
nom = "Corbin." & strNomFeuille
ActiveWorkbook.Names.Add Name:=nom, RefersToR1C1:=rngtest
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
  "A1", TextToDisplay:="Haut"
If ci = 0 Then Cells(6, 1).Select Else Cells(9, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
  nom, TextToDisplay:="Corr. bin.-glob."

```

```

Dim OuSuisJe4 As Integer
OuSuisJe4 = OuSuisJe3 + position2

```

```

' Sig. statistiques de corrélations globales v. p. 293 Howell
For q = 5 To position2 + 1
  For p = 5 To position2 + 1
    Cells(OuSuisJe4 + 4, p - 2).Value = "Q. " & p - 4
    Cells(OuSuisJe4 + 4, p - 2).Select
    Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
    Cells(OuSuisJe4 + q, 2).Value = "Q. " & q - 4
    Cells(OuSuisJe4 + q, 2).Select
    Selection.HorizontalAlignment = xlRight
    Cells(OuSuisJe4 + q, p - 2).Select
    If p <> q And Cells(OuSuisJe2 + q, p - 2) < 1 And Cells(OuSuisJe2 + q, p - 2) > -1 And
Cells(OuSuisJe2 + q, p - 2) <> "N/A" Then ActiveCell.Value = Application.TDist(Abs(Cells(OuSuisJe2 +
q, p - 2)) * Sqr(position - 3) / Sqr(1 - Cells(OuSuisJe2 + q, p - 2) ^ 2), position - 3, 2) _
      Else ActiveCell.Value = "N/A"
    If p <> q And Cells(OuSuisJe2 + q, p - 2) = 1 Then ActiveCell.Value = 0
    If p <> q And Cells(OuSuisJe2 + q, p - 2) = -1 Then ActiveCell.Value = 0
    If p <> q And Cells(OuSuisJe2 + q, p - 2) = 1 Then colore
    If p <> q And Cells(OuSuisJe2 + q, p - 2) = -1 Then colore
    If p = q Then ActiveCell.Value = ""
  Next p
Next q

```

```

ActiveCell.NumberFormat = "0.000"
If ActiveCell.Value < 0.05 And ActiveCell.Value <> "" Then colore

Next p
Next q

'mise en page sig. corrélations
Range(Cells(OuSuisJe4 + 5, 3), Cells(OuSuisJe4 + position2 + 1, position2 - 1)).Select
Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
mise_en_page

'hyperliens
Cells(OuSuisJe4 + 6, 1).Select
ActiveCell.Value = "Sig. Corr."
Cells(OuSuisJe4 + 7, 1).Select
Set rngtest = Cells(OuSuisJe4 + 7, 1)
nom = "Corsig." & strNomFeuille
ActiveWorkbook.Names.Add Name:=nom, RefersToR1C1:=rngtest
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
    "A1", TextToDisplay:="Haut"
If ci = 0 Then Cells(7, 1).Select Else Cells(10, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
    nom, TextToDisplay:="Sig.Corr."

' Tant qu'à rêtre perdu
Dim OuSuisJe5 As Integer
OuSuisJe5 = OuSuisJe4 + position2

' Sig. statistiques de corrélations binaires-globales

For q = 5 To position2 + 1
    For p = 5 To position2 + 1
        Set rng = Cells(OuSuisJe3 + q, p - 2)
        Cells(OuSuisJe5 + 4, p - 2).Value = "Q. " & p - 4
        Cells(OuSuisJe5 + 4, p - 2).Select
        Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
        Cells(OuSuisJe5 + q, 2).Value = "Q. " & q - 4
        Cells(OuSuisJe5 + q, 2).Select
        Selection.HorizontalAlignment = xlRight
        Cells(OuSuisJe5 + q, p - 2).Select
        If p <> q And Cells(OuSuisJe3 + q, p - 2) < 1 And Cells(OuSuisJe3 + q, p - 2) > -1 And
Cells(OuSuisJe3 + q, p - 2) <> "N/A" Then ActiveCell.Value = Application.TDist(Abs(Cells(OuSuisJe3 +
q, p - 2)) * Sqr(position - 3) / Sqr(1 - Cells(OuSuisJe3 + q, p - 2) ^ 2), position - 3, 2) _
            Else ActiveCell.Value = "N/A"
        If p <> q And Cells(OuSuisJe3 + q, p - 2) = 1 Then ActiveCell.Value = 0
        If p <> q And Cells(OuSuisJe3 + q, p - 2) = -1 Then ActiveCell.Value = 0
        If p <> q And Cells(OuSuisJe3 + q, p - 2) = 1 Then colore
    
```

```

    If p = q Then ActiveCell.Value = ""
    ActiveCell.NumberFormat = "0.000"
    If ActiveCell.Value < 0.05 And ActiveCell.Value <> 0 Then colore

Next p
Next q

'mise en page sig. corrélations
    Range(Cells(OuSuisJe5 + 5, 3), Cells(OuSuisJe5 + position2 + 1, position2 - 1)).Select
        Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
    mise_en_page

'hyperliens corr. binaires-globales
Cells(OuSuisJe5 + 6, 1).Select
ActiveCell.Value = "Sig. Corr. bg"
Cells(OuSuisJe5 + 7, 1).Select
Set rngtest = Cells(OuSuisJe5 + 7, 1)
nom = "Corbsig." & strNomFeuille
ActiveWorkbook.Names.Add Name:=nom, RefersToR1C1:=rngtest
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
    "A1", TextToDisplay:="Haut"
If ci = 0 Then Cells(8, 1).Select Else Cells(11, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
    nom, TextToDisplay:="Sig. Corr. bg"

'matrice de cohérence
Dim OuSuisJe6 As Integer
Dim q3 As Integer
OuSuisJe6 = OuSuisJe5 + position2

For q = 5 To intNbItemsCognitifs + 4
    For p = 5 To intNbItemsCognitifs + 4
        'Set rngtest = Range(Cells(2, q), Cells(position, q))
        'Set rng = Range(Cells(2, p), Cells(position, p))
        'Set rngtest = Range(Cells(position + 6, q), Cells(2 * position + 4, q))
        'Set rng = Range(Cells(position + 6, p), Cells(2 * position + 4, p))
        Cells(OuSuisJe6 + 4, p - 2).Value = "Q. " & p - 4
        Cells(OuSuisJe6 + 4, p - 2).Select
        Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
        Cells(OuSuisJe6 + q, 2).Value = "Q. " & q - 4
        Cells(OuSuisJe6 + q, 2).Select
        Selection.HorizontalAlignment = xlRight
        NbTampon = 0
        NbTampon2 = 0
        For q3 = position + 6 To 2 * position + 4
            If Cells(q3, q) = 1 And Cells(q3, p) = 1 Then NbTampon = NbTampon + 1
            If Cells(q3, q) = 1 And Cells(q3, p) = 0 Then NbTampon2 = NbTampon2 + 1
        
```

```

    Next q3
    Cells(OuSuisJe6 + q, p - 2).Select
    If p = q Then Selection.NumberFormat = "0" Else Selection.NumberFormat = "0.000"
    If NbTampon > 0 Then ActiveCell.Value = NbTampon / (NbTampon + NbTampon2) Else
ActiveCell.Value = "N/A"
    If p = q Then ActiveCell.Value = " "
    If NbTampon = 0 Then GoTo flag66
    If NbTampon / (NbTampon + NbTampon2) > 0.5 And p <> q Then
ActiveCell.Interior.ColorIndex = 33
    If NbTampon / (NbTampon + NbTampon2) > 0.75 And p <> q Then
ActiveCell.Interior.ColorIndex = 38
    If NbTampon / (NbTampon + NbTampon2) > 0.9 And p <> q Then
ActiveCell.Interior.ColorIndex = 6
flag66:
    Next p
Next q

'mise en page cohérence
    Range(Cells(OuSuisJe6 + 5, 3), Cells(OuSuisJe6 + intNbItemsCognitifs + 4, intNbItemsCognitifs +
2)).Select
    Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
    mise_en_page
    Cells(OuSuisJe6 + 4, intNbItemsCognitifs + 4) = "Légende"
    Cells(OuSuisJe6 + 5, intNbItemsCognitifs + 4) = ">50%"
    Cells(OuSuisJe6 + 5, intNbItemsCognitifs + 4).Interior.ColorIndex = 33
    Cells(OuSuisJe6 + 6, intNbItemsCognitifs + 4) = ">75%"
    Cells(OuSuisJe6 + 6, intNbItemsCognitifs + 4).Interior.ColorIndex = 38
    Cells(OuSuisJe6 + 7, intNbItemsCognitifs + 4) = ">90%"
    Cells(OuSuisJe6 + 7, intNbItemsCognitifs + 4).Interior.ColorIndex = 6
    Cells(OuSuisJe6 + 7, intNbItemsCognitifs + 4).HorizontalAlignment = xlLeft

'hyperliens
Cells(OuSuisJe6 + 6, 1).Select
ActiveCell.Value = "cohérence"
Cells(OuSuisJe6 + 7, 1).Select
Set rngtest = Cells(OuSuisJe6 + 7, 1)
nom = "Cor." & strNomFeuille
ActiveWorkbook.Names.Add Name:=nom, RefersToR1C1:=rngtest
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
    "A1", TextToDisplay:="Haut"
If ci = 0 Then Cells(5, 1).Select Else Cells(8, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
    nom, TextToDisplay:="cohérence"

'matrice de anti-cohérence
Dim OuSuisJe7 As Integer
OuSuisJe7 = OuSuisJe6 + position2

```

```

For q = 5 To intNbItemsCognitifs + 4
  For p = 5 To intNbItemsCognitifs + 4
    'Set rngtest = Range(Cells(2, q), Cells(position, q))
    'Set rng = Range(Cells(2, p), Cells(position, p))
    'Set rngtest = Range(Cells(position + 6, q), Cells(2 * position + 4, q))
    'Set rng = Range(Cells(position + 6, p), Cells(2 * position + 4, p))
    Cells(OuSuisJe7 + 4, p - 2).Value = "Q. " & p - 4
    Cells(OuSuisJe7 + 4, p - 2).Select
    Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
    Cells(OuSuisJe7 + q, 2).Value = "Q. " & q - 4
    Cells(OuSuisJe7 + q, 2).Select
    Selection.HorizontalAlignment = xlRight
    NbTampon = 0
    NbTampon2 = 0
    For q3 = position + 6 To 2 * position + 4
      If Cells(q3, q) = 0 And Cells(q3, p) = 1 Then NbTampon = NbTampon + 1
      If Cells(q3, q) = 0 And Cells(q3, p) = 0 Then NbTampon2 = NbTampon2 + 1
    Next q3
    Cells(OuSuisJe7 + q, p - 2).Select
    If p = q Then Selection.NumberFormat = "0" Else Selection.NumberFormat = "0.000"
    If (NbTampon + NbTampon2) > 0 Then ActiveCell.Value = NbTampon / (NbTampon +
NbTampon2) Else ActiveCell.Value = "N/A"
    If p = q Then ActiveCell.Value = " "
    If NbTampon = 0 Then GoTo flag67
    If NbTampon / (NbTampon + NbTampon2) > 0.5 And p <> q Then
ActiveCell.Interior.ColorIndex = 33
    If NbTampon / (NbTampon + NbTampon2) > 0.75 And p <> q Then
ActiveCell.Interior.ColorIndex = 38
    If NbTampon / (NbTampon + NbTampon2) > 0.9 And p <> q Then
ActiveCell.Interior.ColorIndex = 6
flag67:
  Next p
Next q

```

'mise en page anti-cohérence

```

Range(Cells(OuSuisJe7 + 5, 3), Cells(OuSuisJe7 + intNbItemsCognitifs + 4, intNbItemsCognitifs +
2)).Select
  Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
mise_en_page
Cells(OuSuisJe7 + 4, intNbItemsCognitifs + 4) = "Légende"
Cells(OuSuisJe7 + 5, intNbItemsCognitifs + 4) = ">50%"
Cells(OuSuisJe7 + 5, intNbItemsCognitifs + 4).Interior.ColorIndex = 33
Cells(OuSuisJe7 + 6, intNbItemsCognitifs + 4) = ">75%"
Cells(OuSuisJe7 + 6, intNbItemsCognitifs + 4).Interior.ColorIndex = 38
Cells(OuSuisJe7 + 7, intNbItemsCognitifs + 4) = ">90%"
Cells(OuSuisJe7 + 7, intNbItemsCognitifs + 4).Interior.ColorIndex = 6
Cells(OuSuisJe7 + 7, intNbItemsCognitifs + 4).HorizontalAlignment = xlLeft

```

```

'hyperliens
Cells(OuSuisJe7 + 6, 1).Select
ActiveCell.Value = "anti-cohérence"
Cells(OuSuisJe7 + 7, 1).Select
Set rngtest = Cells(OuSuisJe6 + 7, 1)
nom = "Cor." & strNomFeuille
ActiveWorkbook.Names.Add Name:=nom, RefersToR1C1:=rngtest
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
    "A1", TextToDisplay:="Haut"

'matrice de discrimination spécifique
Dim OuSuisJe8 As Integer
OuSuisJe8 = OuSuisJe7 + position2
Dim NbTampon3 As Integer
Dim NbTampon4 As Integer

For q = 5 To intNbItemsCognitifs + 4
    For p = 5 To intNbItemsCognitifs + 4
        'Set rngtest = Range(Cells(2, q), Cells(position, q))
        'Set rng = Range(Cells(2, p), Cells(position, p))
        'Set rngtest = Range(Cells(position + 6, q), Cells(2 * position + 4, q))
        'Set rng = Range(Cells(position + 6, p), Cells(2 * position + 4, p))
        Cells(OuSuisJe8 + 4, p - 2).Value = "Q. " & p - 4
        Cells(OuSuisJe8 + 4, p - 2).Select
        Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
        Cells(OuSuisJe8 + q, 2).Value = "Q. " & q - 4
        Cells(OuSuisJe8 + q, 2).Select
        Selection.HorizontalAlignment = xlRight
        NbTampon = 0
        NbTampon2 = 0
        NbTampon3 = 0
        NbTampon4 = 0
        For q3 = position + 6 To 2 * position + 4
            If Cells(q3, q) = 1 And Cells(q3, p) = 1 Then NbTampon = NbTampon + 1
            If Cells(q3, q) = 1 And Cells(q3, p) = 0 Then NbTampon2 = NbTampon2 + 1
            If Cells(q3, q) = 0 And Cells(q3, p) = 1 Then NbTampon3 = NbTampon3 + 1
            If Cells(q3, q) = 0 And Cells(q3, p) = 0 Then NbTampon4 = NbTampon4 + 1
        Next q3
        Cells(OuSuisJe8 + q, p - 2).Select
        If p = q Then Selection.NumberFormat = "0" Else Selection.NumberFormat = "0.000"
        If (NbTampon + NbTampon2) > 0 And (NbTampon3 + NbTampon4) > 0 Then ActiveCell.Value =
((NbTampon / (NbTampon + NbTampon2)) - (NbTampon3 / (NbTampon3 + NbTampon4))) Else
ActiveCell.Value = "N/A"
        If p = q Then ActiveCell.Value = " "
        If p = q Then GoTo flag68
        If ActiveCell.Value = "N/A" Then GoTo flag68
        If ActiveCell.Value > 0.3 Then ActiveCell.Interior.ColorIndex = 34

```

```

    If ActiveCell.Value > 0.5 Then ActiveCell.Interior.ColorIndex = 33
    If ActiveCell.Value > 0.75 Then ActiveCell.Interior.ColorIndex = 38
    If ActiveCell.Value > 0.9 Then ActiveCell.Interior.ColorIndex = 6
    If ActiveCell.Value < -0.1 Then ActiveCell.Interior.ColorIndex = 43
flag68:
    Next p
Next q

'mise en page discrimination spécifique
    Range(Cells(OuSuisJe8 + 5, 3), Cells(OuSuisJe8 + intNbItemsCognitifs + 4, intNbItemsCognitifs +
2)).Select
        Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
    mise_en_page
    Cells(OuSuisJe8 + 4, intNbItemsCognitifs + 4) = "Légende"
    Cells(OuSuisJe8 + 5, intNbItemsCognitifs + 4) = ">30%"
    Cells(OuSuisJe8 + 5, intNbItemsCognitifs + 4).Interior.ColorIndex = 34
    Cells(OuSuisJe8 + 6, intNbItemsCognitifs + 4) = ">50%"
    Cells(OuSuisJe8 + 6, intNbItemsCognitifs + 4).Interior.ColorIndex = 33
    Cells(OuSuisJe8 + 7, intNbItemsCognitifs + 4) = ">75%"
    Cells(OuSuisJe8 + 7, intNbItemsCognitifs + 4).Interior.ColorIndex = 38
    Cells(OuSuisJe8 + 8, intNbItemsCognitifs + 4) = ">90"
    Cells(OuSuisJe8 + 8, intNbItemsCognitifs + 4).Interior.ColorIndex = 6
    Cells(OuSuisJe8 + 9, intNbItemsCognitifs + 4) = "<-10%"
    Cells(OuSuisJe8 + 9, intNbItemsCognitifs + 4).Interior.ColorIndex = 43

'hyperliens
'Cells(OuSuisJe8 + 6, 1).Select
'ActiveCell.Value = "disc. spécifique"
'Cells(OuSuisJe8 + 7, 1).Select
'Set rngtest = Cells(OuSuisJe8 + 7, 1)
'nom = "Cor." & strNomFeuille
'ActiveWorkbook.Names.Add Name:=nom, RefersToR1C1:=rngtest
'ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
'    "A1", TextToDisplay:="Haut"

Dim OuSuisJe9 As Integer
'Dim OuSuisJe8 As Integer
OuSuisJe9 = OuSuisJe8 + position2

