

Investigations des élèves en science : une approche fondée sur la connaissance

Robin MILLAR

Department of Educational Studies
University of York
Heslington
York YO1 5DD, Grande-Bretagne.

(Traduit par Martine Méheut, Andrée Tiberghien et Laurence Viennot)

Résumé

Beaucoup s'accordent à penser que l'enseignement des sciences devrait parvenir à ce que les élèves comprennent ce qu'est l'approche scientifique de la recherche. L'analyse de tâches d'investigation scientifique typique met en évidence le large spectre des différents aspects de la compréhension requis pour réussir de telles tâches. Un modèle mettant en relation cette compréhension avec des performances, développé dans le cadre du projet «Connaissances conceptuelles et procédurales en sciences» (PACKS) est décrit brièvement ici. Deux parties de ce modèle, concernant le «cadre» d'investigation choisi par les élèves ainsi que leur manière de collecter et d'utiliser des données comme preuve, sont explorées dans le contexte d'une investigation sur l'isolation thermique. Dans cet article, la discussion montre la nécessité pour l'enseignement scientifique de faire évoluer les élèves d'une perception de l'investigation comme «recherche personnelle» vers celle d'une «recherche publique», où la preuve sur laquelle est fondée la conclusion est explicitée. Il apparaît également qu'un modèle de la performance en science fondé sur la connaissance constitue une meilleure base pour l'enseignement, la planification de curriculum et la recherche que les modèles fondés sur les habiletés.

Mots clés : *investigation, travaux pratiques, preuve, conceptions des élèves.*

Abstract

It is widely agreed that one outcome of school science should be an understanding, amongst students, of the scientific approach to enquiry. Analysis of typical science investigation tasks shows the wide range of understandings required to carry out such tasks successfully. A model linking aspects of understanding to elements of performance developed by the Procedural and Conceptual Knowledge in Science (PACKS) project is briefly described. Two parts of this model, concerned with the investigation «frame» chosen by students and their collection and use of data as evidence, are explored in the context of an investigation of thermal insulation. It is argued that school science needs to do more to move students from a perception of investigation as «personal enquiry» towards «public enquiry», where evidence for conclusions is displayed ; and that a knowledge-based model of science performance provides a better basis than skills-based models for teaching, curriculum planning and research.

Key words : *investigations, practical work, evidence, students' ideas.*

Resumen

Es ampliamente aceptado que uno de los resultados de la enseñanza de las ciencias debería ser que los alumnos comprendan lo que es el enfoque científico de la investigación. El análisis de tareas de la investigación científica típica pone en evidencia, el largo espectro de conocimientos personales requeridos para aprobar tales tareas. Un modelo, que ponga en relación esta comprensión con unas cualidades, desarrollado en el marco del proyecto «Conocimientos conceptuales y procedimentales en ciencias» (PACKS), es descrito brevemente. Dos partes de este modelo concernientes al «marco» de investigación seleccionado por los alumnos, así como su manera de coleccionar y de utilizar los datos como prueba, son explorados en el contexto de una investigación sobre la aislación térmica. En este artículo, la discusión muestra la necesidad de que la enseñanza científica pueda hacer evolucionar los alumnos, de una percepción de investigación como «investigación personal», hacia aquella de una «investigación pública», donde la prueba sobre la cual es fundada la conclusión es explicitada. Igualmente aparece que un modelo de la cualidad en ciencias fundado sobre el conocimiento, constituye una mejor base para la enseñanza, la planificación de currículum y la investigación que los modelos fundados sobre las habilidades.

Palabras claves : *investigación, prueba, trabajos prácticos, concepciones de alumnos.*

INTRODUCTION

L'apprentissage des sciences a plusieurs dimensions. Il nécessite de s'appropriier le contenu des sciences (les faits, idées, concepts, lois et théories acceptés), la manière dont les connaissances scientifiques se constituent (les méthodes et procédures en jeu dans l'activité de «faire la science»), et les interactions entre science et société. Ces trois éléments sont tous importants, qu'on pense aux sciences dans l'enseignement principalement comme un moyen de promouvoir une meilleure compréhension des sciences dans le public, ou comme la première étape d'une éducation et d'une formation pour la prochaine génération de scientifiques et d'ingénieurs.

Dans cet article, je voudrais me centrer sur la deuxième de ces trois dimensions : apprendre comment «faire la science». Ceci est important pour aider les élèves à apprécier sur quelles bases est fondée la confiance que l'on a dans les lois et théories de la science établie ; en réalisant des travaux pratiques guidés, les élèves sont amenés à voir la preuve sur laquelle s'appuie la compréhension. Il est également important d'aider les élèves à développer leur confiance dans leurs propres capacités à mener des recherches¹, à imaginer des moyens pour tester certaines de leurs propres questions et à jouer un rôle dans le développement de leur propre compréhension du monde naturel.

Au Royaume-Uni, jusqu'à très récemment, la plupart des élèves apprenaient l'activité de recherche² scientifique en réalisant en petits groupes des tâches pratiques à partir de consignes détaillées, et en observant leurs professeurs qui procédaient à des expériences de démonstration. La plupart de ces activités pratiques étaient conçues pour illustrer un aspect de la théorie que les élèves étaient en train d'étudier. Depuis le milieu des années 1980, le curriculum a renforcé l'importance des activités pratiques d'investigation ouverte. Une investigation dans l'enseignement est une tâche pratique où l'approche à suivre pour s'attaquer à une question ou résoudre un problème est ouverte – les élèves peuvent décider ce qu'il observent ou mesurent, ce qu'ils modifient ou manipulent, quel équipement ils utilisent (dans le cadre des ressources disponibles), etc. Le tableau 1 peut être utile dans la mesure où il résume les différences entre une investigation et une tâche pratique standard de laboratoire. Dans le «Curriculum National pour la Science», introduit la première fois en 1989, l'évaluation finale à l'âge de seize ans (la fin de l'enseignement scientifique obligatoire pour tous les élèves) a quatre composantes de même importance : biologie, chimie, physique et investigation pratique (DFEE/WO, 1995).

1. Nous avons traduit ici «*their own capabilities as enquirers*» par «leurs propres capacités à mener des recherches». Ici le mot «recherche» ne doit être pris au sens strict d'une recherche scientifique, mais au sens d'une investigation qui vise à trouver des preuves (NdT).

2. Nous avons ici aussi traduit par «recherche» le terme «*enquiry*» (NdT).

	Tâche pratique «standard»	Investigation
tâche/question	fermée	fermée ou ouverte
méthode	fermée	ouverte
conclusions	ouvertes	ouvertes

Tableau 1 : Types de tâche pratique

Note : «fermé» signifie spécifié par avance par le professeur, «ouvert» signifie que les élèves peuvent faire des choix.