' KR20 et KR21 et alpha de Cronbach
If ci > 0 Then
    Cells(OuSuisJe9 + 6, 3).Value = "KR20"
    Cells(OuSuisJe9 + 7, 3).Value = "KR21"
    Cells(OuSuisJe9 + 8, 3).Value = "ESM %"
    Cells(OuSuisJe9 + 9, 3).Value = "ESM abs."
    Cells(OuSuisJe9 + 10, 3).Value = "Disc. moy."
    Cells(OuSuisJe9 + 8, 2).Value = "Cognitifs"

```

End If

Dim KR20 As Single

Dim KR21 As Single

Dim alpha As Single

Dim pq As Single

Dim sem As Single

Dim semnot As Single

If ci = 0 Then GoTo flag4

For p = ci To cf

 pq = pq + Cells(2 * position + 6, p) ^ 2

Next p

Set rng = Range(Cells(position + 6, ci), Cells(2 * position + 4, cf))

If (Cells(3 * position + 10, 6)) > 0 Then KR20 = (intNbItemsCognitifs) / (intNbItemsCognitifs - 1) * (1 - pq / (Cells(3 * position + 10, 6)) ^ 2)

If (Cells(3 * position + 10, 6)) = 0 Then Cells(OuSuisJe9 + 6, 4) = "N/A" Else Cells(OuSuisJe9 + 6, 4).Value = KR20

Cells(OuSuisJe9 + 6, 4).NumberFormat = "0.000"

Cells(OuSuisJe9 + 7, 4).NumberFormat = "0.000"

If (Cells(3 * position + 10, 6)) > 0 Then KR21 = ((intNbItemsCognitifs) / (intNbItemsCognitifs - 1)) * (1 - (Cells(3 * position + 9, 6) * (intNbItemsCognitifs - Cells(3 * position + 9, 6))) / ((intNbItemsCognitifs - 1) * Cells(3 * position + 10, 6) ^ 2))

If (Cells(3 * position + 10, 6)) = 0 Then Cells(OuSuisJe9 + 7, 4) = "N/A" Else Cells(OuSuisJe9 + 7, 4).Value = KR21

If KR20 > 1 Then GoTo flag23

sem = Cells(3 * position + 10, 5) * (1 - KR20) ^ (1 / 2)

Cells(OuSuisJe9 + 8, 4).Value = sem

Cells(OuSuisJe9 + 8, 4).NumberFormat = "0.0%"

semnot = Cells(3 * position + 10, 6) * (1 - KR20) ^ (1 / 2)

Cells(OuSuisJe9 + 9, 4).Value = semnot

Cells(OuSuisJe9 + 9, 4).NumberFormat = "0.000"

flag23:

Cells(OuSuisJe9 + 10, 4).Value = disccompte / intNbItemsCognitifs

Cells(OuSuisJe9 + 10, 4).NumberFormat = "0.000"

 'mise en page fiabilité cognitifs

 Range(Cells(OuSuisJe9 + 6, 2), Cells(OuSuisJe9 + 10, 4)).Select

 Selection.HorizontalAlignment = xlCenter

 mise_en_page

flag4:

' Coefficient de concordance de Kendall (W)

If ri = 0 Then GoTo flag8

If ci > 0 Then

 Cells(OuSuisJe9 + 12, 3).Value = "W de Kendall"

 Cells(OuSuisJe9 + 13, 3).Value = "prob.chideux"

 Cells(OuSuisJe9 + 13, 4).NumberFormat = "0.000"

```

Cells(OuSuisJe9 + 12, 2).Value = "Mise en rang"
Else
Cells(OuSuisJe9 + 6, 3).Value = "W de Kendall"
Cells(OuSuisJe9 + 7, 3).Value = "prob.chideux"
Cells(OuSuisJe9 + 7, 4).NumberFormat = "0.000"
Cells(OuSuisJe9 + 6, 2).Value = "Mise en rang"
End If
Dim tot As Integer
Dim totcar As Single
Dim w As Single

n = 0
For q = ri To rf
tot = 0
Set rng = Range(Cells(position + 6, q), Cells(2 * position + 4, q))
tot = Application.sum(rng)
n = n + 1
totcar = totcar + tot ^ 2
Next q
w = 12 * totcar / ((position - 1) ^ 2 * n * (n ^ 2 - 1)) - 3 * (n + 1) / (n - 1)

If ci > 0 Then Cells(OuSuisJe9 + 12, 4).Select Else Cells(OuSuisJe9 + 6, 4).Select
ActiveCell.NumberFormat = "0.000"
If ci > 0 Then Cells(OuSuisJe9 + 12, 4).Value = w Else Cells(OuSuisJe9 + 6, 4).Value = w
If ci > 0 Then Cells(OuSuisJe9 + 13, 4).Select Else Cells(OuSuisJe9 + 7, 4).Select
ActiveCell.Value = Application.ChiDist((position - 1) * (n - 1) * Abs(w), n - 1)

'mise en page Mise en rang
If ci > 0 Then Range(Cells(OuSuisJe9 + 12, 2), Cells(OuSuisJe9 + 13, 4)).Select Else
Range(Cells(OuSuisJe9 + 6, 2), Cells(OuSuisJe9 + 7, 4)).Select
Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
mise_en_page
flag8:
Dim OuSuisJe10 As Integer
If ci > 0 Then OuSuisJe10 = OuSuisJe9 + 15 Else OuSuisJe10 = OuSuisJe9 + 12

' Likert
'If li = 0 Then GoTo flag9
'Cells(OuSuisJe10 + nl / 2, 3).Value = "alpha"
'Cells(OuSuisJe10 + nl / 2, 2).Value = "Likert"
'sumvarp = 0
'For p = li To lf
' sumvarp = sumvarp + Cells(2 * position + 6, p) ^ 2
'Next p
'For p = position + 6 To 2 * position + 4
' Cells(p, position2 + 2) = Application.sum(Range(Cells(p, li), Cells(p, lf)))
'Next p

```

```

'Set rngtest = Range(Cells(position + 6, position2 + 2), Cells(2 * position + 4, position2 + 2))
'varRep = Application.Var(rngtest)
'If varRep = 0 Then Cells(OuSuisJe10 + nl / 2, 4) = "N/A" Else Cells(OuSuisJe10 + nl / 2, 4) = (lf - li + 1)
/ (lf - li) * (1 - sumvarp / varRep)
'If varRep > 0 Then Cells(OuSuisJe10 + nl / 2, 4).NumberFormat = "0.000"
'sumvarp = 0
'rngtest.Select
'Selection.Delete
'
'   'mise en page Likert
'   Range(Cells(OuSuisJe10 + nl / 2, 2), Cells(OuSuisJe10 + nl / 2, 4)).Select
'       Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
'       mise_en_page
'
" Analyse d'items Likert plus détaillée
'Cells(OuSuisJe10, 6).Value = "Alpha si abs."
'Set rng = Range(Cells(OuSuisJe10 + 3, 3), Cells(OuSuisJe10 + 3, lf - li + 4))
'rng.Select
'   Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
'
'For p = 1 To lf - li + 1
'   Cells(OuSuisJe10 + p, 5).Value = "Q. " & li + p - 5
'
'   ' alpha si absent
'
'   For m = li To lf
'       If m <> (li + p - 1) Then sumvarp = sumvarp + Cells(2 * position + 6, m) ^ 2
'   Next m
'   For m = position + 6 To 2 * position + 4
'       Cells(m, position2 + 2) = Application.sum(Range(Cells(m, li), Cells(m, lf))) - Cells(m, li + p - 1)
'   Next m
'   Set rngtest = Range(Cells(position + 6, position2 + 2), Cells(2 * position + 4, position2 + 2))
'   varRep = Application.Var(rngtest)
'   If varRep = 0 Then Cells(OuSuisJe10 + p, 6) = "N/A" Else Cells(OuSuisJe10 + p, 6) = (lf - li) / (lf - li -
1) * (1 - sumvarp / varRep)
'   If varRep > 0 Then Cells(OuSuisJe10 + p, 6).NumberFormat = "0.000"
'   sumvarp = 0
'   rngtest.Select
'   Selection.Delete
'       'mise en page
'       Range(Cells(OuSuisJe10 + p, 5), Cells(OuSuisJe10 + p, 6)).Select
'           Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
'           mise_en_page
'Next p
'
'flag9:

```

```

,
" Détection de coïncidences
" If ci = 0 Then GoTo flag10
  Dim OuSuisJe11 As Integer
' Dim q2 As Integer
' NbTampon = 0
' NbTampon1 = 0
' OuSuisJe11 = OuSuisJe10 + 8 + lf - li
' For q = 2 To position - 1
'   For q2 = q + 1 To position
'     For p = ci To cf
'       If Cells(q, p) = Cells(q2, p) Then NbTampon = NbTampon + 1
'     Next p
'     If NbTampon > intNbItemsCognitifs * 0.8 Then Cells(OuSuisJe11 + NbTampon1, 2) = Cells(q, 2)
'     If NbTampon > intNbItemsCognitifs * 0.8 Then Cells(OuSuisJe11 + NbTampon1, 3) = Cells(q, 3)
'     If NbTampon > intNbItemsCognitifs * 0.8 Then Cells(OuSuisJe11 + NbTampon1, 4) = Cells(q, 4)
'     If NbTampon > intNbItemsCognitifs * 0.8 Then Cells(OuSuisJe11 + NbTampon1 + 1, 2) = Cells(q2,
2)
'     If NbTampon > intNbItemsCognitifs * 0.8 Then Cells(OuSuisJe11 + NbTampon1 + 1, 3) = Cells(q2,
3)
'     If NbTampon > intNbItemsCognitifs * 0.8 Then Cells(OuSuisJe11 + NbTampon1 + 1, 4) = Cells(q2,
4)
'     If NbTampon > intNbItemsCognitifs * 0.8 Then Cells(OuSuisJe11 + NbTampon1 + 2, 4) =
NbTampon / intNbItemsCognitifs
'     If NbTampon > intNbItemsCognitifs * 0.8 Then Cells(OuSuisJe11 + NbTampon1 + 2, 2) = "Taux de
coïncidences"
'     If NbTampon > intNbItemsCognitifs * 0.8 Then Cells(OuSuisJe11 + NbTampon1 + 2,
4).NumberFormat = "00%"
'     If NbTampon > intNbItemsCognitifs * 0.8 Then Range(Cells(OuSuisJe11 + NbTampon1, 2),
Cells(OuSuisJe11 + NbTampon1 + 2, 4)).Select
'     If NbTampon > intNbItemsCognitifs * 0.8 Then Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
'     If NbTampon > intNbItemsCognitifs * 0.8 Then mise_en_page
'       If NbTampon > intNbItemsCognitifs * 0.8 Then Cells(OuSuisJe11 + NbTampon1 + 2,
2).HorizontalAlignment = xlLeft
'     If NbTampon > intNbItemsCognitifs * 0.8 Then NbTampon1 = NbTampon1 + 3
'     NbTampon = 0
'     Next q2
' Next q
' If NbTampon1 = 0 Then Cells(OuSuisJe11 + NbTampon1 + 1, 2) = "Il n'y a aucune coïncidences
supérieures à 80%"
'flag10:

'hyperliens ilité et coïncidences et index
If ci > 0 Then Cells(OuSuisJe11 + 1, 1) = "Coïncidences"
If ci > 0 Then Cells(OuSuisJe11 + 2, 1).Select
If ci > 0 Then Set rngtest = Cells(OuSuisJe11 + 2, 1)
If ci > 0 Then nom = "coinc." & strNomFeuille
If ci > 0 Then ActiveWorkbook.Names.Add Name:=nom, RefersToR1C1:=rngtest

```

```

If ci > 0 Then ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address="", SubAddress:= _
    "A1", TextToDisplay:="Haut"
If ci = 0 Then Cells(10, 1).Select Else Cells(14, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address="", SubAddress:= _
    nom, TextToDisplay:="Coincidences"
If ci > 0 Then Cells(12, 1).Select Else Cells(15, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address="", SubAddress:= _
    "" & "index" & "" & "!A1", TextToDisplay:="Index"
Cells(OuSuisJe9 + 6, 1).Select
ActiveCell.Value = "Fiabilité"
Cells(OuSuisJe9 + 7, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address="", SubAddress:= _
    "A1", TextToDisplay:="Haut"
Set rngtest = Cells(OuSuisJe9 + 7, 1)
nom = "fiab." & strNomFeuille
ActiveWorkbook.Names.Add Name:=nom, RefersToR1C1:=rngtest
If ci = 0 Then Cells(9, 1).Select Else Cells(13, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address="", SubAddress:= _
    nom, TextToDisplay:="Fiabilité"

Columns("A:A").Select
Selection.Columns.AutoFit
Cells(1, 1).Select

' Je veux insérer un hyperlien vers la feuille d'analyse et vers l'index
Sheets(strNomFeuilleDepart).Select
Cells(position + 2, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address="", SubAddress:= _
    "" & strNomFeuille & "" & "!A1", TextToDisplay:="Analyses"
Cells(position + 4, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address="", SubAddress:= _
    "" & "index" & "" & "!A1", TextToDisplay:="Index"
Sheets(strNomFeuille).Select

'Insère le numéro des items
For c = 5 To position2 + 1
Cells(1, c).Value = "Q." & c - 4
Cells(1, c).Select
Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
Next c

Cells(1, 1).Select

' Insertion de l'histogramme des notes obtenues
If ci = 0 Then GoTo flag5
Dim histoNomb As Integer
Dim div As Integer

```

```

div = position / 10
If div = 0 Then div = 1

Range(Cells(2 * position + 7, 1), Cells(2 * position + 27, 1)).Select
Selection.EntireRow.Insert
For p = 1 To 10
  For q = 1 To position - 1
    If Cells(2 * position + 30 + q, 5) <= p / 10 And Cells(2 * position + 30 + q, 5) > (p - 1) / 10 Then
histoNomb = histoNomb + 1
    If p = 1 And Cells(2 * position + 30 + q, 5) = 0 Then histoNomb = histoNomb + 1
  Next q
  Cells(2 * position + 26, p + 2) = histoNomb
  Cells(2 * position + 26, p + 2).NumberFormat = "0"
  Cells(2 * position + 26, p + 2).HorizontalAlignment = xlCenter
  histoNomb = 0

  Cells(2 * position + 27, p + 2).NumberFormat = "@"
  Cells(2 * position + 27, p + 2).HorizontalAlignment = xlCenter
  If p = 1 Then Cells(2 * position + 27, p + 2) = (p - 1) * 10 & "-" & p * 10 Else Cells(2 * position + 27,
p + 2) = (p - 1) * 10 + 1 & "-" & p * 10
  Range(Cells(2 * position + 26, p + 2), Cells(2 * position + 27, p + 2)).Select
  mise_en_page
Next p
Cells(2 * position + 26, 2).Value = "Fréquence"
Cells(2 * position + 27, 2).Value = "Décade"
Set rng = Range(Cells(2 * position + 26, 3), Cells(2 * position + 26, 12))
Set rng2 = Range(Cells(2 * position + 27, 3), Cells(2 * position + 27, 12))
Charts.Add
ActiveChart.ChartType = xlColumnClustered
ActiveChart.Location Where:=xlLocationAsObject, Name:= _
  strNomFeuille
ActiveChart.SetSourceData Source:=Sheets(strNomFeuille). _
  Range(rng.Address), PlotBy:=xlRows
ActiveChart.SeriesCollection(1).XValues = Sheets(strNomFeuille). _
  Range(rng2.Address)
histo = "graphique " & 2 * (position2 - 3) + 1
ActiveSheet.ChartObjects(histo).Activate
ActiveChart.Legend.Select
Selection.Delete
With ActiveChart
  .HasTitle = True
  .ChartTitle.Characters.Text = "notes obtenues"
  .Axes(xlValue, xlPrimary).HasTitle = True
  .Axes(xlValue, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text = "Fréquence"
End With
With ActiveChart.Axes(xlValue)
  .MinimumScaleIsAuto = True

```

```

        .MaximumScaleIsAuto = True
        .MinorUnitIsAuto = True
        .MajorUnit = div
    End With
    ActiveChart.ChartArea.Select
    ActiveSheet.Shapes(histo).ScaleWidth 1.2, msoFalse, _
        msoScaleFromBottomRight
    ActiveSheet.Shapes(histo).ScaleWidth 1.2, msoFalse, _
        msoScaleFromTopLeft
    ActiveChart.PlotArea.Select
    With Selection.Border
        .ColorIndex = 16
        .Weight = xlThin
        .LineStyle = xlContinuous
    End With
    Selection.Interior.ColorIndex = xlNone
    ActiveSheet.ChartObjects(histo).Cut
    Cells(2 * position + 12, 2).Select
    ActiveSheet.Paste
    ActiveWindow.Visible = False
flag5:

Set rng = Range(Rows(2 * position + 9), Rows(3 * position + 11))
rng.Select
If ci = 0 Then Selection.EntireRow.Delete

'hyperliens
If ci = 0 Then GoTo flag6
Cells(2 * position + 12, 1).Select
ActiveCell.Value = "histo. notes"
Cells(2 * position + 13, 1).Select
Set rngtest = Cells(2 * position + 13, 1)
nom = "hn." & strNomFeuille
ActiveWorkbook.Names.Add Name:=nom, RefersToR1C1:=rngtest
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
    "A1", TextToDisplay:="Haut"
Cells(3, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
    nom, TextToDisplay:="Histo. notes"
flag6:

'mise en page colonne 1 (encore)
Columns("A:A").Select
    With Selection
        .HorizontalAlignment = xlLeft
        .VerticalAlignment = xlBottom
        .WrapText = False
    End With

```

```

        .Orientation = 0
        .AddIndent = False
        .IndentLevel = 0
        .ShrinkToFit = False
        .MergeCells = False
    End With
Cells(1, 1).Select
'Hyperlien depuis Index
    On Error GoTo Creation
    Sheets("index").Select
    n = Cells(1, 2).Value
    Cells(n + 2, 2).Select
    ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
strNomFeuilleDepart & "!A" & position + 2, TextToDisplay:=strNomFeuilleDepart
    n = n + 1
    Cells(1, 2).Value = n
    Cells(1, 1) = "Prochaine entrée ligne " & Cells(1, 2).Value + 2
    Cells(1, 1).Select
    Selection.Columns.AutoFit
flag100:
Exit Sub
Creation:
Sheets.Add
ActiveSheet.Name = "index"
Cells(1, 2) = 1
Cells(1, 1) = "Prochaine entrée en B1 + " & Cells(1, 2).Value
    Cells(1, 1).Select
    Selection.Columns.AutoFit
Resume
End Sub

Sub Auto_Close()
    MenuBars(xlWorksheet).Menus("Outils").MenuItems( _
        "Analyse d'items").Delete
End Sub
Sub Auto_Open()
    MenuBars(xlWorksheet).Menus("Outils").MenuItems.Add _
        Caption:="Analyse d'items", _
        OnAction:="accueil"
End Sub
Sub colore()
    With Selection.Interior
        .ColorIndex = 6
        .Pattern = xlSolid
        .PatternColorIndex = xlAutomatic
    End With
End Sub

```

```

Sub dist_choix_futurs()
' Distribution des choix de réponses
Dim PctEffectue As Single
Dim strNomFeuille As String
Dim strNomFeuilleDepart As String
Dim vlet As Integer
Dim hlet As Integer
Dim col As Integer
Dim lig As Integer
Dim NbT As Integer
Dim q As Integer
Dim position As Integer
Dim position2 As Integer
'Dim selectarea3 As String
Dim rng2 As Range
Dim n As Integer
Dim diviq As Integer
Dim divicol As Integer
Dim m As Integer
Dim posi2 As Integer
n = 1
m = 1

strNomFeuilleDepart = ActiveSheet.Name

strNomFeuille = InputBox("Quel est le nom de la nouvelle feuille ?", _
    " Choix futurs ", "Futur_" & ActiveSheet.Name)

Dim posi As Integer
posi = Selection.Column
posi2 = Selection.Row

Selection.Copy
Sheets.Add
'On Error GoTo flag101:
ActiveSheet.Name = strNomFeuille
strNomFeuille = ActiveSheet.Name
Cells(2, 2).Select
ActiveSheet.Paste
With Selection
Dim objcell As Object
For Each objcell In Selection
    If objcell.Value = "" Then objcell.Value = " . "
Next objcell

For Each objcell In Selection
    If objcell.Value = "A" Then objcell.Value = 1

```

```

If objcell.Value = "a" Then objcell.Value = 1
If objcell.Value = "B" Then objcell.Value = 2
If objcell.Value = "b" Then objcell.Value = 2
If objcell.Value = "C" Then objcell.Value = 3
If objcell.Value = "c" Then objcell.Value = 3
If objcell.Value = "D" Then objcell.Value = 4
If objcell.Value = "d" Then objcell.Value = 4
If objcell.Value = "E" Then objcell.Value = 5
If objcell.Value = "e" Then objcell.Value = 5
Next objcell

```

End With

```

position = Selection.Rows.Count
position2 = Selection.Columns.Count
position2 = position2 + 3 'en raison d'un décalage déjà programmé

```

'Copie les clés même si c'est vide.

```

Sheets(strNomFeuilleDepart).Select
Range(Cells(position + posi2, posi), Cells(position + posi2, posi + position2 - 4)).Select
Selection.Copy
Sheets(strNomFeuille).Select
Cells(position + 2, 2).Select
ActiveSheet.Paste
For Each objcell In Selection
If objcell.Value = "A" Then objcell.Value = 1
If objcell.Value = "a" Then objcell.Value = 1
If objcell.Value = "B" Then objcell.Value = 2
If objcell.Value = "b" Then objcell.Value = 2
If objcell.Value = "C" Then objcell.Value = 3
If objcell.Value = "c" Then objcell.Value = 3
If objcell.Value = "D" Then objcell.Value = 4
If objcell.Value = "d" Then objcell.Value = 4
If objcell.Value = "E" Then objcell.Value = 5
If objcell.Value = "e" Then objcell.Value = 5
Next objcell

```

For q = 1 To position2 - 3

For vlet = 1 To 5

For hlet = 1 To 5

For col = 2 To position2 - 2

For lig = 2 To position + 1

If Cells(lig, q + 1).Value = vlet And Cells(lig, col).Value = hlet _

Then NbT = NbT + 1

Next lig

PctEffectue = 1 - (col / (col * q))

```

UpdateStatusBar (PctEffectue)
Cells(position + 5 + vlet + 5 * q, (col - 1) * 5 + hlet - 2).Value = NbT
If hlet = 1 Then Cells(position + 10, (col - 1) * 5 + hlet - 2) = "A"
If hlet = 2 Then Cells(position + 10, (col - 1) * 5 + hlet - 2) = "B"
If hlet = 3 Then Cells(position + 10, (col - 1) * 5 + hlet - 2) = "C"
If hlet = 3 Then Cells(position + 9, (col - 1) * 5 + hlet - 2) = "Q." & col - 1
If hlet = 4 Then Cells(position + 10, (col - 1) * 5 + hlet - 2) = "D"
If hlet = 5 Then Cells(position + 10, (col - 1) * 5 + hlet - 2) = "E"
NbT = 0
Next col
Next hlet
If vlet = 1 Then Cells(position + 5 + vlet + 5 * q, 3) = "A (n = " & Cells(position + 5 + vlet + 5 *
q, q * 5 + vlet - 2).Value & ")"
If vlet = 2 Then Cells(position + 5 + vlet + 5 * q, 3) = "B (n = " & Cells(position + 5 + vlet + 5 *
q, q * 5 + vlet - 2).Value & ")"
If vlet = 3 Then Cells(position + 5 + vlet + 5 * q, 3) = "C (n = " & Cells(position + 5 + vlet + 5 *
q, q * 5 + vlet - 2).Value & ")"
If vlet = 3 Then Cells(position + 5 + vlet + 5 * q, 2) = "Q." & q
If vlet = 4 Then Cells(position + 5 + vlet + 5 * q, 3) = "D (n = " & Cells(position + 5 + vlet + 5 *
q, q * 5 + vlet - 2).Value & ")"
If vlet = 5 Then Cells(position + 5 + vlet + 5 * q, 3) = "E (n = " & Cells(position + 5 + vlet + 5 *
q, q * 5 + vlet - 2).Value & ")"
Next vlet
Next q

'Mise en page
For q = 1 To position2 - 3
For col = 1 To position2 - 3
Range(Cells(q * 5 + position + 6, 5 * col - 1), Cells(q * 5 + position + 10, 5 * col + 3)).Select
Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
mise_en_page

Next col
Next q

n = 1
m = 1

'illustration clé de correction
For col = 1 To 5 * (position2 - 3)
divicol = Application.RoundDown((col - 1) / 5, 0)
If Cells(position + 10, col + 3) = "A" And Cells(position + 2, divicol + 2) = 1 Then Cells(position +
10, col + 3).Interior.ColorIndex = 43
If Cells(position + 10, col + 3) = "B" And Cells(position + 2, divicol + 2) = 2 Then Cells(position +
10, col + 3).Interior.ColorIndex = 43
If Cells(position + 10, col + 3) = "C" And Cells(position + 2, divicol + 2) = 3 Then Cells(position +
10, col + 3).Interior.ColorIndex = 43
If Cells(position + 10, col + 3) = "D" And Cells(position + 2, divicol + 2) = 4 Then Cells(position +

```

```

10, col + 3).Interior.ColorIndex = 43
    If Cells(position + 10, col + 3) = "E" And Cells(position + 2, divicol + 2) = 5 Then Cells(position +
10, col + 3).Interior.ColorIndex = 43
    Next col

Dim dist As String
Dim dist2 As String

    For q = 1 To 5 * (position2 - 3)
        diviq = Application.RoundDown((q - 1) / 5, 0)
        dist = Cells(q + position + 10, 3).Value
        dist2 = Left(dist, 1)
        If dist2 = "A" And Cells(position + 2, diviq + 2) = 1 Then Cells(q + position + 10,
3).Interior.ColorIndex = 43
        If dist2 = "B" And Cells(position + 2, diviq + 2) = 2 Then Cells(q + position + 10,
3).Interior.ColorIndex = 43
        If dist2 = "C" And Cells(position + 2, diviq + 2) = 3 Then Cells(q + position + 10,
3).Interior.ColorIndex = 43
        If dist2 = "D" And Cells(position + 2, diviq + 2) = 4 Then Cells(q + position + 10,
3).Interior.ColorIndex = 43
        If dist2 = "E" And Cells(position + 2, diviq + 2) = 5 Then Cells(q + position + 10,
3).Interior.ColorIndex = 43
    Next q

'Mise en relief
For q = 1 To 5 * (position2 - 3)
    If m > 5 Then m = 1
    For col = 1 To 5 * (position2 - 3)
        diviq = Application.RoundDown((q - 1) / 5, 0)
        divicol = Application.RoundDown((col - 1) / 5, 0)
        If n > 5 Then n = 1
        If Cells(position + 2, 2 + divicol) = n And Cells(position + 2, 2 + diviq) = m Then GoTo flag102
            If col <> q And Cells(q + position + 10, q + 3) > 3 And Cells(q + position + 10, col + 3).Value >=
Cells(q + position + 10, q + 3) / 2 _
            Then Cells(q + position + 10, col + 3).Interior.ColorIndex = 33

            If col <> q And Cells(q + position + 10, q + 3) > 3 And Cells(q + position + 10, col + 3).Value >=
Cells(q + position + 10, q + 3) * 3 / 4 _
            Then Cells(q + position + 10, col + 3).Interior.ColorIndex = 38

            If col <> q And Cells(q + position + 10, q + 3) > 3 And Cells(q + position + 10, col + 3).Value =
Cells(q + position + 10, q + 3) _
            Then Cells(q + position + 10, col + 3).Interior.ColorIndex = 6
    flag102:
        n = n + 1

    Next col

```

312

```
m = m + 1
Next q
```

```
Dim StrRang As String
Cells(1, 1).Value = position
StrRang = "1:" & Cells(1, 1).Value + 8
  Rows(StrRang).Select
  Selection.Delete Shift:=xlUp
  Range("D3").Select
  ActiveWindow.FreezePanels = True
```

```
Range(Cells(2, 2), Cells(2, 5 * position2 + 10)).Select
Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
For q = 1 To position2 - 3
  Range(Cells(5 * q - 2, 2), Cells(5 * q + 2, 3)).Select
    mise_en_page
Next q
```

'Hyperliens depuis choix futurs

```
Cells(1, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address="", SubAddress:= _
strNomFeuilleDepart & "!A" & position + 2, TextToDisplay:="Données de départ"
Cells(2, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address="", SubAddress:= _
"" & "index" & "" & "!A1", TextToDisplay:="Index"
```

'Mise en page

```
Dim rng As Range
Cells(1, 1).Select
Selection.Columns.AutoFit
Columns(2).Select
Selection.Columns.AutoFit
Columns(3).Select
Selection.Columns.AutoFit
Columns("D:IV").Select
Selection.ColumnWidth = 4.5
Cells(3, 1) = "Légende"
Cells(4, 1) = ">50%"
Cells(4, 1).Interior.ColorIndex = 33
Cells(5, 1) = ">75%"
Cells(5, 1).Interior.ColorIndex = 38
Cells(6, 1) = "100%"
Cells(6, 1).Interior.ColorIndex = 6
Cells(6, 1).HorizontalAlignment = xlLeft
Cells(7, 1) = "Bonne réponse"
```

```

Cells(7, 1).Interior.ColorIndex = 43
Cells(7, 1).HorizontalAlignment = xlCenter

' Je veux insérer un hyperlien vers la feuille des choix futurs
  Sheets(strNomFeuilleDepart).Select
  Cells(position + 4, 1).Select
  ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
    "" & strNomFeuille & "" & "!A1", TextToDisplay:="Choix futurs"
  Sheets(strNomFeuille).Select

Application.StatusBar = False

Cells(3, 1).Select
flag101:
End Sub
Sub mise_en_page()
  Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
  Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
  With Selection.Borders(xlEdgeLeft)
    .LineStyle = xlContinuous
    .Weight = xlThin
    .ColorIndex = xlAutomatic
  End With
  With Selection.Borders(xlEdgeTop)
    .LineStyle = xlContinuous
    .Weight = xlThin
    .ColorIndex = xlAutomatic
  End With
  With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
    .LineStyle = xlContinuous
    .Weight = xlThin
    .ColorIndex = xlAutomatic
  End With
  With Selection.Borders(xlEdgeRight)
    .LineStyle = xlContinuous
    .Weight = xlThin
    .ColorIndex = xlAutomatic
  End With
  Selection.Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlNone
  Selection.Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlNone
End Sub
Sub UpdateStatusBar(PctEffectue)
  Application.StatusBar = "Pourcentage effectué : " & Format(PctEffectue, "0%")
End Sub

Function SelectArea() As String

```

```

Dim Internrange As Range
On Error GoTo Brutt
Set Internrange = Application.InputBox("Plage des données (inclure trois colonnes pour les noms et une
ligne supplémentaire contenant: la clé de correction et/ou = pour les items de mise en rang et/ou vide si
items Likert)", "Sélection", Selection.AddressLocal, Type:=8)
SelectArea = Internrange.Address
Exit Function
Brutt:
SelectArea = "A1"
End Function
Function SelectArea2() As String
Dim Internrange As Range
On Error GoTo Brutt
Set Internrange = Application.InputBox("Plage des données (seulement les choix - pas les noms ou les
clés de correction)", "Sélection", _
    Selection.AddressLocal, Type:=8)
SelectArea2 = Internrange.Address
Exit Function
Brutt:
SelectArea2 = "A1"
End Function

Sub dist_choix_futurs_NB()
' Distribution des choix de réponses
Dim PctEffectue As Single
Dim strNomFeuille As String
Dim strNomFeuilleDepart As String
Dim vlet As Integer
Dim hlet As Integer
Dim col As Integer
Dim lig As Integer
Dim NbT As Integer
Dim q As Integer
Dim position As Integer
Dim position2 As Integer
'Dim selectarea3 As String
Dim rng2 As Range
Dim n As Integer
Dim diviq As Integer
Dim divicol As Integer
Dim m As Integer
Dim posi2 As Integer
n = 1
m = 1

strNomFeuilleDepart = ActiveSheet.Name

```

```

strNomFeuille = InputBox("Quel est le nom de la nouvelle feuille ?", _
    " Choix futurs ", "Futur_" & ActiveSheet.Name)

Dim posi As Integer
posi = Selection.Column
posi2 = Selection.Row

Selection.Copy
Sheets.Add
'On Error GoTo flag101:
ActiveSheet.Name = strNomFeuille
strNomFeuille = ActiveSheet.Name
Cells(2, 2).Select
ActiveSheet.Paste
With Selection
Dim objcell As Object
For Each objcell In Selection
    If objcell.Value = "" Then objcell.Value = " ."
Next objcell

    For Each objcell In Selection
        If objcell.Value = "A" Then objcell.Value = 1
        If objcell.Value = "a" Then objcell.Value = 1
        If objcell.Value = "B" Then objcell.Value = 2
        If objcell.Value = "b" Then objcell.Value = 2
        If objcell.Value = "C" Then objcell.Value = 3
        If objcell.Value = "c" Then objcell.Value = 3
        If objcell.Value = "D" Then objcell.Value = 4
        If objcell.Value = "d" Then objcell.Value = 4
        If objcell.Value = "E" Then objcell.Value = 5
        If objcell.Value = "e" Then objcell.Value = 5
    Next objcell

End With

position = Selection.Rows.Count
position2 = Selection.Columns.Count
position2 = position2 + 3 'en raison d'un décalage déjà programmé

'Copie les clés même si c'est vide.
Sheets(strNomFeuilleDepart).Select
' Range(Cells(position + 1, posi), Cells(position + 1, posi + position2 - 4)).Select
Range(Cells(position + posi2, posi), Cells(position + posi2, posi + position2 - 4)).Select
Selection.Copy
Sheets(strNomFeuille).Select
Cells(position + 2, 2).Select
ActiveSheet.Paste

```

```

For Each objcell In Selection
If objcell.Value = "A" Then objcell.Value = 1
If objcell.Value = "a" Then objcell.Value = 1
If objcell.Value = "B" Then objcell.Value = 2
If objcell.Value = "b" Then objcell.Value = 2
If objcell.Value = "C" Then objcell.Value = 3
If objcell.Value = "c" Then objcell.Value = 3
If objcell.Value = "D" Then objcell.Value = 4
If objcell.Value = "d" Then objcell.Value = 4
If objcell.Value = "E" Then objcell.Value = 5
If objcell.Value = "e" Then objcell.Value = 5
Next objcell

```

```

For q = 1 To position2 - 3
For vlet = 1 To 5
For hlet = 1 To 5
For col = 2 To position2 - 2
For lig = 2 To position + 1
If Cells(lig, q + 1).Value = vlet And Cells(lig, col).Value = hlet _
Then NbT = NbT + 1
Next lig
PctEffectue = 1 - (col / (col * q))
UpdateStatusBar (PctEffectue)
Cells(position + 5 + vlet + 5 * q, (col - 1) * 5 + hlet - 2).Value = NbT
If hlet = 1 Then Cells(position + 10, (col - 1) * 5 + hlet - 2) = "A"
If hlet = 2 Then Cells(position + 10, (col - 1) * 5 + hlet - 2) = "B"
If hlet = 3 Then Cells(position + 10, (col - 1) * 5 + hlet - 2) = "C"
If hlet = 3 Then Cells(position + 9, (col - 1) * 5 + hlet - 2) = "Q." & col - 1
If hlet = 4 Then Cells(position + 10, (col - 1) * 5 + hlet - 2) = "D"
If hlet = 5 Then Cells(position + 10, (col - 1) * 5 + hlet - 2) = "E"
NbT = 0
Next col
Next hlet
If vlet = 1 Then Cells(position + 5 + vlet + 5 * q, 3) = "A (n = " & Cells(position + 5 + vlet + 5 *
q, q * 5 + vlet - 2).Value & ")"
If vlet = 2 Then Cells(position + 5 + vlet + 5 * q, 3) = "B (n = " & Cells(position + 5 + vlet + 5 *
q, q * 5 + vlet - 2).Value & ")"
If vlet = 3 Then Cells(position + 5 + vlet + 5 * q, 3) = "C (n = " & Cells(position + 5 + vlet + 5 *
q, q * 5 + vlet - 2).Value & ")"
If vlet = 3 Then Cells(position + 5 + vlet + 5 * q, 2) = "Q." & q
If vlet = 4 Then Cells(position + 5 + vlet + 5 * q, 3) = "D (n = " & Cells(position + 5 + vlet + 5 *
q, q * 5 + vlet - 2).Value & ")"
If vlet = 5 Then Cells(position + 5 + vlet + 5 * q, 3) = "E (n = " & Cells(position + 5 + vlet + 5 *
q, q * 5 + vlet - 2).Value & ")"
Next vlet

```