1. RÉALISER UNE INVESTIGATION SCIENTIFIQUE : QU'EST-CE QUE L'ÉLÈVE A BESOIN DE SAVOIR ?

Tandis que les professeurs du Royaume-Uni s'accordent assez largement sur l'idée que les élèves devraient mener des investigations scientifiques, et être évalués sur leur habileté à les réaliser, le rôle prééminent des investigations scientifiques dans le Curriculum National a mis en lumière les difficultés à spécifier la nature de l'apprentissage dans ce domaine et à évaluer les progrès dans les performances des élèves et donc dans leur compréhension. Pour réfléchir sur ces questions, on peut considérer ce qui est en jeu dans une tâche spécifique d'investigation semblable à celle que demandent la plupart des professeurs à leur élèves. Imaginons qu'on demande à un élève d'étudier comment la résistance d'un fil de type donné dépend de sa longueur et de sa section. Qu'a-t-il besoin de savoir pour réaliser cette tâche, de la manière que nous, professeurs de sciences, souhaiterions ? Tout d'abord, il est clair qu'une certaine compréhension du contenu scientifique est nécessaire : l'élève a besoin de connaître ce que signifie une résistance (ce qui, de fait, est en relation avec une connaissance de base plus large sur les circuits électriques) et comment calculer la valeur d'une résistance à partir des mesures d'intensité et de différence de potentiel. Ensuite, il a besoin de savoir comment mesurer une résistance, ce qui suppose de savoir comment réaliser un circuit convenable, où placer l'ampèremètre et le voltmètre pour faire les mesures nécessaires et comment lire ces appareils de mesure. À un niveau plus sophistiqué, il peut avoir besoin de savoir qu'un appareil de mesure peut être placé dans le circuit de plusieurs manières, et que ce choix peut affecter l'exactitude de résultats. Ensuite il a besoin de savoir que, pour étudier l'effet de la longueur sur la résistance, il faut garder constante la surface de section et faire varier la longueur (et vice versa) ; et il a besoin de considérer le nombre de valeurs différentes de longueurs à prendre, quelle étendue elles doivent couvrir et quel intervalle il doit y avoir pour qu'il

puisse conclure de la façon dont il le désire (une comparaison, une tendance ou une relation). Sous-jacente à tout cela, il y a la compréhension mise en jeu dans la modélisation du phénomène en termes de variables et de leur interdépendance : deux variables indépendantes (longueur et section) affectant la valeur d'une variable dépendante (résistance). Ensuite, il doit reconnaître qu'une seule mesure d'une grandeur physique ne peut être considérée comme exacte – toutes les mesures sont sujettes à une erreur expérimentale inévitable, qui peut être plus ou moins grande. L'importance de celle-ci peut être estimée, et ses effets sur les conclusions finales réduits, en répétant chaque mesure plusieurs fois. Il peut être aussi utile de reconnaître la possibilité d'erreur systématique (un appareil de mesure défectueux), et de considérer les manières d'évaluer ou éliminer celle-ci (par exemple, en répétant certaines des mesures avec des appareils différents). La sophistication de la compréhension nécessaire dans ce domaine dépend en partie du type de conclusion que l'élève voudrait tirer. Par exemple, s'il désire simplement conclure qu'un fil long a une plus grande résistance qu'un fil plus court de même section, alors seules sont nécessaires deux mesures de résistance dont la différence entre les valeurs est sensiblement plus grande que la dispersion des mesures répétées. Mais si le but est de conclure que la résistance est proportionnelle à la longueur (plutôt que de conclure juste que la résistance augmente quand la longueur augmente), un traitement beaucoup plus sophistiqué des résultats, avec une prise en compte très soignée de l'erreur, est nécessaire.

Il est instructif de considérer maintenant une autre investigation, de structure très semblable, et de se demander quels aspects de la compréhension d'une investigation sont transférables (en principe au moins) d'un cas à un autre. Imaginons qu'on demande à un élève d'explorer la période d'un pendule en fonction de sa longueur, de la masse du pendule et de l'amplitude d'oscillation. Ceci implique des contenus de connaissance bien différents ; on peut dire en effet que très peu de connaissances conceptuelles, au-delà de celles de la vie quotidienne, sont nécessaires pour réaliser cette tâche. Celle-ci nécessite des capacités motrices différentes pour manipuler le dispositif ainsi que des connaissances sur des appareils de mesure différents. D'un autre côté, une compréhension de la situation en termes de dépendance des variables est aussi importante que dans le cas précédent, comme celle de savoir qu'on ne modifie qu'une variable indépendante à la fois, ou de décider le nombre, l'importance de l'intervalle entre valeurs à utiliser pour chaque variable indépendante. Des «tactiques» spécifiques sont utiles dans cette investigation alors qu'elles n'étaient pas nécessaires dans la première : savoir qu'il vaut mieux mesurer, disons, dix oscillations plutôt qu'une, et qu'il est préférable de démarrer et d'arrêter la mesure du temps quand le pendule est au milieu de l'oscillation – et, naturellement, savoir pourquoi c'est mieux de procéder ainsi. Alors que

l'interprétation des mesures requiert des aspects de la compréhension similaires à ceux relatifs à l'investigation sur la résistance, un aspect rend l'interprétation des résultats plus difficile : il est plus difficile de rassembler de bonnes preuves pour montrer qu'une variable indépendante n'a **pas** d'effet que pour montrer qu'elle en a. Ainsi, dans cet exemple, il est plus difficile de recueillir des données pour justifier l'affirmation que la masse du pendule n'a pas d'effet sur la période, que de montrer que la longueur a un effet. De plus l'effet de l'amplitude d'oscillation, qui est petite, est aussi plus difficile à montrer.

Ces exemples d'investigations spécifiques nous aident à prendre conscience de la diversité des aspects nécessaires à la compréhension que nous exigeons des élèves si nous leur demandons de réaliser des tâches de cette sorte – et que nous pouvons alors avoir à leur enseigner au préalable. Cela nous aide aussi à voir quels aspects de la compréhension peuvent être génériques, applicables à de nombreuses investigations, et lesquels sont spécifiques d'investigations dans un domaine scientifique, ou même à une investigation donnée. Le curriculum national du Royaume-Uni a mis l'accent sur des investigations qui mettent en jeu des interrelations entre variables. Mais si nous élargissons la notion d'«investigation scientifique», alors le type de compréhension nécessaire peut aussi changer.