```

Next q

'Mise en page
For q = 1 To position2 - 3
  For col = 1 To position2 - 3
    Range(Cells(q * 5 + position + 6, 5 * col - 1), Cells(q * 5 + position + 10, 5 * col + 3)).Select
    Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
    mise_en_page

    Next col
  Next q

'Mise en relief
For q = 1 To 5 * (position2 - 3)
  If m > 5 Then m = 1
  For col = 1 To 5 * (position2 - 3)
    diviq = Application.RoundDown((q - 1) / 5, 0)
    divicol = Application.RoundDown((col - 1) / 5, 0)
    ' If diviq = divicol Then GoTo flag102:
    ' MsgBox (diviq & " et " & divicol)
    If n > 5 Then n = 1
    ' Cells(diviq + 2, 2 + divicol).Select ' pointe sur le choix de l'étudiant
    ' Cells(position + 2, 2 + divicol).Select ' pointe sur la clé
    ' If Cells(position + 2, 1 + n) = Cells(diviq + 2, 1+n) Then GoTo flag102:
    ' Cells(position + 2, 2 + divicol).Select
    ' Cells(q + position + 10, col + 3).Select
    ' Cells(position + 2, 2 + diviq).Select
    If Cells(position + 2, 2 + divicol) = n And Cells(position + 2, 2 + diviq) = m Then GoTo flag102:
    If col <> q And Cells(q + position + 10, q + 3) > 3 And Cells(q + position + 10, col + 3).Value >=
Cells(q + position + 10, q + 3) / 2 _
    Then Cells(q + position + 10, col + 3).Interior.ColorIndex = 15
    If col <> q And Cells(q + position + 10, q + 3) > 3 And Cells(q + position + 10, col + 3).Value >=
Cells(q + position + 10, q + 3) * 3 / 4 _
    Then Cells(q + position + 10, col + 3).Interior.ColorIndex = 48

    If col <> q And Cells(q + position + 10, q + 3) > 3 And Cells(q + position + 10, col + 3).Value =
Cells(q + position + 10, q + 3) _
    Then Cells(q + position + 10, col + 3).Interior.ColorIndex = 16
  flag102:
    n = n + 1
  Next col
  m = m + 1
Next q

Dim StrRang As String
Cells(1, 1).Value = position
StrRang = "1:" & Cells(1, 1).Value + 8

```

```

Rows(StrRang).Select
Selection.Delete Shift:=xlUp
Range("D3").Select
ActiveWindow.FreezePanes = True

```

```

Range(Cells(2, 2), Cells(2, 5 * position2 + 10)).Select
Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
For q = 1 To position2 - 3
Range(Cells(5 * q - 2, 2), Cells(5 * q + 2, 3)).Select
    mise_en_page
Next q

```

'Hyperliens depuis choix futurs

```

Cells(1, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
strNomFeuilleDepart & "!A" & position + 2, TextToDisplay:="Données de départ"
Cells(2, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
"" & "index" & "" & "!A1", TextToDisplay:="Index"

```

'Mise en page

```

Dim rng As Range
Cells(1, 1).Select
Selection.Columns.AutoFit
Columns(2).Select
Selection.Columns.AutoFit
Columns(3).Select
Selection.Columns.AutoFit
Columns("D:IV").Select
Selection.ColumnWidth = 4.5
Cells(3, 1) = "Légende"
Cells(4, 1) = ">50%"
Cells(4, 1).Interior.ColorIndex = 33
Cells(5, 1) = ">75%"
Cells(5, 1).Interior.ColorIndex = 38
Cells(6, 1) = "100%"
Cells(6, 1).Interior.ColorIndex = 6
Cells(6, 1).HorizontalAlignment = xlLeft

```

' Je veux insérer un hyperlien vers la feuille des choix futurs

```

Sheets(strNomFeuilleDepart).Select
Cells(position + 4, 1).Select
ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
"" & strNomFeuille & "" & "!A1", TextToDisplay:="Choix futurs"
Sheets(strNomFeuille).Select

```

```
Application.StatusBar = False
```

```
Cells(3, 1).Select
```

```
flag101:
```

```
End Sub
```

```
Sub colore_vert()
```

```
With Selection.Interior
```

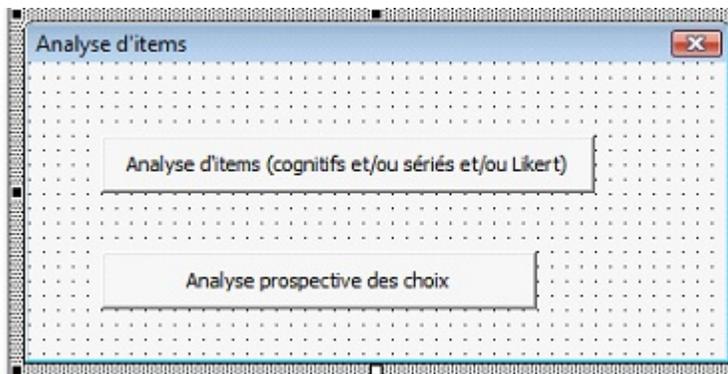
```
.ColorIndex = 43
```

```
.Pattern = xlSolid
```

```
.PatternColorIndex = xlAutomatic
```

```
End With
```

```
End Sub
```



Annexe 10 - Modifications aux codes VBA dans la version 75 (calculs des IDSP)

Nota : les modifications ne s'appliquent que pour les lignes 1 à 45 indiquées à la page 298 et la suivante.

```
'matrice de discrimination spécifique pondérée
Dim OuSuisJe8 As Integer
OuSuisJe8 = OuSuisJe7 + position2
Dim NbTamponA As Integer
Dim NbTamponB As Integer
Dim NbTamponC As Integer
Dim NbTamponD As Integer

For q = 5 To intNbItemsCognitifs + 4
  For p = 5 To intNbItemsCognitifs + 4
    Cells(OuSuisJe8 + 4, p - 2).Value = "Q. " & p - 4
    Cells(OuSuisJe8 + 4, p - 2).Select
    Selection.HorizontalAlignment = xlCenter
    Cells(OuSuisJe8 + q, 2).Value = "Q. " & q - 4
    Cells(OuSuisJe8 + q, 2).Select
    Selection.HorizontalAlignment = xlRight
    NbTamponA = 0
    NbTamponB = 0
    NbTamponC = 0
    NbTamponD = 0
    For q3 = position + 6 To 2 * position + 4
      If Cells(q3, q) = 0 And Cells(q3, p) = 0 Then NbTamponA = NbTamponA + 1
      If Cells(q3, q) = 0 And Cells(q3, p) = 1 Then NbTamponB = NbTamponB + 1
      If Cells(q3, q) = 1 And Cells(q3, p) = 0 Then NbTamponC = NbTamponC + 1
      If Cells(q3, q) = 1 And Cells(q3, p) = 1 Then NbTamponD = NbTamponD + 1
    Next q3
    Cells(OuSuisJe8 + q, p - 2).Select
    If p = q Then Selection.NumberFormat = "0" Else Selection.NumberFormat = "0.000"
    If (NbTamponC + NbTamponD) > 0 And (NbTamponA + NbTamponB) > 0 Then ActiveCell.Value
= (((NbTamponD ^ 2 / (NbTamponC + NbTamponD)) - (NbTamponB ^ 2 / (NbTamponA +
NbTamponB)))) / (NbTamponB + NbTamponD) Else ActiveCell.Value = "N/A"
    If (NbTamponC + NbTamponD) = 0 Then ActiveCell.Value = -1
    If (NbTamponA + NbTamponB) = 0 Then ActiveCell.Value = 1
    If (NbTamponB + NbTamponD) = 0 Then ActiveCell.Value = "N/A"
    If p = q Then ActiveCell.Value = " "
    If p = q Then GoTo flag68
    If ActiveCell.Value = "N/A" Then GoTo flag68
    If ActiveCell.Value > 0.3 Then ActiveCell.Interior.ColorIndex = 34
    If ActiveCell.Value > 0.5 Then ActiveCell.Interior.ColorIndex = 33
    If ActiveCell.Value > 0.75 Then ActiveCell.Interior.ColorIndex = 38
```

```
    If ActiveCell.Value > 0.9 Then ActiveCell.Interior.ColorIndex = 6
    If ActiveCell.Value < -0.1 Then ActiveCell.Interior.ColorIndex = 43
flag68:
    Next p
Next q
```

Annexe 11 - Normes ISO pour l'écriture de l'évaluation des incertitudes

Avec un intervalle de confiance à 68%, l'incertitude sur un ensemble de données Y de moyenne y et d'écart-type estimé sur la moyenne, $u_c(y)$, s'écrit : $Y = y \pm u_c(y)$, où

$$u_c(y) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \bar{Y}}{n(n-1)}} \quad (\text{Eq. 21 Écart-type estimé sur la moyenne (ISO)})$$

Pour certains domaines, il peut être nécessaire de jouer de prudence et d'augmenter l'intervalle de confiance d'un facteur k appelé facteur de couverture. Pour obtenir un intervalle de confiance de plus de 95% , on utilise $k = 2$ et pour obtenir un intervalle de confiance de plus de 99,7% , on utilise $k = 3$. On écrit alors le résultat final sous la forme $Y = y \pm U(y)$, où $U = ku_c(y)$. Les paramètres k et $u_c(y)$ doivent apparaître séparément pour que le facteur de couverture utilisé soit clairement connu.

Une des principales différences avec la méthode présentée à la section précédente réside dans la formule de la propagation des incertitudes qui, pour une quantité y fonction de plusieurs paramètres mesurés x ($y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$), devient:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (\text{Eq. 22 Propagation des incertitudes (ISO)})$$

où

$$u^2(x_i) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}_i}{n(n-1)} \right)^2 \quad (\text{Eq. 23 Variance de la moyenne (ISO)})$$

représente la variance de la moyenne de x_i

et

$$u(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{(x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j)}{N(N-1)} \right)} \quad (\text{Eq. 24 Covariance (ISO)})$$

représente la covariance associée à x_i et x_j .

On peut montrer alors que dans le cas où les variables x_1, x_2, \dots, x_N ne sont pas corrélées, la formule pour trouver l'incertitude dans le cas d'une multiplication ou d'une division devient, ($z = xy$ ou $z = x/y$)

$$\frac{u_c(z)}{z} = \sqrt{\left[\frac{u(x)}{x} \right]^2 + \left[\frac{u(y)}{y} \right]^2} \quad (\text{Eq. 25 Écart-type estimé sur la moyenne (ISO)}).$$

Ce qui selon la notation de la section précédente devient,

$$\frac{\Delta z}{z} = \sqrt{\left[\frac{\Delta x}{x} \right]^2 + \left[\frac{\Delta y}{y} \right]^2}$$

La formule pour trouver l'incertitude pour une relation de puissance du type $z = x^a y^b$ devient,

$$\frac{u_c(z)}{z} = \sqrt{\left[a \frac{u(x)}{x} \right]^2 + \left[b \frac{u(y)}{y} \right]^2} \quad (\text{Eq. 26 Règles simples pour relation de puissance (ISO)}).$$

Ce qui selon la notation de la section précédente devient,

$$\frac{\Delta z}{z} = \sqrt{\left[a \frac{\Delta x}{x} \right]^2 + \left[b \frac{\Delta y}{y} \right]^2}$$

Ces relations prendront leur importance dans la conception des distracteurs (ou leurres) de certaines des questions de l'instrument de mesure élaboré dans ce présent travail.

Selon la terminologie ISO, toute évaluation de l'incertitude par des méthodes statistiques (échantillonnage multiple) est considérée de type A. Toute autre méthode d'estimation de

l'incertitude est de type B (jugement scientifique, incertitudes tirées d'un manuel de référence, spécifications du fabricant, etc.). Il n'y a pas d'incertitude de type A ou B, mais des méthodes diverses d'évaluation de l'incertitude. Lorsque plusieurs types de méthodes sont employées, le cumul des incertitudes se fait au moyen de la somme quadratique. Par exemple si une balance précise à 4g pèse plusieurs objets dont l'écart-type de la moyenne vaut 4g, l'incertitude globale sera de $(4^2 + 4^2)^{1/2} = 5,66$ g que l'on arrondira à 6 g.

Annexe 12 - Présentation usuelle des incertitudes dans un guide de l'étudiant

«L'une des tâches essentielles des scientifiques est d'effectuer des mesures. Mesurer une grandeur A c'est la comparer à une grandeur de même espèce A_0 , prise comme référence et appelée unité, puis déterminer combien de fois A contient A_0 . Le nombre n (entier ou fractionnaire) ainsi obtenu est la mesure ou valeur numérique de A .

Lorsqu'on effectue des mesures en laboratoire, il faut être conscient de la limite des mesures que l'on a prises. Une mesure peut être précise mais non exacte. Il faut donc déterminer la précision des mesures effectuées. Une première approximation de cette précision peut se faire par le biais des chiffres significatifs lors des calculs des résultats à partir des données prises expérimentalement. Dans une donnée ou un résultat, un chiffre est significatif s'il est nécessaire pour définir la valeur de la mesure. De façon générale, nous sommes capables d'interpoler entre deux divisions de l'étalonnage d'un instrument (par exemple : pour une règle étalonnée à 1 mm/division, on peut lire au 0,1 mm près ou au 0,2 mm près, ... ; en comptant combien la largeur de l'aiguille entre dans la plus petite division, si elle pénètre 5 fois on peut donc lire au 1/5 division).

Lorsque la tolérance d'un appareil nous est inconnue, on peut évaluer la tolérance absolue en supposant qu'elle doit être au maximum égale à la $\frac{1}{2}$ de la plus petite division.

$$\text{Incertitude absolue globale} = [\text{incert. de lecture}] + [\text{tolérance absolue}]$$

(Eq. 27 Incertitude absolue globale).

Dans le cas de *l'addition* et de *la soustraction*. On exprime la réponse avec le même nombre de décimales que celui qui en a le moins si c'est un résultat final et il aura un ou plusieurs chiffres décimaux en indice inférieur de plus si le résultat est partiel.

Dans le cas de *la multiplication* et de *la division*. On exprime la réponse avec le même nombre de chiffres significatifs que celui qui en a le moins si c'est un résultat final et un ou plusieurs chiffres significatifs en indice inférieur de plus si c'est un résultat partiel.

Or, compte tenu de l'imperfection des instruments et des organes sensitifs humains, les résultats obtenus sont plus ou moins éloignés des valeurs exactes recherchées. Une mesure

n'est jamais exacte. La différence entre la valeur exacte et le résultat observé est *l'erreur* de mesure. Il y a 2 sortes d'erreurs, les erreurs *systematiques* et les erreurs *fortuites*.

Les erreurs systématiques sont celles qui se produisent toujours de la même façon, soit par défaut, soit par excès. Les erreurs systématiques dues à l'opérateur sont causées soit par une mauvaise vue, soit par manque de parallaxe (mauvaises conditions de lecture). Ainsi, si vous effectuez toujours vos lectures, la tête penchée, sur le côté gauche par exemple, vous lirez toujours une valeur supérieure à celle qui est indiquée. Les erreurs systématiques dues à l'instrument de mesure peuvent provenir, par exemple, d'une règle mal graduée (les divisions seraient trop écartées), toutes les lectures effectuées avec cet instrument seraient systématiquement trop petites.

Les erreurs fortuites ou accidentelles sont des erreurs aléatoires, imprévisibles quand elles se produisent. Nous ignorons leur grandeur et leur signe. Les erreurs fortuites dues à l'opérateur et à la méthode expérimentale sont dues à l'imperfection des qualités sensorielles de l'expérimentateur. Par exemple, quand une mesure tombe entre 2 divisions, l'appréciation peut varier d'un opérateur à l'autre ou comme en optique, on change la position de l'écran et l'opérateur ne voit pas de différence sur 1 cm même si le banc optique est gradué en [mm].

Les erreurs systématiques ayant été éliminées, il nous reste à évaluer la déviation maximale entraînée par les erreurs fortuites, déviation dont on ignore le signe. *L'incertitude absolue* est la valeur absolue de la différence $[a - x]$ entre la valeur numérique a de la mesure et la valeur exacte x de la grandeur $[a - x]$.

Comme la vraie valeur x est généralement inconnue, on ignore la grandeur de l'erreur ; mais un examen critique des méthodes et des appareils de mesure permet généralement de fixer une limite supérieure de l'erreur : cette limite est la plus grande déviation possible entre la valeur numérique exacte et la valeur numérique de la mesure. Ce que l'on peut écrire:

$$a - \Delta a \leq x \leq a + \Delta a$$

où $x = a \pm \Delta a$
 $\Delta a =$ incertitude absolue.

Cette valeur est un *maximum*, c'est une limite supérieure de l'erreur de lecture. La valeur maximale que peut atteindre une erreur fortuite est appelée incertitude.

L'incertitude relative, c'est le rapport $\Delta a/a$ de l'incertitude absolue sur la valeur de la mesure. Contrairement à l'incertitude absolue, qui s'exprime en unités de la grandeur mesurée, l'incertitude relative est une grandeur sans dimension essentiellement positive qui traduit la *précision* de la mesure. On l'exprime en pourcentage [%] avec au plus 2 chiffres significatifs.

L'incertitude sur les données dépend de la façon dont la mesure est prise. Pour tout instrument gradué, donc ayant une échelle, la mesure se fait soit par une seule lecture dans le cas où le «zéro» est fixé (pied à coulisse, thermomètre, ...), soit par 2 lectures dans le cas où le zéro est flottant ou doit être calibré (règle, voltmètre, ...).

Il y a d'autres sources d'erreurs fortuites :

- L'incertitude sur la valeur exacte des composantes de l'appareil ;
- L'imperfection de l'étalonnage ;
- La température ambiante ;
- etc,....

Il est à noter que l'incertitude absolue globale sur la donnée est la somme de l'incertitude absolue due à la construction et de l'incertitude absolue due à la lecture.

L'incertitude sur un résultat dérivé (ou par mesures indirectes) peut toujours être établie par la **méthode des extrêmes**. On estime la grandeur de l'incertitude d'un résultat dérivé en calculant la plus grande et la plus petite valeur qu'il peut prendre en raison des incertitudes associées aux données expérimentales servant dans son calcul, en divisant leur différence par deux. De manière générale:

$$\Delta z = \frac{z_{\max} - z_{\min}}{2} \quad (\text{Eq. 28 Méthode des extrêmes}).$$

Dans le cas d'une fonction à plusieurs variables indépendantes : $z = f(x, y)$, l'incertitude peut être trouvée par :

$$\Delta z \approx \left| f'_x(x, y) \right| \Delta x + \left| f'_y(x, y) \right| \Delta y$$

(Eq. 29 Méthode des dérivées partielles).

Où $f'_x(x, y)$ représente la dérivée partielle de f par rapport à x . $f'_x = \frac{\partial f(x, y)}{\partial x}$

et $f'_y(x, y)$ représente la dérivée partielle de f par rapport à y . $f'_y = \frac{\partial f(x, y)}{\partial y}$.

L'équation (26) est connue sous le nom de propagation des incertitudes. De ce principe on peut déduire l'incertitude sur une somme ou une différence. Soit $z = x \pm y$, alors

$$\Delta z = \Delta x + \Delta y$$

(Eq. 30 Méthode des règles simples (addition, soustraction)).

On peut également trouver l'incertitude sur un produit ou un quotient. Soit $z = xy$ ou encore $z = x/y$, alors

$$\frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$$

(Eq. 31 Méthode des règles simples (multiplication, division)).

Dans le cas d'une puissance, $y = x^n$, alors

$$\frac{\Delta y}{y} = n \cdot \frac{\Delta x}{x}$$

(Eq. 32 Méthode des règles simples (puissance)).

et dans le cas d'une racine $y = \sqrt[n]{x}$, alors

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{1}{n} \frac{\Delta x}{x}$$

(Eq. 33 Méthode des règles simples (racine)).

(Nota, les équations 8 à 11 sont généralement appelées **règles simples**). Dans, l'analyse des résultats, il est important de cerner la principale cause d'incertitude (c'est elle qui influe le plus sur la mesure) et de voir comment on peut améliorer la méthode expérimentale pour la réduire. On est alors en mesure de suggérer des améliorations pour une future expérimentation.

Les causes d'erreur produisent des mesures trop grandes ou trop petites. Il est donc important de mentionner dans quel sens une cause d'erreur influe sur le résultat. De plus, si plusieurs causes d'erreur influent sur le résultat, il est intéressant de détecter la principale de ces

causes. Les causes d'erreur facilement détectables peuvent être des *erreurs d'inattention* ou des *erreurs systématiques*.