2. INTERPRÉTATION DE LA PERFORMANCE DES ÉLÈVES DANS DES TÂCHES D'INVESTIGATION SCIENTIFIQUE

Différentes approches ont été utilisées ces dernières années par les enseignants en sciences pour développer et évaluer les capacités des élèves à réaliser une investigation scientifique. L'approche la plus commune a peut-être été de penser la performance en terme d'un ensemble d'«habiletés». L'analyse de Gagné (1965) sur la performance en sciences relative à des processus tels qu'observer, classer, formuler des hypothèses, contrôler des variables... a influencé la conception des curriculums en sciences, aux États-Unis et ailleurs, depuis les années 1960. Un autre cadre de référence est celui proposé par Klopfer (1971), avec des «*comportements*» scientifiques analysés en catégories telles que «*observer et mesurer*», «*voir un problème et chercher la façon de le résoudre*», «*interpréter des données et formuler des généralisations*»... Le modèle psychologique sous-jacent ici est celui de constructions mentales qui donnent lieu à des comportements observables. Cependant, il n'est pas évident que ces constructions soient stables ou bien définies. Par exemple, la performance d'un élève donné est très variable pour des tâches qui sont

considérées comme nécessitant les mêmes «habiletés» (Erickson et al., 1992 ; Lock, 1993). Le contenu et le contexte de la tâche jouent un rôle pour la plupart des variations observées dans les performances (APU, 1987 ; Qualter et al., 1990 ; Gott & Duggan, 1995).

Une alternative à un modèle de performance fondé sur des «habiletés», comme la discussion détaillée des deux exemples spécifiques donnés ci-dessus l'a déjà suggéré, est un modèle fondé sur la compréhension. La performance des élèves sur des tâches d'investigation est vue comme dépendant principalement de ce qu'ils savent et comprennent. Cette approche a été développée et utilisée dans le projet «Connaissances conceptuelles et procédurales en sciences» (*Procedural and Conceptual Knowledge in Science, PACKS*). Dans la suite de cet article, je voudrais donner les grandes lignes du travail mené dans ce projet, et utiliser un petit échantillon des résultats obtenus pour montrer comment un modèle fondé sur la compréhension peut être utilisé comme base pour des recherches sur la capacité des élèves à «faire la science», et pour la conception d'un enseignement qui pourrait développer cette capacité.

3. LE PROJET PACKS

Les buts principaux de ce projet PACKS sont :

- développer un modèle reliant des aspects spécifiques de la performance des enfants dans des tâches d'investigation scientifique aux compréhensions personnelles qui sont sous-jacentes à leurs actions ;
- utiliser ce modèle pour explorer les différences dans les performances des enfants quand ils mènent des investigations scientifiques, en fonction de leur âge et de leur expérience dans la pratique de la science.

La première, et la plus importante phase du projet, concerne des groupes d'enfants se situant à trois niveaux d'âge entre neuf et quatorze ans ; on leur a demandé de réaliser une tâche d'investigation en physique ou en biologie, parmi les sept tâches données dans le tableau 2.

Les groupes ont travaillé dans le cadre d'un enseignement normal de classe. Nous avons demandé à chacun de donner ses attentes et ses prédictions avant de démarrer. Les actions ont été enregistrées en utilisant une grille d'observation et des notes. Un chercheur a demandé aux élèves les raisons de leurs actions, et des entretiens impromptus ont été enregistrés pendant que les groupes travaillaient. Les productions écrites des élèves donnant leurs résultats et leurs conclusions ont été recueillies. Des tests de diagnostic ont été spécialement développés ; ils portent sur les aspects déclaratifs de la compréhension (tests sur les concepts) et sur la capacité

à manipuler des données (tests sur les données). Ces tests ont été utilisés, après l'investigation, pour construire un profil de la compréhension explicite par les élèves des idées clés en jeu dans l'investigation. L'échantillon comportait seize groupes d'élèves à chacun des trois niveaux d'âge pour chaque investigation, soit au total cinq cents élèves (pour plus de détails sur les tâches et les méthodes de recherche, voir Millar et al., 1994).

Crevettes	Trouver si les crevettes préfèrent des conditions de lumière ou d'obscurité, si elles préfèrent être près de la surface de l'eau ou en profondeur.
Boisson fraîche	Trouver comment l'épaisseur des matériaux garnissant un sac isotherme pour boissons fraîches affecte la qualité de ce sac (pour la conservation de la fraîcheur).
Buggy	Trouver comment la vitesse d'un buggy fonctionnant avec une pile dépend du diamètre des roues et du poids du buggy.
Dissolution 1	Trouver la rapidité avec laquelle quatre sucres différents se dissolvent dans de l'eau froide du robinet et les classer de celui qui se dissout le plus vite à celui qui se dissout le moins vite.
Dissolution 2	Trouver comment la température de l'eau affecte le temps que met le sucre à se dissoudre.
Forces 1	Trouver comment le type de surface affecte la force nécessaire pour tirer une brique.
Forces 2	Trouver comment l'angle d'une pente affecte la force nécessaire pour remonter une brique.

Tableau 2 : **Tâches d'investigation utilisées dans le projet PACKS**

Dans la seconde phase du projet, deux tests écrits de diagnostic, conçus pour mettre au jour les idées des enfants sur la mesure et l'interprétation des données, ont été élaborés et administrés à des échantillons représentatifs d'élèves d'habiletés variées ; ces échantillons étaient composés de deux cents élèves de douze ans, deux cents de quatorze ans et cent de seize ans. Le but de cette enquête était d'établir la fréquence des différentes idées sur la mesure et les données identifiées dans la phase 1, en utilisant un échantillon d'élèves plus important au niveau de l'école secondaire (entre onze et seize ans). Les enfants de neuf ans n'ont pas été inclus car les essais pilotes ont montré que la plupart des enfants de cet âge n'étaient pas capables de répondre de manière adéquate aux tests écrits.

Analyse des données

Toutes les données recueillies auprès de chaque groupe d'élèves ont donné lieu à un procès-verbal (*case record*) de la performance du groupe. Un état des stades de performance dans la tâche d'investigation a été élaboré, en incorporant des extraits de la discussion interne au groupe et des entretiens impromptus faits par le chercheur quand c'était possible. À partir du déroulement dans le temps de l'investigation, un résumé des principales étapes et décisions des élèves a été établi. Les réponses aux items du diagnostic ont été codées, en utilisant un code élaboré à partir des réponses des élèves.

4. UN MODÈLE RELIANT COMPRÉHENSION ET PERFORMANCE

Le but principal du projet PACKS était d'élaborer un modèle reliant la compréhension et la performance correspondant à une investigation. Au niveau le plus simple, on pourrait penser que la réponse d'un élève à une tâche d'investigation donnée implique la sélection et l'utilisation d'idées tirées de la mémoire à long terme en réponse aux stimuli de la tâche elle-même. Les idées ainsi sélectionnées conduisent alors à une série d'actions (figure 1).