Contrairement aux causes d'erreur, les causes d'incertitude conduisent à des résultats parfois trop grands, parfois trop petits, puisqu'elles se produisent au hasard. Une cause d'incertitude influe toujours sur le résultat dans les deux sens, d'où le symbole « \pm ».

Pour augmenter la précision dans le cas de mesure indirecte, on répète la mesure plusieurs fois et on calcule la moyenne des incertitudes pour chaque résultat, cette méthode s'appelle la *méthode pessimiste des moyennes*, car elle n'améliore pas réellement la précision mais la valeur expérimentale (moyenne ou médiane) est plus près de la vraie valeur.

Annexe 13 - Présentation usuelle de l'utilisation des graphiques dans un guide de l'étudiant

«Par graphique, nous entendons une courbe représentant la variation d'une grandeur en fonction d'autres grandeurs. Un *graphique d'illustration* est un genre de graphique qui nous montre l'évolution du phénomène, mais ne nous permet pas d'établir rapidement une relation entre deux variables ou grandeurs. Un *graphique d'analyse* permet de calculer plus facilement les constantes qui interviennent dans une relation et de déterminer aussi l'incertitude absolue sur ces constantes.

Dans la majorité des rapports de laboratoires, on vous demande de faire un graphique d'analyse. De plus, ces graphiques doivent être habituellement insérés après le tableau des résultats dans le rapport.

Ainsi, dans cette section, nous voulons vous présenter la façon de construire un graphique.

- Faites les graphiques sur des feuilles de papier quadrillé : papier millimétrique, papier semi-logarithmique, papier logarithmique.
- Placez un titre descriptif, bref et précis, écrit en majuscules. Identifiez chaque axe en indiquant la grandeur de la variable et l'unité de mesure. N'oubliez pas de bien graduer ces axes avec une échelle appropriée. Sont acceptées comme valeurs possibles, 1, 2 et 5 par petit carreau ou tout produit décimal de ces valeurs (papier millimétré : 1, 2 et 5 par millimètre). La graduation des axes doit se faire à intervalles réguliers et suffisamment espacés pour ne pas surcharger de chiffres les espaces non quadrillés.
- Choisissez convenablement vos axes afin d'utiliser au maximum toute la surface disponible. Prenez comme origine l'intersection des deux axes au coin gauche inférieur de la feuille à 1 cm environ du bas.
- Indiquez vos lectures ou résultats, et autant que possible, représenter les incertitudes. Entourez chaque point d'un petit cercle (voir figure). Représentez l'incertitude sur la mesure grâce à un rectangle d'incertitude. Ainsi, le concept de

point sur le graphique est remplacé par celui d'une surface à l'intérieur de laquelle se trouvera la valeur réelle.

- Tracez ensuite une courbe régulière, passant si possible par le centre des cercles. Dans le cas où vous ne pourriez obtenir une courbe régulière de cette façon, essayez de laisser autant de cercles à gauche et à droite de la courbe.

REMARQUE : En principe, cette courbe doit passer par le rectangle d'incertitude de chaque mesure. Si ce n'est pas le cas pour une mesure, on a affaire à un *point singulier* qui est peut-être dû à une mauvaise mesure.

- Tout sur le graphique doit s'écrire avec une pointe fine foncée, et les mots en lettres moulées. Avec une règle ou un pistolet, on peut tracer la courbe. S'il y a plusieurs courbes à placer sur le même graphique, on les tracera au moyen de couleurs différentes en identifiant les points des différentes courbes par des signes différents autour des points.

REMARQUE : On ne doit pas inclure sur les graphiques les points suivants:

- 1- tout commentaire ou toute conclusion que l'on peut en tirer. Ceci doit être fait dans la section «*analyse*» du rapport ;
- 2- les calculs des quantités tirées du graphique.»

Pente, ordonnée à l'origine et équation d'une droite

Deux caractéristiques importantes de la droite sont sa pente et son ordonnée à l'origine.

La pente de la droite est définie par : $m = \frac{y_b - y_a}{x_b - x_a}$
 (Eq. 34 Pente de la droite)

où (x_a, y_a) et (x_b, y_b) représentent deux points quelconques de la droite et m désigne la pente de la droite.

L'ordonnée à l'origine, souvent désignée par le symbole b , est l'ordonnée du point d'intersection de la droite et de l'axe OY .

L'équation de la droite est donnée par : $y = m \cdot x + b$ (Eq. 35 Équation de la droite)

Pour déterminer la pente, il faut considérer deux points arbitraires sur cette droite. Ces deux points devront être aussi éloignés que possible sur la droite afin d'obtenir une meilleure précision.

Remarque : La pente d'une droite peut être positive ou négative. De plus, on n'utilise jamais les coordonnées des points expérimentaux pour le calcul de la pente.

Incertitude graphique sans rectangles d'erreur

Comme d'habitude, une quantité sans incertitude est d'une utilité restreinte, il en va de même pour la pente. Si nous traçons un graphique à la main selon des données dont les incertitudes sont inconnues, une nouvelle incertitude liée au tracé même (choix de la meilleure droite, lecture des coordonnées de deux points appartenant à cette droite, ...) apparaît. Dans ce cas on peut évaluer l'incertitude relative sur la pente, Δm , à environ 1 %. Par exemple : $m = (0,0400 \pm 0,0004) \text{ s}^2/\text{mm}$

Incertitude graphique avec rectangles d'erreur

Une meilleure façon d'évaluer l'incertitude sur la pente est d'utiliser l'incertitude sur les points expérimentaux. On utilise alors une technique fort simple. On choisit deux (2) points situés sur la meilleure droite aux extrémités de la zone des points expérimentaux; à chacun de ces points on associe l'incertitude du point expérimental le plus proche. On représente ces deux (2) points avec leurs incertitudes de telle sorte qu'ils ne puissent être confondus avec les valeurs expérimentales ; on peut par exemple les dessiner en pointillés ou en couleur, etc... À partir des zones d'incertitude reportées sur ces deux (2) points, on trace les pentes extrêmes :

si la pente de la meilleure droite est positive (+) :

- pour $m+$: du coin inférieur droit du premier point au coin supérieur gauche du dernier point ;
- pour $m-$: du coin supérieur gauche du premier point au coin inférieur droit du dernier point ;

si la pente de la meilleure droite est négative (-) :

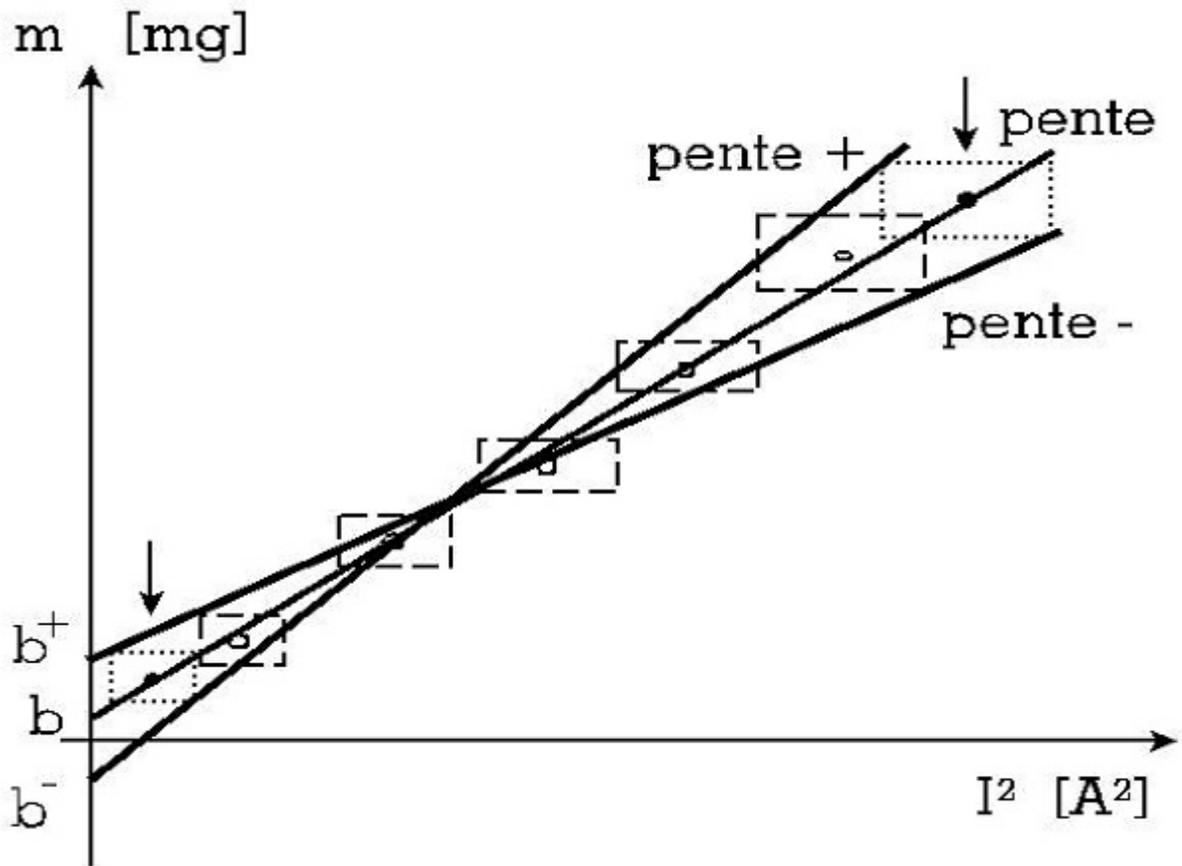
- pour $m+$: du coin inférieur droit du premier point au coin supérieur droit du dernier point ;
- pour $m-$: du coin supérieur gauche du premier point au coin inférieur gauche du dernier point,

en s'assurant que ces droites passent dans tous les rectangles d'incertitude ; sinon on ajuste, sauf si un des points est singulier, c'est-à-dire vraiment à l'extérieur de l'alignement des autres points.

L'incertitude sur la pente m de la meilleure droite sera donnée par : $\Delta m = \frac{1}{2} [m+- m-]$

L'incertitude sur l'ordonnée b de la meilleure droite sera donnée par :

$$\Delta b = \frac{1}{2} [b+- b-]$$

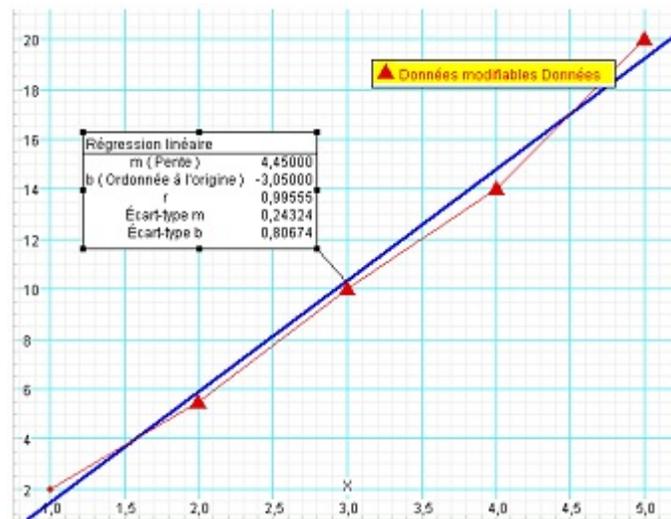


RÉGRESSIONS LINÉAIRE ET QUADRATIQUE

Pour le calcul de la pente, comme nous avons vu dans la section précédente, il s'agit de tracer une droite passant le plus possible par le centre des cercles et/ou par le rectangle d'incertitude. Or, on peut tracer une infinité de droites obéissant à cette propriété. Il semblerait logique que la meilleure droite sera celle qui minimise l'écart.

Régression linéaire

Les programmes d'analyse de données peuvent calculer la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite qui minimise l'écart entre les divers points expérimentaux et celle-ci. Dans Excel, ceci s'appelle : Insérer une courbe de tendance, dans DataStudio, ceci s'appelle : régression linéaire. Quelques précisions :



- r (coefficient de Pearson) Qualité de l'ajustement (± 1 = tous les points sont sur la droite, 0 = nuages de points sans relation).
- Écart-type m Estimé de l'incertitude sur la pente basé sur la dispersion des points.
- Écart-type b Estimé de l'incertitude sur l'ordonnée à l'origine basé sur la dispersion des points.

Faites attention à ces deux dernier points qui sont trompeurs. Si tous les points sont alignés sur la droite, les écarts-types seront nuls mais cela ne veut pas dire qu'il n'y a pas d'incertitude sur la pente et l'ordonnée à l'origine car le logiciel n'a pas tenu compte des incertitudes sur les données elles-mêmes. Pour cela, utilisez la macro : Graphique de science de Pierre Morin.

Annexe 14 - Tableaux complets des indices de
discrimination spécifiques et pondérés pour les trois
articles

Tableau XXXIII - Indices de discrimination spécifique FCI prétest.

	Q. 1	Q. 2	Q. 3	Q. 4	Q. 5	Q. 6	Q. 7	Q. 8	Q. 9	Q. 10	Q. 11	Q. 12	Q. 13	Q. 14	Q. 15	Q. 16	Q. 17	Q. 18	Q. 19	Q. 20	Q. 21	Q. 22	Q. 23	Q. 24	Q. 25	Q. 26	Q. 27	Q. 28	Q. 29
Q. 1		0,08	0,20	0,02	-0,02	0,14	0,07	0,18	0,10	0,13	0,07	0,03	0,02	0,17	0,05	0,15	0,08	0,08	0,05	0,07	0,10	0,10	0,09	0,05	0,07	0,19	0,17	0,11	0,08
Q. 2	0,13		0,03	0,05	0,08	-0,14	-0,09	0,06	-0,06	-0,06	0,13	0,15	0,03	0,21	0,15	0,01	0,00	0,10	-0,09	0,12	0,16	0,07	0,00	-0,14	0,08	-0,02	0,18	-0,03	-0,13
Q. 3	0,30	0,03		-0,06	0,08	0,21	0,13	0,15	0,08	0,01	0,04	-0,07	0,01	0,14	-0,02	0,13	0,09	0,13	0,00	0,01	-0,03	0,06	0,04	-0,04	0,02	0,03	0,08	0,13	0,10
Q. 4	0,02	0,03	-0,04		0,06	0,10	0,07	0,11	0,00	0,19	0,02	0,06	-0,04	0,10	0,09	0,07	0,08	0,05	0,04	-0,02	0,08	0,06	0,08	0,01	0,05	0,10	0,07	0,02	0,14
Q. 5	-0,03	0,08	0,10	0,11		0,12	-0,09	0,13	0,20	0,10	0,08	0,00	-0,03	0,06	0,04	0,07	-0,10	0,14	0,05	0,13	0,06	0,07	0,04	0,24	0,04	0,03	-0,09	0,24	0,01
Q. 6	0,14	-0,08	0,15	0,10	0,06		0,22	0,29	0,02	0,21	0,03	0,06	-0,01	-0,01	-0,01	0,03	0,13	0,02	0,05	0,09	0,08	0,10	0,10	0,10	0,01	0,37	0,24	0,02	0,17
Q. 7	0,07	-0,06	0,10	0,08	-0,05	0,24		0,01	0,00	-0,03	0,00	0,09	-0,02	0,05	-0,09	0,07	0,11	0,05	0,05	-0,08	-0,04	0,09	0,07	0,01	-0,07	0,07	-0,02	-0,03	0,05
Q. 8	0,19	0,04	0,11	0,11	0,07	0,30	0,01		0,11	0,24	0,02	0,17	-0,02	0,13	0,07	0,04	0,20	0,08	0,17	0,11	0,10	0,13	0,19	0,14	0,02	0,26	0,47	0,18	0,29
Q. 9	0,25	-0,09	0,15	-0,01	0,27	0,06	0,00	0,29		0,03	0,04	0,15	0,04	0,20	0,11	-0,12	0,24	0,26	-0,03	0,14	-0,05	0,28	0,17	0,04	-0,06	0,25	0,19	0,20	0,22
Q. 10	0,15	-0,04	0,01	0,21	0,06	0,24	-0,03	0,27	0,01		0,02	0,02	-0,04	0,03	0,02	0,13	0,15	0,04	0,01	-0,02	0,11	0,02	0,03	0,16	-0,01	0,17	0,16	0,05	0,13
Q. 11	0,34	0,35	0,12	0,10	0,19	0,12	-0,01	0,07	0,06	0,08		0,03	0,29	0,52	0,00	0,14	0,11	0,45	-0,15	0,03	0,03	0,25	0,27	0,03	-0,10	0,17	0,32	0,30	0,05
Q. 12	0,03	0,09	-0,05	0,06	0,00	0,06	0,09	0,18	0,06	0,02	0,01		0,01	0,04	0,06	0,11	0,23	0,09	0,09	0,00	0,01	0,08	0,08	-0,02	-0,01	0,08	0,12	0,01	0,08
Q. 13	0,08	0,08	0,04	-0,17	-0,07	-0,06	-0,10	-0,11	0,06	-0,18	0,29	0,03		0,17	-0,09	-0,04	0,02	0,10	-0,15	0,11	-0,14	-0,11	0,09	-0,23	-0,10	0,08	0,14	-0,14	-0,04
Q. 14	0,19	0,13	0,10	0,11	0,04	-0,02	0,05	0,14	0,09	0,02	0,12	0,04	0,04		0,06	0,08	-0,04	0,27	0,05	-0,08	-0,04	0,03	0,18	0,09	0,01	0,12	0,12	0,12	0,08
Q. 15	0,05	0,08	-0,01	0,09	0,02	-0,01	-0,08	0,07	0,04	0,01	0,00	0,06	-0,02	0,06		-0,05	0,05	0,03	-0,06	0,07	0,09	0,02	-0,05	-0,02	-0,01	0,04	0,01	-0,05	0,00
Q. 16	0,16	0,01	0,09	0,08	0,04	0,03	0,07	0,05	-0,05	0,12	0,03	0,11	-0,01	0,07	-0,05		-0,05	0,07	0,07	-0,08	0,05	0,06	0,25	0,16	0,03	0,03	0,07	0,01	0,18
Q. 17	0,08	0,00	0,06	0,08	-0,05	0,13	0,10	0,20	0,09	0,14	0,02	0,22	0,00	-0,04	0,05	-0,04		0,03	0,13	-0,03	-0,03	0,04	0,05	0,01	-0,04	0,13	0,17	0,03	0,14
Q. 18	0,16	0,11	0,16	0,08	0,13	0,04	0,08	0,15	0,19	0,07	0,18	0,16	0,04	0,47	0,06	0,12	0,06		-0,08	-0,06	0,02	0,20	0,10	0,09	0,00	0,15	0,10	0,41	0,16
Q. 19	0,07	-0,08	0,00	0,06	0,04	0,08	0,07	0,27	-0,02	0,01	-0,05	0,13	-0,05	0,07	-0,10	0,10	0,20	-0,07		-0,04	0,05	-0,04	0,17	0,22	-0,07	0,10	0,01	0,06	0,23
Q. 20	0,10	0,10	0,01	-0,03	0,09	0,13	-0,10	0,15	0,07	-0,03	0,01	-0,01	0,03	-0,10	0,09	-0,11	-0,05	-0,04	-0,04		0,22	0,00	-0,08	-0,02	0,14	0,09	0,05	-0,02	-0,01
Q. 21	0,21	0,20	-0,05	0,17	0,06	0,17	-0,08	0,22	-0,04	0,22	0,02	0,03	-0,06	-0,08	0,19	0,09	-0,06	0,02	0,06	0,34		0,07	0,06	0,14	0,11	0,24	0,26	-0,05	0,17
Q. 22	0,17	0,07	0,07	0,09	0,06	0,16	0,13	0,20	0,18	0,03	0,09	0,13	-0,04	0,04	0,04	0,10	0,07	0,18	-0,04	0,00	0,05		0,00	-0,03	-0,01	0,04	0,18	0,19	0,14
Q. 23	0,10	0,00	0,03	0,09	0,03	0,12	0,07	0,21	0,07	0,03	0,06	0,09	0,02	0,18	-0,06	0,27	0,06	0,06	0,12	-0,06	0,03	0,00		0,15	-0,04	0,16	0,22	0,08	0,18
Q. 24	0,07	-0,11	-0,04	0,01	0,18	0,15	0,01	0,19	0,02	0,21	0,01	-0,02	-0,07	0,12	-0,03	0,22	0,02	0,07	0,20	-0,02	0,10	-0,02	0,20		0,06	0,23	0,15	0,12	0,27
Q. 25	0,13	0,07	0,02	0,08	0,03	0,02	-0,11	0,03	-0,04	-0,01	-0,04	-0,01	-0,04	0,02	-0,01	0,05	-0,07	0,00	-0,08	0,16	0,09	-0,01	-0,06	0,07		-0,01	0,07	0,05	-0,06
Q. 26	0,21	-0,01	0,02	0,11	0,02	0,41	0,07	0,29	0,11	0,17	0,04	0,08	0,02	0,12	0,04	0,04	0,14	0,09	0,07	0,07	0,13	0,03	0,16	0,18	-0,01		0,32	0,06	0,25
Q. 27	0,17	0,10	0,06	0,07	-0,05	0,24	-0,01	0,47	0,07	0,14	0,07	0,11	0,03	0,11	0,01	0,07	0,16	0,06	0,00	0,04	0,12	0,11	0,19	0,10	0,04	0,29		0,09	0,20
Q. 28	0,16	-0,03	0,13	0,03	0,19	0,02	-0,03	0,26	0,11	0,06	0,09	0,02	-0,04	0,16	-0,07	0,02	0,04	0,32	0,06	-0,02	-0,03	0,17	0,10	0,13	0,04	0,08	0,14		-0,04
Q. 29	0,08	-0,07	0,07	0,14	0,00	0,17	0,05	0,28	0,09	0,12	0,01	0,08	-0,01	0,08	0,00	0,16	0,14	0,09	0,14	-0,01	0,08	0,08	0,16	0,19	-0,04	0,22	0,20	-0,02	

Tableau XXXIII - Indices de discrimination spécifique pondérés FCI prétest.

	Q. 1	Q. 2	Q. 3	Q. 4	Q. 5	Q. 6	Q. 7	Q. 8	Q. 9	Q. 10	Q. 11	Q. 12	Q. 13	Q. 14	Q. 15	Q. 16	Q. 17	Q. 18	Q. 19	Q. 20	Q. 21	Q. 22	Q. 23	Q. 24	Q. 25	Q. 26	Q. 27	Q. 28	Q. 29
Q. 1		0,08	0,21	0,03	-0,01	0,15	0,07	0,19	0,10	0,15	0,07	0,04	0,02	0,18	0,05	0,16	0,09	0,09	0,06	0,08	0,10	0,11	0,09	0,05	0,08	0,19	0,18	0,11	0,09
Q. 2	-0,26		-0,12	-0,35	-0,05	-0,39	-0,28	-0,25	-0,10	-0,48	0,06	-0,17	-0,02	-0,10	-0,19	-0,24	-0,37	-0,04	-0,58	-0,08	0,02	-0,08	-0,22	-0,22	-0,07	-0,24	-0,24	-0,16	-0,43
Q. 3	-0,07	-0,08		-0,36	-0,03	-0,11	-0,10	-0,14	0,00	-0,37	0,00	-0,27	-0,02	-0,10	-0,25	-0,12	-0,26	0,01	-0,46	-0,12	-0,10	-0,06	-0,15	-0,15	-0,09	-0,18	-0,24	-0,03	-0,24
Q. 4	0,10	0,06	-0,01		0,08	0,17	0,12	0,17	0,01	0,28	0,03	0,12	-0,03	0,15	0,15	0,13	0,16	0,07	0,16	0,01	0,10	0,08	0,12	0,04	0,07	0,15	0,15	0,05	0,22
Q. 5	-0,37	-0,07	-0,09	-0,34		-0,26	-0,28	-0,23	0,06	-0,42	0,01	-0,27	-0,05	-0,20	-0,27	-0,22	-0,44	-0,03	-0,54	-0,09	-0,06	-0,09	-0,20	-0,01	-0,10	-0,22	-0,41	0,00	-0,37
Q. 6	0,11	-0,09	0,13	0,06	0,06		0,20	0,27	0,02	0,17	0,02	0,03	-0,02	-0,03	-0,04	0,00	0,10	0,01	0,00	0,08	0,07	0,09	0,08	0,09	0,00	0,36	0,21	0,00	0,13
Q. 7	-0,09	-0,10	0,02	-0,11	-0,09	0,08		-0,12	-0,03	-0,23	-0,02	-0,03	-0,04	-0,06	-0,21	-0,05	-0,07	-0,01	-0,20	-0,14	-0,08	0,02	-0,04	-0,06	-0,12	-0,04	-0,18	-0,09	-0,12
Q. 8	0,12	0,01	0,08	0,03	0,05	0,23	-0,04		0,10	0,15	0,01	0,12	-0,03	0,08	0,01	-0,01	0,12	0,06	0,06	0,08	0,08	0,10	0,15	0,11	0,00	0,22	0,41	0,15	0,22
Q. 9	-0,30	-0,17	-0,11	-0,46	0,02	-0,35	-0,27	-0,22		-0,52	-0,03	-0,25	-0,03	-0,18	-0,28	-0,33	-0,35	0,01	-0,65	-0,12	-0,12	-0,01	-0,19	-0,16	-0,16	-0,16	-0,34	-0,08	-0,33
Q. 10	0,31	0,02	0,08	0,38	0,10	0,36	0,09	0,37	0,05		0,04	0,15	-0,02	0,14	0,16	0,24	0,33	0,09	0,28	0,06	0,14	0,08	0,14	0,21	0,06	0,26	0,32	0,12	0,30
Q. 11	-0,37	-0,05	-0,16	-0,49	-0,08	-0,39	-0,31	-0,37	-0,08	-0,58		-0,34	0,09	-0,16	-0,37	-0,30	-0,48	0,02	-0,75	-0,20	-0,11	-0,10	-0,22	-0,19	-0,18	-0,26	-0,40	-0,11	-0,47
Q. 12	-0,08	0,05	-0,09	-0,07	-0,03	-0,05	0,01	0,08	0,03	-0,13	-0,01		-0,01	-0,04	-0,03	0,03	0,10	0,06	-0,09	-0,05	-0,02	0,04	0,01	-0,06	-0,04	0,00	0,00	-0,04	-0,04
Q. 13	-0,44	-0,13	-0,18	-0,55	-0,15	-0,43	-0,33	-0,41	-0,08	-0,63	0,09	-0,34		-0,26	-0,39	-0,34	-0,50	-0,12	-0,75	-0,17	-0,14	-0,18	-0,27	-0,23	-0,18	-0,29	-0,44	-0,22	-0,49
Q. 14	0,01	0,07	0,03	-0,08	-0,02	-0,16	-0,06	-0,01	0,05	-0,19	0,11	-0,09	0,02		-0,08	-0,05	-0,22	0,23	-0,21	-0,14	-0,08	-0,03	0,07	0,02	-0,04	0,00	-0,06	0,05	-0,09
Q. 15	-0,04	0,06	-0,05	-0,01	0,00	-0,09	-0,14	0,00	0,03	-0,09	-0,01	0,00	-0,03	0,00		-0,11	-0,05	0,01	-0,19	0,03	0,07	-0,01	-0,10	-0,06	-0,04	-0,02	-0,07	-0,08	-0,09
Q. 16	0,02	-0,04	0,03	-0,08	-0,01	-0,10	-0,03	-0,07	-0,07	-0,06	0,02	0,00	-0,02	-0,02	-0,16		-0,19	0,02	-0,15	-0,13	0,01	0,01	0,16	0,10	-0,02	-0,06	-0,07	-0,04	0,03
Q. 17	0,14	0,02	0,09	0,15	-0,03	0,19	0,15	0,25	0,10	0,22	0,03	0,27	0,01	0,01	0,10	0,01		0,05	0,23	0,00	-0,01	0,07	0,09	0,04	-0,02	0,17	0,23	0,05	0,21
Q. 18	-0,26	-0,05	-0,05	-0,35	-0,02	-0,30	-0,19	-0,21	0,06	-0,42	0,11	-0,18	-0,01	0,07	-0,26	-0,19	-0,36		-0,60	-0,18	-0,08	0,00	-0,17	-0,10	-0,13	-0,15	-0,31	0,13	-0,28
Q. 19	0,36	0,05	0,13	0,39	0,12	0,34	0,26	0,42	0,05	0,42	0,00	0,32	0,00	0,25	0,19	0,29	0,47	0,05		0,11	0,11	0,09	0,30	0,25	0,06	0,27	0,33	0,17	0,46
Q. 20	-0,21	-0,02	-0,11	-0,34	-0,01	-0,16	-0,26	-0,13	0,00	-0,39	-0,02	-0,22	0,00	-0,25	-0,16	-0,27	-0,34	-0,12	-0,47		0,12	-0,10	-0,23	-0,14	0,01	-0,12	-0,25	-0,13	-0,30
Q. 21	-0,27	-0,01	-0,18	-0,34	-0,08	-0,26	-0,29	-0,21	-0,10	-0,39	-0,03	-0,28	-0,06	-0,28	-0,21	-0,23	-0,44	-0,11	-0,56	0,03		-0,10	-0,21	-0,09	-0,07	-0,12	-0,25	-0,18	-0,31
Q. 22	-0,22	-0,06	-0,09	-0,31	-0,06	-0,20	-0,14	-0,14	0,07	-0,40	0,03	-0,16	-0,05	-0,19	-0,24	-0,17	-0,31	0,03	-0,53	-0,14	-0,05		-0,21	-0,15	-0,12	-0,19	-0,22	0,00	-0,26
Q. 23	-0,09	-0,06	-0,04	-0,12	-0,03	-0,06	-0,05	0,05	0,03	-0,21	0,04	-0,06	0,00	0,05	-0,20	0,12	-0,14	0,00	-0,17	-0,13	-0,02	-0,07		0,07	-0,09	0,03	0,01	-0,01	-0,02
Q. 24	-0,24	-0,17	-0,15	-0,31	0,06	-0,16	-0,19	-0,10	-0,04	-0,23	-0,02	-0,23	-0,07	-0,10	-0,25	-0,04	-0,30	-0,04	-0,31	-0,14	0,00	-0,12	-0,04		-0,05	-0,02	-0,19	-0,03	-0,10
Q. 25	-0,25	-0,06	-0,13	-0,32	-0,08	-0,29	-0,28	-0,26	-0,09	-0,44	-0,05	-0,26	-0,05	-0,21	-0,28	-0,21	-0,40	-0,10	-0,56	-0,04	-0,03	-0,12	-0,24	-0,10		-0,22	-0,30	-0,11	-0,38
Q. 26	0,03	-0,07	-0,05	-0,08	-0,03	0,25	-0,05	0,13	0,07	-0,06	0,02	-0,05	0,00	0,00	-0,10	-0,09	-0,05	0,04	-0,19	-0,01	0,08	-0,03	0,05	0,10	-0,06		0,14	-0,01	0,06
Q. 27	0,20	0,11	0,07	0,10	-0,04	0,26	0,01	0,48	0,08	0,18	0,07	0,13	0,03	0,13	0,04	0,09	0,20	0,06	0,05	0,05	0,13	0,12	0,21	0,12	0,05	0,31		0,11	0,23
Q. 28	-0,18	-0,11	-0,03	-0,31	0,06	-0,25	-0,22	-0,05	0,02	-0,34	0,05	-0,21	-0,06	-0,08	-0,29	-0,20	-0,30	0,19	-0,42	-0,14	-0,10	0,03	-0,12	-0,03	-0,07	-0,14	-0,20		-0,33
Q. 29	0,12	-0,06	0,08	0,18	0,02	0,20	0,07	0,31	0,09	0,17	0,01	0,11	0,00	0,10	0,03	0,19	0,19	0,10	0,20	0,01	0,09	0,10	0,18	0,20	-0,02	0,25	0,24	-0,01	

Tableau XXXIV - Indices de discrimination spécifique FCI post-test.

	Q. 1	Q. 2	Q. 3	Q. 4	Q. 5	Q. 6	Q. 7	Q. 8	Q. 9	Q. 10	Q. 11	Q. 12	Q. 13	Q. 14	Q. 15	Q. 16	Q. 17	Q. 18	Q. 19	Q. 20	Q. 21	Q. 22	Q. 23	Q. 24	Q. 25	Q. 26	Q. 27	Q. 28	Q. 29
Q. 1		0,36	0,21	-0,03	0,21	0,03	0,26	0,25	0,13	0,12	0,34	0,09	0,25	0,16	0,05	0,12	0,13	0,10	-0,09	0,20	0,27	0,29	0,21	0,42	0,16	0,28	-0,02	-0,01	0,05
Q. 2	0,22		0,03	-0,06	0,37	-0,07	0,22	0,14	0,23	0,06	0,51	0,19	0,32	0,33	0,06	0,00	0,12	0,20	-0,07	0,39	0,37	0,23	0,07	0,23	0,28	0,03	0,09	0,17	-0,01
Q. 3	0,13	0,03		-0,05	0,14	0,05	0,02	0,10	0,10	0,00	0,07	0,00	0,04	0,01	-0,15	0,05	0,10	-0,04	-0,03	-0,10	0,09	0,03	-0,01	0,08	-0,11	0,27	0,22	0,04	0,01
Q. 4	-0,03	-0,10	-0,08		0,00	0,24	0,11	0,19	0,03	0,27	-0,18	0,00	-0,06	-0,09	-0,02	-0,01	0,16	0,05	0,34	0,00	-0,04	0,21	0,21	0,23	-0,04	0,12	-0,10	0,10	0,16
Q. 5	0,12	0,35	0,13	0,00		0,16	0,12	0,25	0,53	0,07	0,44	0,14	0,06	0,10	0,05	0,11	0,10	0,23	-0,05	0,51	0,47	0,41	0,14	0,17	0,32	0,24	0,15	0,30	0,28
Q. 6	0,03	-0,08	0,07	0,18	0,21		0,24	0,17	0,26	0,26	0,07	0,02	-0,07	-0,05	0,03	0,15	0,10	-0,04	0,12	0,14	0,10	0,09	0,26	0,07	0,08	0,26	0,25	0,20	0,22
Q. 7	0,15	0,21	0,02	0,06	0,12	0,18		0,27	0,33	0,16	0,27	0,04	0,07	-0,01	0,03	-0,12	0,09	0,15	0,14	0,23	0,16	0,29	0,10	0,27	0,17	0,13	0,05	0,16	0,17
Q. 8	0,15	0,14	0,10	0,11	0,27	0,13	0,29		0,39	0,16	0,11	0,06	-0,04	0,23	-0,07	0,26	0,32	0,36	0,06	0,29	0,30	0,39	0,37	0,30	0,11	0,33	0,43	0,34	0,18
Q. 9	0,08	0,22	0,10	0,02	0,54	0,20	0,33	0,38		0,09	0,38	0,10	0,09	0,01	0,01	0,15	0,14	0,28	0,06	0,51	0,47	0,42	0,27	0,33	0,26	0,27	0,19	0,39	0,40
Q. 10	0,16	0,13	0,01	0,32	0,16	0,44	0,36	0,35	0,20		0,18	0,04	-0,02	0,17	-0,29	0,08	0,19	0,20	0,24	-0,02	0,02	0,13	0,06	0,32	-0,07	0,20	0,05	0,18	0,17
Q. 11	0,20	0,50	0,07	-0,10	0,46	0,05	0,28	0,11	0,38	0,08		0,08	0,34	0,27	0,04	-0,02	0,14	0,32	0,02	0,37	0,38	0,32	0,18	0,35	0,23	0,20	0,14	0,24	0,35
Q. 12	0,11	0,35	0,00	0,00	0,28	0,02	0,09	0,10	0,19	0,04	0,15		0,10	0,16	-0,03	-0,05	0,18	0,20	0,12	0,29	0,19	0,07	0,24	0,28	-0,12	0,15	0,04	0,13	0,07
Q. 13	0,17	0,36	0,04	-0,04	0,07	-0,06	0,08	-0,05	0,11	-0,01	0,39	0,06		0,21	0,12	0,06	0,08	0,09	-0,06	0,17	0,29	0,22	0,20	0,03	0,04	0,08	0,21	0,02	0,07
Q. 14	0,13	0,44	0,01	-0,07	0,13	-0,05	-0,01	0,30	0,01	0,10	0,37	0,12	0,25		0,01	0,09	0,17	0,36	0,05	0,21	0,26	0,10	0,25	0,23	0,05	0,18	0,29	0,25	0,13
Q. 15	0,05	0,10	-0,24	-0,02	0,09	0,03	0,05	-0,11	0,01	-0,22	0,07	-0,03	0,17	0,01		-0,05	-0,17	-0,17	-0,01	0,01	-0,01	0,01	0,08	-0,16	-0,01	-0,09	0,03	-0,12	-0,13
Q. 16	0,08	0,00	0,06	-0,01	0,13	0,13	-0,14	0,29	0,17	0,04	-0,02	-0,03	0,06	0,08	-0,03		0,17	0,04	-0,05	0,10	0,13	0,13	0,35	0,13	0,08	0,31	0,26	0,14	0,14
Q. 17	0,11	0,17	0,14	0,13	0,15	0,11	0,14	0,45	0,21	0,12	0,20	0,14	0,10	0,18	-0,15	0,22		0,24	0,07	0,19	0,25	0,21	0,30	0,25	0,12	0,28	0,29	0,12	0,36
Q. 18	0,05	0,19	-0,03	0,02	0,23	-0,03	0,15	0,34	0,27	0,09	0,31	0,10	0,08	0,26	-0,10	0,03	0,16		0,07	0,36	0,23	0,27	0,13	0,27	0,20	0,12	0,14	0,47	0,15
Q. 19	-0,09	-0,12	-0,04	0,32	-0,09	0,16	0,24	0,11	0,11	0,19	0,03	0,11	-0,10	0,07	-0,01	-0,08	0,09	0,13		-0,04	-0,08	0,22	0,07	0,30	-0,02	0,09	0,12	0,07	0,18
Q. 20	0,13	0,44	-0,11	0,00	0,60	0,12	0,27	0,33	0,59	-0,01	0,42	0,18	0,17	0,18	0,00	0,10	0,15	0,43	-0,03		0,74	0,33	0,27	0,37	0,60	0,23	0,17	0,36	0,30
Q. 21	0,20	0,45	0,10	-0,03	0,59	0,09	0,20	0,37	0,58	0,01	0,47	0,12	0,31	0,23	-0,01	0,14	0,21	0,30	-0,06	0,80		0,46	0,32	0,37	0,45	0,29	0,25	0,35	0,29
Q. 22	0,17	0,22	0,03	0,11	0,41	0,07	0,30	0,38	0,42	0,06	0,31	0,03	0,19	0,08	0,01	0,12	0,14	0,28	0,13	0,28	0,37		0,27	0,36	0,23	0,30	0,32	0,32	0,31
Q. 23	0,14	0,08	-0,01	0,13	0,16	0,22	0,11	0,40	0,30	0,03	0,20	0,14	0,19	0,20	0,05	0,34	0,23	0,14	0,04	0,26	0,29	0,30		0,33	0,07	0,35	0,34	0,29	0,25
Q. 24	0,27	0,24	0,08	0,14	0,18	0,06	0,30	0,31	0,36	0,16	0,37	0,16	0,03	0,18	-0,10	0,12	0,19	0,30	0,18	0,34	0,32	0,39	0,32		0,28	0,30	0,12	0,22	0,33
Q. 25	0,11	0,31	-0,12	-0,03	0,37	0,06	0,20	0,13	0,29	-0,04	0,26	-0,07	0,04	0,04	-0,01	0,08	0,09	0,24	-0,01	0,59	0,41	0,26	0,07	0,30		0,07	0,04	0,13	0,06
Q. 26	0,16	0,03	0,25	0,06	0,24	0,19	0,13	0,32	0,26	0,09	0,19	0,08	0,07	0,13	-0,05	0,27	0,19	0,12	0,05	0,19	0,23	0,29	0,31	0,28	0,06		0,39	0,21	0,17
Q. 27	-0,01	0,10	0,23	-0,06	0,17	0,20	0,05	0,46	0,21	0,03	0,15	0,03	0,20	0,23	0,02	0,25	0,22	0,16	0,07	0,16	0,22	0,35	0,34	0,13	0,04	0,43		0,37	0,27
Q. 28	-0,01	0,17	0,04	0,05	0,30	0,15	0,16	0,32	0,38	0,08	0,23	0,07	0,02	0,17	-0,07	0,12	0,08	0,47	0,04	0,31	0,28	0,32	0,25	0,20	0,11	0,21	0,33		0,08
Q. 29	0,03	-0,01	0,01	0,09	0,28	0,16	0,17	0,18	0,41	0,08	0,35	0,03	0,06	0,09	-0,08	0,12	0,25	0,16	0,10	0,25	0,23	0,31	0,22	0,30	0,05	0,17	0,24	0,08	

Tableau XXXV - Indices de discrimination spécifique pondérés FCI post-test.

	Q. 1	Q. 2	Q. 3	Q. 4	Q. 5	Q. 6	Q. 7	Q. 8	Q. 9	Q. 10	Q. 11	Q. 12	Q. 13	Q. 14	Q. 15	Q. 16	Q. 17	Q. 18	Q. 19	Q. 20	Q. 21	Q. 22	Q. 23	Q. 24	Q. 25	Q. 26	Q. 27	Q. 28	Q. 29
Q. 1		0,59	0,53	0,54	0,41	0,51	0,42	0,53	0,35	0,64	0,57	0,61	0,32	0,59	0,15	0,52	0,59	0,37	0,49	0,30	0,30	0,43	0,56	0,42	0,29	0,51	0,43	0,34	0,41
Q. 2	0,39		0,17	0,14	0,43	0,11	0,30	0,27	0,31	0,26	0,60	0,37	0,35	0,48	0,10	0,16	0,29	0,29	0,12	0,41	0,38	0,31	0,22	0,29	0,32	0,16	0,24	0,28	0,12
Q. 3	0,34	0,19		0,17	0,24	0,24	0,14	0,25	0,20	0,23	0,22	0,22	0,11	0,21	-0,10	0,23	0,30	0,09	0,19	-0,02	0,15	0,14	0,17	0,16	-0,02	0,38	0,37	0,18	0,16
Q. 4	0,55	0,37	0,39		0,31	0,64	0,36	0,52	0,31	0,73	0,31	0,58	0,17	0,48	0,11	0,47	0,62	0,36	0,74	0,20	0,16	0,39	0,57	0,35	0,19	0,44	0,41	0,42	0,48
Q. 5	0,04	0,29	0,07	-0,09		0,08	0,08	0,19	0,50	-0,02	0,38	0,06	0,03	0,02	0,03	0,04	0,02	0,18	-0,13	0,49	0,46	0,37	0,07	0,13	0,29	0,19	0,09	0,25	0,22
Q. 6	0,44	0,25	0,37	0,56	0,38		0,39	0,44	0,40	0,63	0,35	0,45	0,10	0,36	0,11	0,46	0,48	0,22	0,52	0,25	0,21	0,28	0,53	0,23	0,22	0,46	0,52	0,41	0,45
Q. 7	0,05	0,14	-0,05	-0,04	0,07	0,09		0,20	0,28	0,06	0,20	-0,06	0,04	-0,10	0,01	-0,20	0,00	0,09	0,04	0,20	0,13	0,25	0,02	0,24	0,13	0,07	-0,03	0,10	0,10
Q. 8	0,33	0,27	0,23	0,30	0,35	0,30	0,36		0,45	0,35	0,24	0,25	0,03	0,39	-0,03	0,40	0,47	0,44	0,25	0,33	0,33	0,45	0,50	0,35	0,18	0,43	0,54	0,43	0,30
Q. 9	0,05	0,13	0,00	-0,11	0,48	0,08	0,26	0,29		-0,04	0,29	-0,03	0,05	-0,11	-0,02	0,04	0,02	0,20	-0,06	0,49	0,45	0,36	0,17	0,28	0,21	0,18	0,09	0,31	0,32