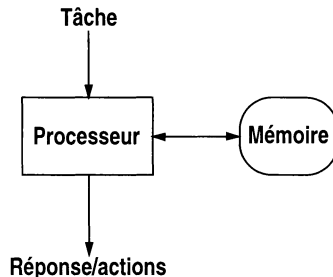


Figure 1 : Un modèle simple de réponse à une tâche d'investigation

Le but devient alors de représenter au mieux les contenus de la boîte «mémoire». Le modèle PACKS a commencé par l'analyse de ce qui est demandé à l'élève dans la tâche, comme cela a été illustré précédemment ; il a été ensuite modifié et étendu à la lumière des observations faites sur les élèves au cours des tâches d'investigation. Dans sa forme finale (figure 2), le modèle essaie de montrer les points pour lesquels quatre aspects différents de la compréhension peuvent influencer les choix spécifiques

faits par les élèves quand ils réalisent une tâche. Le modèle PACKS est donc le résultat d'une analyse *a priori* affinée et modifiée à la lumière des données empiriques. Le côté droit du modèle montre les étapes d'une investigation typique. Celle-ci ne peut bien entendu pas être linéaire, mais peut inclure des boucles entre une étape plus tardive et une étape plus précoce, à la lumière des événements (comme, par exemple, dans le modèle proposé par l'Unité d'Évaluation de la Performance (Assessment of Performance Unit, APU, 1987, p. 24)) ; nous ne les avons pas indiquées ici uniquement par souci de clarté. Le passage d'une étape à l'autre suppose des décisions et des choix implicites ou explicites. Les quatre catégories de compréhension, situées à gauche de la figure, interviennent dans ces décisions et ces choix de différentes manières. Dans le projet PACKS, nous avons choisi de nous centrer sur les compréhensions des boîtes A et D. Dans les paragraphes suivants, j'utiliserai les données extraites d'une investigation pour illustrer celles-ci.

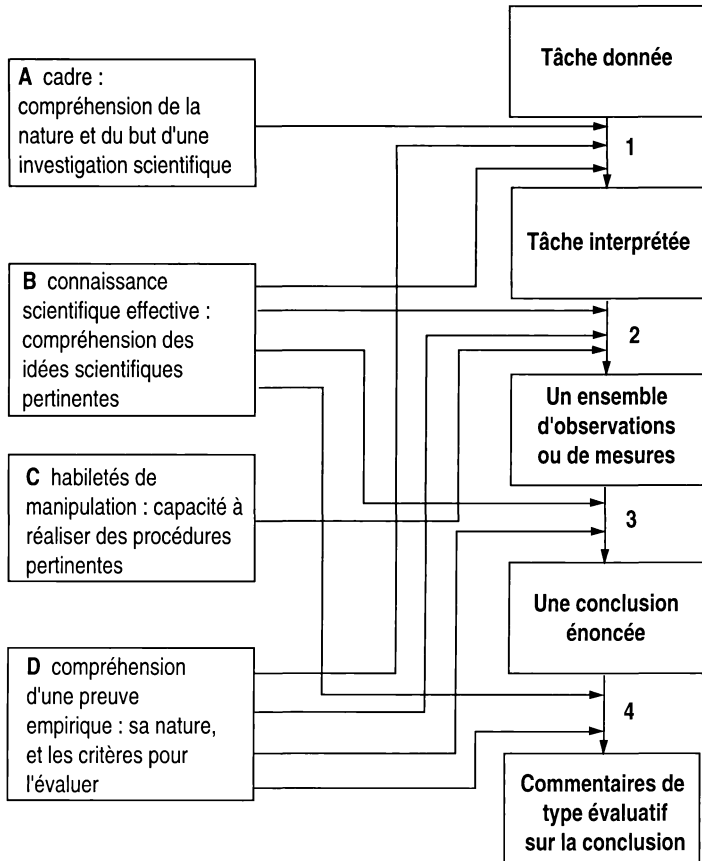


Figure 2 : Le modèle PACKS reliant compréhension et performance dans l'investigation

4.1. Compréhension du but ou de l'objet de la tâche d'investigation (cadre)

Dans le modèle PACKS (figure 2), la boîte A réfère à la compréhension, par les élèves, du but de la tâche d'investigation qu'ils sont en train de réaliser. C'est ce que nous appelons «leur cadre d'investigation». Notre prise de conscience de la signification du «cadre» provient d'abord de notre observation des élèves réalisant des tâches et non de notre analyse initiale. Il est plus facile d'illustrer ce que nous signifions par «cadre» en considérant une tâche spécifique.

Une de nos tâches d'investigation, la tâche *Boisson fraîche*, a pour contexte l'utilisation d'un sac isotherme pour garder fraîche une boisson par temps chaud. On demande aux enfants de «déterminer comment l'épaisseur du matelassage influe sur la qualité du sac isotherme». Pour cette tâche, étaient fournis aux groupes d'enfants une horloge, un thermomètre, et un ensemble de récipients tels que bechers et éprouvettes graduées. Ils disposaient d'une réserve d'eau refroidie par de la glace, mais l'utilisation d'eau du robinet de n'importe quel type n'était pas exclue. Ils avaient également accès à une réserve de trois sortes de matériaux d'emballage courant : molleton, emballage à bulles et mousse. On montrait à chaque groupe comment on pouvait faire varier l'épaisseur de l'emballage en utilisant un plus ou moins grand nombre de couches. Les réponses à cette tâche ont mis en évidence un certain spectre de compréhensions du but ou objet de la tâche ; les groupes ont utilisé différents «cadres» d'investigation. (On en trouvera un compte-rendu plus détaillé dans Lubben et Millar, 1994.) Nous avons noté des exemples de quatre cadres, ou conceptualisations de la tâche, distincts (trois d'entre eux ont été ensuite subdivisés) :

Cadre d'engagement	1	Engagement et activité utilisant le matériel proposé sans plan ou but évident
Cadre de modélisation	2A	Modélisation pour produire un aspect physique souhaité
	2B	Modélisation pour produire un effet souhaité
	2C	Modélisation pour produire un phénomène souhaité
Cadre d'ingénierie	3A	Ingénierie au hasard : optimisation de l'effet souhaité par essai et erreur
	3B	Ingénierie par itération : recherche d'une combinaison de facteurs optimisant l'effet souhaité

Cadre scientifique	4A	Scientifique empirique (comparaison) : utilisation de deux valeurs (souvent des valeurs extrêmes) de variables indépendantes
	4B	Scientifique empirique (tendance) : utilisation d'au moins trois valeurs de variables indépendantes pour repérer une tendance
	4C	Scientifique empirique (relation) : utilisation d'au moins trois valeurs de variables indépendantes pour établir une relation fonctionnelle
	4D	Scientifique explicatif : utilisation de mesures pour tester une prévision fondée sur un modèle explicatif, moyen pour explorer l'utilité de ce modèle

La distinction entre modèle «d'ingénierie» et modèle «scientifique» d'expérimentation a été discutée par Schauble, Klopfer et Raghavan (1990). Dans notre classification des «cadres», nous poussons cette distinction plus loin en subdivisant les deux catégories ingénierie et scientifique et en ajoutant de nouveaux cadres. Les termes doivent, bien sûr, être pris comme des étiquettes et n'impliquent pas une vision de la manière dont de vrais ingénieurs et de vrais scientifiques approchent la recherche ! Bien que présentés suivant un certain ordre, ces cadres ne sont pas nécessairement hiérarchisés : pour certaines tâches, un cadre d'ingénierie ou même un cadre de modélisation peut être parfaitement approprié. Si, cependant, les élèves réinterprètent une tâche posée dans un cadre scientifique et la traitent dans un cadre d'ingénierie, ceci peut être considéré comme témoignant d'un manque de clarté quant aux buts de l'investigation, et peut-être plus généralement sur l'investigation scientifique.

Pour un petit nombre de groupes, l'investigation est apparue caractérisée par l'activité – le pressant besoin de «faire quelque chose», dans l'apparente conviction que cela répondrait aux demandes de la tâche. Ceci a été repéré plus fréquemment chez des élèves de neuf ans que de douze ou treize ans.

Plusieurs indicateurs ont été retenus pour caractériser le cadre de modélisation 2A. L'un était une justification explicite du choix de l'éprouvette graduée comme récipient en raison de sa similitude de forme, par exemple «*parce qu'il ressemble plus à un sac isotherme*» (affirmation de plusieurs groupes de douze et quatorze ans), assortie du commentaire : «*nous aurions dû le tester avec une vraie bouteille de boisson*» (un groupe de quatorze ans). Un autre indicateur était l'emballage sans discrimination du

récepteur dans le matelassage. Des commentaires typiques associés à cette réponse sont : «*Nous avons fait un vrai sac isotherme. Il y en a [l'emballage à bulles] tout autour.*» «*Les sacs isothermes sont toujours comme ça. Ils sont tout couverts. Partout. Pour garder les aliments frais, et la boisson fraîche.*» (groupe de quatorze ans). Un autre groupe d'élèves de quatorze ans expliquent leur choix pour la période d'observation : «*Nous avons essayé [de mesurer le changement de température] pendant deux minutes et ça n'a pas changé. Donc nous allons essayer plus longtemps.*» «*Oui, parce que si vous avez une boisson fraîche, vous n'allez pas la mettre dedans, et la boire deux minutes après, n'est-ce pas ?*»

Le cadre de modélisation 2B diffère de ce dernier par le but qui n'est pas de faire un modèle physique d'un objet mais plutôt de produire un effet souhaité, dans le cas présent une diminution de température. On est en présence d'un indicateur du cadre 2B lorsque des groupes travaillent avec un seul dispositif et cherchent seulement à établir si leur dispositif «*marche*» (groupes de tous âges). Quelques groupes signifient qu'ils travaillent dans ce cadre quand ils considèrent que les mesures qui ne montrent pas une température constante ou décroissante indiquent un «*échec*» ou sont la preuve que «*l'expérience ne marche pas*» (groupes de tous âges), au point même qu'ils ne tirent aucune conclusion et rapportent seulement ces indications. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour faire baisser la température : ajouter davantage d'eau, ou réarranger le matériau isotherme (un groupe de neuf ans, un de quatorze ans), essayer un autre matériau isotherme (un groupe de douze ans), tasser le matériau isotherme dans le becher (un groupe de neuf ans), plonger le matelassage autour du récepteur dans un mélange eau-glace (un groupe de neuf ans), utiliser de la nouvelle eau froide, ou en ajouter (groupes de neuf et onze ans), utiliser différents types d'eau, y compris de l'eau chaude du robinet qui donne lieu à une chute de température satisfaisante (un groupe de neuf ans).

Un cadre d'ingénierie au hasard (3A) a été utilisé fréquemment par des groupes des trois âges ; ainsi en est-il lorsque des groupes décident de «*trouver quel type de matériau est le meilleur pour que le liquide reste froid*», ou lorsque l'efficacité de différentes combinaisons de matériaux est comparée (groupes de tous âges). Il y a là une complète re-formulation de la tâche donnée, qui se focalise sur le type de matériau plutôt que sur l'épaisseur du matériau comme variable indépendante. Un cadre d'ingénierie similaire peut, cependant, être adopté en prenant l'épaisseur comme variable indépendante : la tâche est conceptualisée comme devant trouver l'épaisseur qui fait chuter la température au maximum (groupes de neuf et quatorze ans) ou au plus vite. Un groupe de quatorze ans a utilisé quatre bechers avec des épaisseurs croissantes de mousse, dans l'intention de «*mesurer combien de temps cela prend pour que la température chute dans chaque becher et*

voir lequel marche le mieux». Quelques groupes montrent qu'ils utilisent un cadre d'ingénierie au hasard (3A) quand, lorsqu'on leur demande de tirer des conclusions, ils les formulent en termes d'optimum.

Le cadre scientifique (comparaison) (4A) est caractérisé par l'utilisation de deux épaisseurs et une conclusion tirée en termes de comparaison (ou même de tendance) (groupes de tous âges). L'exemple suivant provient d'un groupe de quatorze ans.

Pour leur premier essai les garçons mesurent la température à intervalles de une minute pendant cinq minutes pour deux bechers contenant cent millilitres d'eau froide du robinet, l'un enveloppé d'une couche, l'autre de deux couches de molleton «*pour voir si deux couches la gardent plus fraîche*». La température de départ est indiquée comme étant de quatorze degrés pour chaque becher. Les résultats (sous forme de tableau) montrent qu'au bout de cinq minutes, la température augmente de quatorze à seize degrés avec une couche, et de quatorze à quinze degrés avec deux couches. Les garçons concluent que «*plus l'isolation est épaisse, plus l'eau reste froide longtemps*». Ils généralisent à partir d'une comparaison sur deux points.

Lorsqu'un cadre scientifique (tendance) (4B) a été adopté, les groupes ont utilisé plus de deux points de mesure (nombreux exemples dans des groupes de douze et quatorze ans). L'exemple suivant correspond à un groupe de quatorze ans.

Au premier essai les garçons prévoient d'utiliser dix millilitres d'eau refroidie par de la glace dans une éprouvette enveloppée dans une couche de mousse, et mesurent la température toutes les minutes pendant dix minutes, y compris une mesure dès le début. Ils utilisent la même procédure pour une éprouvette graduée sans aucun matelassage, et respectivement avec deux et trois couches de mousse. Les températures finales décroissent avec l'augmentation du nombre de couches de matelassage. Ils concluent que «*plus on met de matelassage, plus ça reste frais*» ou «*plus il y a de l'isolation, plus cela prend de temps pour devenir tiède*».

Tracer un graphe de variation de la température en fonction de l'épaisseur, ou établir la conclusion en termes de relation («*lorsque l'épaisseur augmente, l'élévation de température en dix minutes diminue*»), ont été pris comme indicateurs d'un cadre scientifique (relation) (4C).

Il semble que certains groupes aient modifié leur cadre au cours de l'investigation, ou aient utilisé des cadres différents pour mener à bien la tâche et pour établir les conclusions, mais les trois quarts des groupes ont utilisé un cadre stable (cadre 2, 3 ou 4) durant l'investigation. Il est également intéressant de noter qu'environ soixante quinze pour cent des

changements de cadre qui sont apparus ont abouti à un cadre d'ingénierie. Ceci constitue un progrès pour les groupes qui partaient d'un cadre de modélisation, et nous pourrions en conclure qu'un apprentissage s'est effectué durant l'investigation. Plusieurs groupes, cependant, ont régressé d'un cadre scientifique à un cadre d'ingénierie.

Le tableau 3 résume les choix de cadre pour l'investigation *Boisson fraîche* des élèves des trois classes d'âge en question. Lorsqu'un groupe a utilisé plus d'un cadre au cours de la tâche, on a considéré le cadre qu'ils ont utilisé en formulant leurs conclusions comme leur cadre «principal». Ce tableau montre un mouvement entre neuf et douze ans du cadre de modélisation vers le cadre d'ingénierie. Un autre changement se produit entre douze et quatorze ans, du cadre d'ingénierie vers le cadre scientifique. Cependant, même à quatorze ans, moins de la moitié des groupes ont utilisé un cadre scientifique pour une tâche formulée dans ce cadre, et le choix d'un cadre d'ingénierie est encore très courant. (Pour une discussion plus complète sur la progression dans la performance, voir Millar et al., 1996.)

Cadre «principal»	9 ans	12 ans	14 ans
cadre de modélisation	6 (37)	6 (19)	7 (22)
cadre d'ingénierie	6 (37)	17 (53)	13 (41)
cadre scientifique	4 (25)	9 (28)	12 (37)
TOTAL	16 (100)	32 (100)	32 (100)

Tableau 3 : Nombre de groupes ayant choisi un cadre d'investigation (pourcentages entre parenthèses)

Ceci semble suggérer que beaucoup d'élèves, et ceci jusqu'à quatorze ans, trouvent plus facile de donner une signification personnelle à une tâche pratique, conçue en termes d'optimisation, ou de mise au point. À savoir qu'une tâche orientée de manière plus pratique est plus facilement prise en charge et davantage d'élèves trouvent possible de donner sens à l'objet de la tâche, que si elle est formulée en des termes plus abstraits d'exploration de relations entre variables «pour leur seul intérêt». Dans chacun des cadres, ingénierie et scientifique, de nombreux élèves ont traité la tâche comme une «recherche personnelle» : leur but était de satisfaire leur propre curiosité sur ce qui se passait. Ainsi, une comparaison de deux cas s'est révélée suffisante pour convaincre nombre d'entre eux que «*plus le matelassage est épais, mieux ça marche*», comme dans la vie de tous les jours ; et de très petites différences entre les mesures dans différents cas ont été considérées comme significatives. Peu d'entre eux semblent avoir franchi le pas d'une «recherche personnelle» à une «recherche publique»,

dans lequel l'important est la nécessité de constituer la preuve pour persuader les autres de ses propres conclusions. Je reviendrai plus tard sur cette question.

4.2. Compréhension de la preuve expérimentale

Dans beaucoup de procès-verbaux des séances de groupe de travail expérimental collectés durant le projet PACKS, on relève un trait frappant : la façon peu convaincante dont les élèves manipulent les données empiriques. Nombreux sont ceux qui apprécient mal les faiblesses ou les incertitudes éventuelles dans leurs données, même quand celles-ci sont manifestes pour un observateur extérieur. Peu d'élèves font la démarche de vérifier ou d'améliorer la qualité de ces données, même quand ils auraient pu facilement le faire en répétant mesures ou observations. La seule situation qui provoque immanquablement un retour sur une mesure est celle où quelque chose a manifestement été de travers dans l'opération de mesure. Si bien que les données collectées apparaissent souvent comme le produit final de l'expérimentation, plutôt que comme une **preuve** sur laquelle appuyer une conclusion.

Un exemple peut illustrer la manière qu'ont les élèves d'exploiter des données expérimentales. Cet extrait provient de l'enregistrement d'un groupe d'adolescents (quatorze ans) travaillant sur la tâche *Boisson fraîche*.

[Après une première tentative au cours de laquelle ils cherchent à mesurer le temps que met la température pour augmenter de façon observable] ... leur deuxième essai consiste à mesurer l'augmentation de température au bout de quinze minutes, et ceci simultanément pour trois bechers d'eau glacée (sans couvercle) enveloppés d'épaisseurs croissantes de mousse. La variable dépendante n'est plus l'intervalle de temps mais l'augmentation de température. Les températures finales des bechers entourés d'une, deux ou trois couches sont respectivement dix, six et huit degrés Celsius. Les élèves concluent que «*le mieux est de mettre deux couches*».

Voilà donc un résultat qui semble anormal, et que les élèves considèrent sans la moindre question comme valide et fiable. Bien différente est la réaction d'un autre groupe (des élèves de douze ans), face à des écarts de températures faibles et de même ordre de grandeur :

Chaque membre du groupe remplit un tableau comme suit.

Temps (en minutes)	Température (C) molleton + mousse	Température (C) emballage à bulles + mousse
0	7	7
1	3	4
2	4	4
3	3	4
4	4	4
5	5	5
6	6	7
7	5	7
8	5	6
9	6	6
10	6	7

Le groupe ne conclut pas, considérant que «*les résultats n'indiquent pas quel est le meilleur isolant*».

Dans ce cas, l'usage simultané de deux matériaux pour chaque becher est la marque d'une compréhension imparfaite de la tâche (au mieux un cadre de modélisation ou d'ingénierie), mais l'interprétation des données recueillies témoigne, dans cet exemple, d'une compréhension adéquate de la preuve expérimentale.

En parlant d'une compréhension de la preuve expérimentale, nous avons en tête un certain nombre d'aspects du travail des élèves :

- des indices qu'ils sont conscients qu'il y a (inévitablement) de l'incertitude dans leurs données ;
- des indices qu'ils connaissent des manières d'évaluer le degré d'incertitude attaché à leurs données ;
- des indices qu'ils savent minimiser l'incertitude attachée à leurs données ;
- une réticence à tirer une conclusion ferme à partir de différences minimales dans leurs mesures, ou une volonté de conclure qu'«*on ne peut pas conclure clairement*».

Peut-être les indices les plus sûrs sont-ils la décision de répéter des mesures, et l'usage qui en est fait. D'autres sont parfois fournis par la réaction à des données apparemment anormales. Le choix des valeurs des paramètres, des variables de contrôle et des variables indépendantes, ainsi que la précision avec laquelle les mesures sont faites peuvent également servir d'indicateurs.

En ce qui concerne la tâche *Boisson fraîche*, nous nous sommes fondés sur l'éventail des valeurs choisies pour la variable indépendante (l'épaisseur de l'enveloppe), la durée sur laquelle les changements de

température sont évalués, la précision des mesures de la température et l'appréciation de la valeur indicative des faibles différences. La démarche de chaque groupe d'élève a été évaluée comme «faible», «moyenne», ou «bonne» pour chacun des ces aspects. Par exemple, en matière d'interprétation des faibles différences, nous avons observé une nette amélioration entre neuf et douze ans ($\chi^2 = 6,96$, 2 df ; $p < 0,05$), mais peu d'amélioration ensuite, vers quatorze ans (voir tableau 4).

Niveau de compréhension	9 ans	12 ans	14 ans
«faible»	9	12	10
«partiel»	6	8	11
«bon»	1	12	11
TOTAL	16	32	32

Tableau 4 : **Compréhension manifestée dans l'interprétation de données ayant de faibles différences (dans la tâche)**. Nombre de groupes pour chaque catégorie de réponse

Avec chaque tâche d'investigation expérimentale, nous avons également recueilli les réponses d'élèves à un jeu de tests diagnostiques portant sur des aspects de la mesure, du traitement et de l'interprétation des données. Ces tests ont été administrés juste après la fin de la séance d'investigation expérimentale. Les questions posées mettent en jeu un contexte différent et portent sur l'intérêt plus ou moins grand et sur le but de mesures répétées, sur l'usage de celles-ci ainsi que sur l'interprétation de faibles différences. Nous voulions voir dans quelle mesure ce que les élèves semblaient avoir compris de la preuve expérimentale dans le contexte de la tâche rejoignait ou non leurs réponses à des questions explicites posées lors de ces tests diagnostiques.

Les tableaux 5 et 6 montrent la progression avec l'âge de la façon dont les élèves comprennent le but de mesures répétées, et de leur aptitude à traiter ces données.

	9 ans	12 ans	14 ans
Répéter n'aide pas	5	4	0
Répéter aide à confirmer	8	9	4
Répéter aide à augmenter l'exactitude	2	10	15
Répéter aide à traiter la dispersion	-	9	12
Pas de réponse	1	-	1
TOTAL	16	32	32

Tableau 5 : **Idées des enfants concernant la répétition de mesures (lors du test)**. Nombre de groupes pour chaque type de réponse

	9 ans	12 ans	14 ans
Sélectionner une valeur extrême	6	4	3
Sélectionner la valeur la plus fréquente	4	6	1
Comparer les totaux	4	13	13
Comparer les moyennes	1	8	11
Pas de réponse	1	1	4
TOTAL	16	32	32

Tableau 6 : **Utilisation de mesures répétées (lors du test)**. Nombre de groupes pour chaque type de réponse

En notant les groupes sur une échelle à trois niveaux (0, 1, 2) pour une série d'indicateurs de compréhension de la preuve expérimentale, et ceci dans l'accomplissement de la tâche comme dans les tests diagnostiques, nous pouvons évaluer le degré de corrélation entre le niveau de compréhension implicite dans l'action et celui qui apparaît explicitement en réponse aux items diagnostiques. Le tableau 7 résume ceci pour la tâche *Boisson fraîche* comme pour les tests associés. Le coefficient de corrélation de Pearson est 0.38 (N=75 ; $p < 0.005$), ce qui traduit une association nette entre les deux mesures. (Cinq des 80 groupes ont donné des réponses qui ne sont pas assez claires pour être codées.)

score des élèves (lors des tests)	score des élèves (pour la tâche)		
	haut	moyen	bas
haut	12	6	3
moyen	8	19	5
bas	4	7	11

Tableau 7 : **Scores relatifs à la compréhension de la fiabilité dans l'investigation *Boisson fraîche* et lors des tests**. Nombre de groupes par combinaison de scores

Cependant, ce type d'association n'apparaît pas pour toutes les tâches d'investigation. Il est probable que certains détails spécifiques de tel ou tel test aient une influence significative sur les réponses ; ces tests doivent être considérés comme spéculatifs, et leur interprétation menée avec quelque précaution. De notre expérience d'observation des élèves réalisant des investigations, il nous apparaît clairement que, dans certaines investigations, la manipulation du matériel expérimental amène les élèves à ressentir le besoin de modifier et d'améliorer leurs procédures de recueil de données, bien autrement que les tests diagnostiques écrits.

Si nous regardons, plus généralement, de quelles manières les élèves traitent les problèmes de recueil de données, la présentation et l'usage de celles-ci comme preuve expérimentale, nous avons à nouveau le sentiment que, pour de nombreux élèves et groupes d'élèves, une investigation expérimentale est, au mieux, un exercice de recherche personnelle plutôt que publique. Je dis «au mieux» car il ressort non moins clairement d'observations d'élèves au travail que beaucoup traitent la tâche d'investigation comme un exercice scolaire artificiel, dont le but est de suivre certaines étapes et procédures qui vont satisfaire les attentes du professeur. De ce point de vue, cette tâche ressemble à beaucoup d'activités d'apprentissage qui se déroulent dans les classes dans tous les domaines. Peu d'élèves se comportent comme s'ils considéraient que leur recherche était un acte authentique de découverte sur le monde. Il est probablement déraisonnable d'attendre cela d'eux. En revanche, beaucoup se comportent effectivement comme si ce qu'ils trouvaient était une découverte **pour eux-mêmes**. Cependant, ceci entraîne que leurs standards de «preuve expérimentale» sont ceux qui les rendent confiants dans la réponse, ou au moins leur procurent une confiance à la mesure de leur engagement dans la tâche et de la perception qu'ils ont de son importance. Sans doute l'idée fondamentale que les élèves doivent apprendre au sujet de l'investigation scientifique est qu'elle vise la connaissance publique – des conclusions que l'on peut présenter et défendre ouvertement, la preuve expérimentale à l'appui de toute conclusion étant exhibée de manière claire et convaincante.

5. CONSÉQUENCES POUR L'ENSEIGNEMENT ET POUR LA RECHERCHE

Le paragraphe précédent se termine en soulignant une conséquence importante du projet PACKS pour l'enseignement de l'investigation scientifique. Nos analyses des réponses d'élèves concernant leur choix de cadre de recherche, d'une part, leur usage des données comme preuve expérimentale, d'autre part, indiquent l'une et l'autre qu'il faut expliciter les buts de l'investigation expérimentale en science auprès des élèves. Ceci afin qu'ils prennent conscience qu'il est nécessaire de prouver les conclusions, et qu'ils apprennent comment recueillir et traiter des données pour qu'elles **en viennent à constituer**, précisément, une preuve expérimentale. Plus fondamentalement, le projet PACKS propose un modèle de la pratique de la science qui se fonde sur la connaissance, et il a exploré l'utilité d'un tel modèle comme outil de recherche et comme base d'un enseignement visant à développer chez les élèves leur capacité à mener des tâches d'investigation. Ceci fournit une alternative aux modèles fondés sur des habiletés, lesquels ont, jusqu'à présent, dominé le débat sur cet aspect de l'éducation scientifique,

mais dont les bases expérimentales sont faibles. Comparé à ceux qui se fondent sur les habiletés, un modèle fondé sur la connaissance fournit un cadre plus clair pour les décisions curriculaires, car il offre une «carte» du domaine d'apprentissage et une base pour déterminer des séquences d'enseignement.

De la même façon, une approche de ce type – fondée sur la connaissance – pour comprendre la pratique de l'investigation scientifique ouvre un nouveau champ de recherche : explorer les aspects de la compréhension en cause dans la conduite de tâches pratiques, comme on l'a fait pour la plupart des contenus scientifiques lors des dernières décennies (voir par exemple Driver et al., 1994 ; Pfundt & Duit, 1994). Une telle approche permet aussi de contrôler plus précisément les exigences cognitives des tâches et de gérer avec plus d'acuité la progression des élèves vers le niveau de performance désiré.

Tout en analysant la pratique de l'investigation scientifique, certains aspects de compréhension de «comment faire la science» vont rester inévitablement tacites. Nous ne pouvons aspirer à enseigner la créativité et le flair qui font l'expérimentateur talentueux. Mais nous **pouvons** améliorer notre enseignement des fondements de l'investigation scientifique et des bases nécessaires de toute recherche publique en science, en amenant la plupart des élèves à suffisamment de compréhension pour qu'ils puissent mener des tâches d'investigation de routine de façon compétente et correcte.

BIBLIOGRAPHIE

- ASSESSMENT OF PERFORMANCE UNIT (APU) (1987). *Assessing Investigations at ages 13 and 15. Science Report for Teachers*, n°9. London, DES.
- DEPARTMENT FOR EDUCATION AND EMPLOYMENT/WELSH OFFICE (DFEE/WO) (1995). *Science in the National Curriculum*. London, HMSO.
- DRIVER R., SQUIRES A., RUSHWORTH P. & WOOD-ROBINSON V. (1994). *Making Sense of Secondary Science. Support Materials for Teachers*. London, Routledge.
- ERICKSON G., BARTLEY R.W., BLAKE L., CARLISLE R.W., MEYER K. & STAVY R. (1992). *British Columbia assessment of science 1991 technical report II : Student performance component*. Victoria, B.C., Ministry of Education and Ministry Responsible for Multiculturalism and Human Rights.
- GAGNÉ R.M. (1965). The psychological basis for Science - A Process Approach. In *AAAS miscellaneous publication*. Washington, DC, American Association for the Advancement of Science, pp. 65-68.
- GOTT R. & DUGGAN S. (1995). *Investigative Work in the Science Curriculum*. Buckingham, Open University Press.
- KLOPFER L.E. (1971). Evaluation of learning in science. In B.S. Bloom, J.T. Hastings & G.F. Madaus (Eds), *Handbook of Formative and Summative Evaluation of Student Learning*. New York, McGraw-Hill, pp. 559-642.

- LOCK R. (1993). Assessment of practical skills. Part 2 : Context dependency and construct validity. *Research in Science and Technological Education*, vol. 8, n°1, pp. 35-52.
- LUBBEN F. & MILLAR R. (1994). *Children's responses to the Cool drink task and probes. PACKS Research Paper 1*. York/Durham, Department of Educational Studies/School of Education.
- MILLAR R., LUBBEN F., GOTT R. & DUGGAN S. (1994). Investigating in the school science laboratory : conceptual and procedural knowledge and their influence on performance. *Research Papers in Education*, vol. 9, n°2, pp. 207-249.
- MILLAR R., GOTT R., LUBBEN F. & DUGGAN S. (1996). Children's performance of investigative tasks in science : A framework for considering progression. In M. Hughes (Ed.), *Progression in Learning. BERA Dialogues 11*. Clevedon, Multilingual Matters Ltd, pp. 82-108.
- PFUNDT H. & DUIT R. (1994). *Bibliography : Students' Alternative Frameworks and Science Education*, 4e éd. Kiel, IPN.
- QUALTER A., STRANG J., SWATTON P. & TAYLOR P. (1990). *Exploration. A Way of Learning Science*. Oxford, Blackwell.
- SCHAUBLE L., KLOPFER L.E. & RAGHAVAN K. (1991). Students' transition from an engineering model to a science model of experimentation. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 28, n°9, pp. 859-882.

Remerciements

Le projet «Procedural and Conceptual Knowledge in Science» (PACKS) a bénéficié du soutien, d'octobre 1991 à mars 1994, du Comité pour la Recherche Économique et Sociale du Royaume-Uni (Economic and Social Research Council, ESRC), dotation n° L208 25 2008, dans le cadre du programme de recherche «Innovation et évolution dans l'éducation : qualité de l'enseignement et de l'apprentissage». Le projet était piloté par les Universités d'York et de Durham et dirigé par Robin Millar et Richard Gott. Les réalisateurs du projet étaient Fred Lubben, qui a recueilli la plupart des données présentées dans cet article, et Sandra Duggan. Je les remercie pour leurs contributions, particulièrement celle de