Q. 10	0,69	0,51	0,47	0,76	0,40	0,74	0,46	0,60	0,40		0,52	0,66	0,22	0,65	-0,03	0,55	0,67	0,45	0,72	0,22	0,21	0,37	0,53	0,38	0,20	0,50	0,52	0,48	0,51
Q. 11	0,35	0,58	0,19	0,07	0,50	0,20	0,35	0,22	0,44	0,25		0,24	0,36	0,41	0,07	0,12	0,28	0,40	0,18	0,39	0,39	0,38	0,31	0,39	0,28	0,30	0,26	0,33	0,44
Q. 12	0,63	0,59	0,44	0,59	0,44	0,54	0,35	0,48	0,39	0,63	0,49		0,26	0,62	0,11	0,46	0,64	0,44	0,64	0,33	0,27	0,33	0,59	0,37	0,15	0,46	0,49	0,44	0,44
Q. 13	-0,18	0,08	-0,22	-0,37	-0,12	-0,36	-0,11	-0,29	-0,08	-0,36	0,10	-0,29		-0,13	0,03	-0,23	-0,25	-0,12	-0,39	0,03	0,17	0,02	-0,10	-0,11	-0,09	-0,16	-0,09	-0,19	-0,17
Q. 14	0,54	0,61	0,35	0,41	0,33	0,38	0,23	0,53	0,24	0,55	0,57	0,54	0,32		0,11	0,44	0,55	0,50	0,49	0,30	0,30	0,30	0,54	0,33	0,21	0,42	0,55	0,45	0,41
Q. 15	-0,50	-0,33	-0,53	-0,55	-0,23	-0,46	-0,25	-0,46	-0,26	-0,68	-0,34	-0,56	-0,08	-0,48		-0,47	-0,60	-0,41	-0,54	-0,19	-0,18	-0,26	-0,39	-0,31	-0,21	-0,40	-0,41	-0,41	-0,44
Q. 16	0,39	0,24	0,29	0,32	0,28	0,40	0,05	0,48	0,30	0,37	0,21	0,30	0,17	0,36	0,04		0,45	0,22	0,28	0,20	0,21	0,27	0,54	0,24	0,19	0,47	0,47	0,33	0,34
Q. 17	0,55	0,46	0,45	0,57	0,35	0,51	0,34	0,62	0,38	0,58	0,47	0,58	0,23	0,56	-0,01	0,54		0,43	0,53	0,29	0,30	0,38	0,57	0,35	0,26	0,49	0,56	0,38	0,56
Q. 18	0,04	0,17	-0,05	0,00	0,22	-0,05	0,14	0,33	0,26	0,07	0,30	0,08	0,07	0,24	-0,11	0,02	0,14		0,05	0,36	0,23	0,26	0,11	0,26	0,20	0,11	0,13	0,46	0,14
Q. 19	0,50	0,34	0,40	0,73	0,25	0,59	0,42	0,47	0,34	0,69	0,42	0,63	0,14	0,55	0,11	0,42	0,57	0,39		0,18	0,13	0,40	0,49	0,37	0,20	0,42	0,51	0,40	0,49
Q. 20	-0,22	0,15	-0,34	-0,34	0,39	-0,20	0,07	0,04	0,40	-0,36	0,14	-0,19	0,03	-0,16	-0,07	-0,19	-0,19	0,20	-0,36		0,69	0,13	-0,03	0,20	0,48	-0,02	-0,12	0,11	0,03
Q. 21	-0,23	0,09	-0,21	-0,41	0,33	-0,28	-0,04	0,02	0,33	-0,40	0,12	-0,30	0,14	-0,17	-0,09	-0,21	-0,20	0,02	-0,43	0,68		0,21	-0,05	0,17	0,27	-0,01	-0,11	0,05	-0,03
Q. 22	0,05	0,13	-0,06	-0,02	0,35	-0,04	0,23	0,29	0,36	-0,07	0,22	-0,09	0,14	-0,04	-0,02	0,01	0,02	0,20	0,00	0,24	0,34		0,17	0,32	0,18	0,21	0,22	0,24	0,22
Q. 23	0,41	0,29	0,22	0,41	0,29	0,45	0,25	0,55	0,40	0,34	0,38	0,42	0,26	0,45	0,11	0,53	0,47	0,30	0,33	0,32	0,32	0,40		0,39	0,17	0,48	0,52	0,43	0,42
Q. 24	0,01	0,04	-0,12	-0,13	0,03	-0,18	0,15	0,11	0,21	-0,12	0,17	-0,11	-0,07	-0,08	-0,15	-0,10	-0,07	0,13	-0,09	0,25	0,23	0,25	0,09		0,18	0,12	-0,09	0,04	0,13
Q. 25	-0,21	0,05	-0,33	-0,33	0,17	-0,22	0,01	-0,12	0,11	-0,35	0,01	-0,38	-0,08	-0,25	-0,07	-0,18	-0,21	0,03	-0,32	0,49	0,31	0,08	-0,19	0,15		-0,14	-0,21	-0,08	-0,16
Q. 26	0,25	0,09	0,31	0,15	0,28	0,27	0,17	0,37	0,30	0,18	0,25	0,16	0,09	0,20	-0,03	0,34	0,26	0,17	0,13	0,22	0,25	0,33	0,37	0,31	0,09		0,45	0,26	0,22
Q. 27	0,27	0,29	0,41	0,23	0,30	0,43	0,20	0,59	0,32	0,32	0,33	0,31	0,27	0,46	0,08	0,45	0,45	0,30	0,35	0,24	0,27	0,43	0,51	0,23	0,14	0,54		0,49	0,42
Q. 28	0,05	0,21	0,08	0,11	0,33	0,20	0,19	0,36	0,40	0,14	0,27	0,13	0,04	0,23	-0,06	0,17	0,13	0,49	0,10	0,32	0,29	0,34	0,30	0,23	0,13	0,24	0,37		0,12
Q. 29	0,16	0,09	0,12	0,22	0,34	0,28	0,24	0,27	0,45	0,22	0,43	0,17	0,11	0,22	-0,05	0,23	0,37	0,23	0,24	0,29	0,26	0,36	0,33	0,34	0,11	0,25	0,34	0,16	

Tableau XXXVI - Indices de discrimination spécifique - article 2.

	Q. 1	Q. 2	Q. 3	Q. 4	Q. 5	Q. 6	Q. 7	Q. 8	Q. 9	Q. 10	Q. 11	Q. 12	Q. 13	Q. 14	Q. 15	Q. 16	Q. 17	Q. 18	Q. 19	Q. 20	Q. 21	Q. 22	Q. 23	Q. 24
Q. 1		-0,08	0,14	0,09	0,20	0,00	0,20	0,14	0,23	0,16	-0,03	0,10	0,09	0,01	-0,10	0,34	0,36	0,11	0,22	0,06	0,12	0,35	0,25	0,00
Q. 2	-0,15		-0,03	0,10	0,07	-0,09	0,09	-0,15	-0,15	-0,08	0,02	-0,02	0,08	-0,02	0,18	0,19	0,18	-0,01	-0,01	-0,20	-0,16	0,01	-0,20	-0,16
Q. 3	0,35	-0,04		-0,10	0,41	-0,18	-0,01	-0,20	0,07	0,24	-0,04	0,04	-0,18	0,02	-0,27	-0,13	0,08	0,27	0,42	0,02	0,09	0,35	-0,06	-0,15
Q. 4	0,27	0,15	-0,12		0,21	0,14	-0,06	0,30	0,21	-0,10	0,00	0,42	-0,14	0,21	0,03	0,25	0,28	0,11	-0,09	-0,05	-0,10	0,00	0,39	0,01
Q. 5	0,20	0,03	0,16	0,06		0,06	0,06	0,12	0,04	0,05	-0,01	0,01	-0,03	-0,01	-0,07	0,21	0,36	0,17	0,29	0,02	0,12	0,16	-0,07	-0,04
Q. 6	0,00	-0,08	-0,13	0,08	0,11		0,05	0,20	0,19	0,18	0,01	-0,13	0,14	0,25	0,01	0,05	-0,07	0,11	0,12	0,20	0,14	0,14	0,05	0,02
Q. 7	0,22	0,05	0,00	-0,02	0,07	0,03		0,04	0,08	0,08	-0,01	0,10	-0,08	0,01	-0,06	0,24	0,01	-0,01	0,09	-0,06	0,03	0,00	-0,11	-0,04
Q. 8	0,17	-0,09	-0,10	0,11	0,14	0,13	0,05		0,23	0,08	-0,09	0,15	0,03	0,10	0,09	0,28	0,16	0,11	0,10	0,23	0,22	0,07	0,29	0,05
Q. 9	0,24	-0,08	0,03	0,07	0,04	0,11	0,07	0,20		0,09	-0,03	0,22	0,29	0,10	-0,01	0,18	0,08	0,24	0,27	0,18	0,21	0,22	0,23	0,15
Q. 10	0,22	-0,05	0,13	-0,04	0,07	0,14	0,10	0,10	0,12		0,22	0,17	0,06	0,22	-0,20	0,17	0,11	-0,03	0,36	0,25	0,12	0,35	0,24	0,24
Q. 11	-0,05	0,02	-0,03	0,00	-0,03	0,01	-0,01	-0,15	-0,05	0,31		-0,12	-0,22	-0,11	-0,12	0,19	0,18	-0,59	-0,31	0,09	-0,16	0,11	0,00	0,04
Q. 12	0,17	-0,02	0,03	0,22	0,01	-0,11	0,15	0,21	0,35	0,21	-0,10		0,00	0,13	-0,10	0,23	0,08	0,22	0,19	-0,03	0,08	0,03	0,20	0,16
Q. 13	0,11	0,05	-0,09	-0,05	-0,03	0,09	-0,09	0,03	0,35	0,06	-0,14	0,00		0,18	0,06	0,15	0,05	0,21	0,17	0,08	0,14	0,09	0,12	0,07
Q. 14	0,04	-0,02	0,02	0,18	-0,03	0,38	0,04	0,23	0,27	0,44	-0,16	0,21	0,40		0,07	0,04	-0,25	0,13	0,40	-0,01	0,22	0,06	0,14	0,27
Q. 15	-0,11	0,10	-0,12	0,01	-0,08	0,01	-0,06	0,09	-0,01	-0,17	-0,07	-0,07	0,05	0,03		-0,01	-0,08	-0,02	0,02	-0,02	0,05	-0,06	0,00	0,03
Q. 16	0,38	0,10	-0,06	0,09	0,23	0,03	0,24	0,26	0,19	0,14	0,10	0,16	0,13	0,01	-0,01		0,18	-0,12	0,09	0,10	0,19	0,32	0,11	0,07
Q. 17	0,37	0,09	0,03	0,09	0,37	-0,04	0,01	0,13	0,07	0,08	0,09	0,05	0,04	-0,09	-0,07	0,17		0,15	0,00	-0,10	-0,12	0,30	0,13	0,07
Q. 18	0,15	0,00	0,15	0,05	0,23	0,08	-0,01	0,12	0,30	-0,02	-0,40	0,18	0,22	0,06	-0,02	-0,14	0,20		0,35	0,07	0,14	-0,04	0,20	-0,02
Q. 19	0,22	-0,01	0,17	-0,03	0,29	0,07	0,08	0,08	0,25	0,26	-0,15	0,11	0,13	0,14	0,02	0,08	0,00	0,26		0,16	0,25	0,34	0,05	-0,03
Q. 20	0,08	-0,14	0,01	-0,02	0,03	0,14	-0,08	0,25	0,24	0,24	0,06	-0,02	0,09	0,00	-0,02	0,12	-0,14	0,07	0,21		0,67	0,36	0,40	0,11
Q. 21	0,19	-0,13	0,06	-0,05	0,19	0,12	0,04	0,29	0,31	0,13	-0,13	0,07	0,18	0,12	0,07	0,27	-0,19	0,16	0,40	0,78		0,48	0,47	0,17
Q. 22	0,36	0,01	0,14	0,00	0,17	0,08	0,00	0,06	0,21	0,25	0,06	0,02	0,07	0,02	-0,05	0,30	0,29	-0,03	0,35	0,27	0,31		0,22	0,08
Q. 23	0,24	-0,10	-0,02	0,12	-0,07	0,02	-0,10	0,24	0,22	0,17	0,00	0,12	0,10	0,05	0,00	0,10	0,12	0,15	0,05	0,29	0,29	0,22		0,22
Q. 24	-0,01	-0,17	-0,13	0,01	-0,08	0,03	-0,08	0,08	0,30	0,36	0,04	0,21	0,11	0,20	0,05	0,13	0,15	-0,03	-0,07	0,18	0,23	0,18	0,47	

Tableau XXXVII - Indices de discrimination spécifique pondérés - article 2.

	Q. 1	Q. 2	Q. 3	Q. 4	Q. 5	Q. 6	Q. 7	Q. 8	Q. 9	Q. 10	Q. 11	Q. 12	Q. 13	Q. 14	Q. 15	Q. 16	Q. 17	Q. 18	Q. 19	Q. 20	Q. 21	Q. 22	Q. 23	Q. 24
Q. 1		-0,08	0,13	0,06	0,17	-0,01	0,18	0,12	0,20	0,14	-0,04	0,09	0,07	0,01	-0,14	0,33	0,32	0,06	0,19	0,01	0,07	0,32	0,21	-0,01
Q. 2	-0,39		-0,09	-0,02	-0,33	-0,15	-0,19	-0,27	-0,33	-0,20	-0,09	-0,14	-0,15	-0,08	-0,38	-0,14	-0,32	-0,53	-0,36	-0,62	-0,64	-0,39	-0,44	-0,15
Q. 3	-0,20	-0,13		-0,11	-0,22	-0,18	-0,27	-0,29	-0,26	-0,07	-0,13	-0,12	-0,27	-0,07	-0,62	-0,31	-0,43	-0,47	-0,20	-0,57	-0,58	-0,29	-0,41	-0,15
Q. 4	-0,30	-0,07	-0,12		-0,38	-0,09	-0,30	-0,14	-0,25	-0,22	-0,12	0,03	-0,26	0,00	-0,56	-0,20	-0,41	-0,60	-0,46	-0,65	-0,70	-0,48	-0,29	-0,11
Q. 5	0,22	0,04	0,16	0,04		0,07	0,08	0,13	0,06	0,06	-0,01	0,02	-0,01	0,00	-0,02	0,23	0,39	0,21	0,32	0,07	0,16	0,20	-0,04	-0,03
Q. 6	-0,31	-0,14	-0,13	-0,03	-0,29		-0,20	-0,08	-0,14	-0,05	-0,09	-0,18	-0,10	0,13	-0,45	-0,20	-0,44	-0,45	-0,28	-0,40	-0,46	-0,31	-0,31	-0,08
Q. 7	0,06	0,00	-0,04	-0,06	-0,10	-0,02		-0,05	-0,05	0,00	-0,05	0,04	-0,15	-0,02	-0,26	0,12	-0,17	-0,24	-0,07	-0,29	-0,22	-0,18	-0,25	-0,08
Q. 8	-0,04	-0,13	-0,12	0,05	-0,09	0,05	-0,10		0,05	-0,02	-0,13	0,06	-0,08	0,05	-0,20	0,12	-0,11	-0,21	-0,12	-0,11	-0,14	-0,17	0,06	-0,01
Q. 9	0,12	-0,11	0,00	0,03	-0,09	0,07	-0,01	0,13		0,04	-0,06	0,18	0,23	0,08	-0,17	0,09	-0,07	0,05	0,14	0,00	0,01	0,08	0,11	0,12
Q. 10	-0,08	-0,11	0,05	-0,09	-0,22	0,02	-0,10	-0,08	-0,11		0,11	0,04	-0,10	0,15	-0,50	-0,05	-0,23	-0,41	0,01	-0,21	-0,34	-0,03	-0,08	0,14
Q. 11	-0,35	-0,09	-0,09	-0,08	-0,38	-0,11	-0,24	-0,27	-0,29	0,03		-0,18	-0,28	-0,11	-0,53	-0,14	-0,32	-0,78	-0,49	-0,48	-0,64	-0,34	-0,35	-0,07
Q. 12	-0,18	-0,10	-0,05	0,10	-0,32	-0,16	-0,11	-0,04	0,01	0,00	-0,14		-0,17	0,03	-0,48	-0,06	-0,32	-0,34	-0,20	-0,49	-0,46	-0,34	-0,18	0,03
Q. 13	-0,12	-0,03	-0,11	-0,09	-0,26	0,01	-0,22	-0,10	0,13	-0,06	-0,16	-0,08		0,12	-0,26	-0,03	-0,23	-0,17	-0,09	-0,27	-0,25	-0,19	-0,13	-0,01
Q. 14	-0,35	-0,12	-0,08	0,00	-0,43	0,07	-0,26	-0,14	-0,19	0,03	-0,16	-0,05	-0,03		-0,51	-0,26	-0,55	-0,55	-0,24	-0,60	-0,56	-0,43	-0,35	0,02
Q. 15	0,08	0,14	-0,07	0,01	0,13	0,07	0,07	0,19	0,13	-0,06	0,00	0,01	0,15	0,06		0,12	0,15	0,27	0,21	0,27	0,35	0,16	0,19	0,07
Q. 16	0,22	0,05	-0,08	0,04	0,06	-0,02	0,12	0,16	0,06	0,06	0,05	0,09	0,04	-0,02	-0,21		-0,02	-0,33	-0,07	-0,14	-0,07	0,13	-0,05	0,02
Q. 17	0,43	0,12	0,05	0,08	0,45	0,00	0,08	0,19	0,15	0,13	0,12	0,09	0,10	-0,07	0,07	0,22		0,30	0,10	0,06	0,05	0,40	0,22	0,09
Q. 18	0,35	0,07	0,15	0,05	0,43	0,14	0,17	0,24	0,39	0,10	-0,31	0,21	0,28	0,09	0,34	0,07	0,45		0,50	0,45	0,52	0,27	0,40	0,05
Q. 19	0,24	0,00	0,17	-0,05	0,31	0,07	0,09	0,09	0,26	0,26	-0,15	0,12	0,14	0,14	0,04	0,09	0,02	0,28		0,18	0,28	0,35	0,07	-0,03
Q. 20	0,30	-0,03	0,07	0,00	0,30	0,17	0,12	0,32	0,35	0,27	0,12	0,08	0,20	0,05	0,34	0,26	0,21	0,45	0,41		0,85	0,54	0,52	0,14
Q. 21	0,40	0,00	0,10	-0,02	0,43	0,16	0,23	0,33	0,40	0,22	0,00	0,16	0,26	0,12	0,47	0,36	0,25	0,57	0,54	0,88		0,61	0,56	0,17
Q. 22	0,41	0,03	0,15	-0,01	0,24	0,10	0,05	0,11	0,26	0,27	0,08	0,05	0,11	0,04	0,06	0,33	0,37	0,09	0,41	0,38	0,42		0,29	0,10
Q. 23	0,25	-0,09	-0,02	0,10	-0,07	0,03	-0,09	0,25	0,22	0,17	0,00	0,12	0,10	0,05	0,01	0,10	0,13	0,15	0,05	0,30	0,30	0,22		0,22
Q. 24	-0,34	-0,17	-0,13	-0,07	-0,41	-0,10	-0,28	-0,17	-0,11	0,05	-0,09	-0,02	-0,14	0,06	-0,47	-0,18	-0,36	-0,56	-0,40	-0,46	-0,47	-0,33	-0,10	

Tableau XXXVIII - Indices de discrimination spécifiques - article 3.

	Q. 1	Q. 2	Q. 3	Q. 4	Q. 5	Q. 6	Q. 7	Q. 8	Q. 9	Q. 10	Q. 11	Q. 12	Q. 13	Q. 14
Q. 1		0,11	0,23	0,09	0,12	0,36	0,05	0,15	0,52	0,45	0,15	0,20	0,16	0,26
Q. 2	0,12		0,04	-0,10	-0,03	-0,10	0,03	-0,09	-0,15	-0,26	-0,07	-0,05	-0,15	-0,10
Q. 3	0,28	0,05		0,03	-0,03	0,12	-0,03	0,03	0,17	0,06	-0,03	0,08	-0,01	0,10
Q. 4	0,10	-0,09	0,02		0,27	0,26	0,10	-0,02	0,04	0,10	0,04	0,31	-0,02	0,08
Q. 5	0,08	-0,02	-0,02	0,17		0,41	0,05	-0,01	0,09	0,25	0,17	0,00	-0,03	-0,02
Q. 6	0,24	-0,06	0,07	0,17	0,43		0,03	0,16	0,23	0,48	0,14	0,25	0,10	0,20
Q. 7	0,06	0,04	-0,03	0,12	0,10	0,05		-0,07	0,05	-0,06	0,10	0,25	0,07	-0,03
Q. 8	0,18	-0,10	0,03	-0,03	-0,02	0,29	-0,07		0,44	0,40	0,08	0,18	0,11	0,26
Q. 9	0,34	-0,09	0,09	0,02	0,09	0,22	0,03	0,23		0,50	0,18	0,34	0,22	0,27
Q. 10	0,29	-0,15	0,03	0,06	0,25	0,46	-0,03	0,21	0,49		0,20	0,20	0,28	0,24
Q. 11	0,13	-0,06	-0,02	0,03	0,23	0,18	0,08	0,06	0,23	0,27		0,15	0,18	0,27
Q. 12	0,14	-0,03	0,04	0,21	-0,01	0,25	0,14	0,10	0,36	0,22	0,12		0,14	0,16
Q. 13	0,11	-0,09	0,00	-0,01	-0,03	0,10	0,04	0,06	0,22	0,29	0,13	0,14		0,35
Q. 14	0,17	-0,06	0,05	0,05	-0,02	0,19	-0,01	0,13	0,27	0,24	0,20	0,15	0,35	

Tableau XXXIX - Indices de discrimination spécifique pondérés - article 3.

	Q. 1	Q. 2	Q. 3	Q. 4	Q. 5	Q. 6	Q. 7	Q. 8	Q. 9	Q. 10	Q. 11	Q. 12	Q. 13	Q. 14
Q. 1		-0,03	0,08	-0,05	-0,22	0,04	-0,06	-0,41	0,14	0,05	-0,04	-0,08	-0,24	-0,14
Q. 2	-0,05		-0,07	-0,18	-0,34	-0,30	-0,08	-0,59	-0,35	-0,44	-0,20	-0,26	-0,45	-0,39
Q. 3	0,04	-0,10		-0,12	-0,37	-0,20	-0,13	-0,58	-0,19	-0,29	-0,19	-0,22	-0,40	-0,31
Q. 4	-0,06	-0,16	-0,08		-0,13	-0,06	-0,03	-0,54	-0,23	-0,22	-0,13	-0,01	-0,36	-0,27
Q. 5	0,08	-0,01	-0,01	0,17		0,41	0,05	-0,01	0,09	0,25	0,17	0,00	-0,03	-0,02
Q. 6	0,20	-0,10	0,03	0,12	0,30		-0,01	-0,06	0,12	0,37	0,08	0,15	-0,04	0,07
Q. 7	-0,10	-0,10	-0,12	-0,06	-0,29	-0,23		-0,61	-0,26	-0,35	-0,11	-0,10	-0,35	-0,37
Q. 8	0,22	0,07	0,12	0,12	0,34	0,39	0,07		0,48	0,50	0,21	0,34	0,45	0,49
Q. 9	0,32	-0,11	0,07	-0,01	0,00	0,16	0,00	0,09		0,43	0,14	0,29	0,12	0,19
Q. 10	0,28	-0,16	0,02	0,05	0,22	0,44	-0,04	0,16	0,47		0,19	0,18	0,25	0,20
Q. 11	0,00	-0,13	-0,09	-0,07	-0,08	-0,05	-0,02	-0,39	-0,03	-0,02		-0,07	-0,15	-0,05
Q. 12	0,08	-0,07	0,00	0,16	-0,13	0,15	0,10	-0,12	0,25	0,09	0,05		-0,01	0,02
Q. 13	0,13	-0,07	0,02	0,01	0,04	0,15	0,06	0,17	0,27	0,34	0,16	0,19		0,41
Q. 14	0,17	-0,05	0,06	0,06	0,00	0,21	-0,01	0,17	0,28	0,25	0,21	0,17	0,37	

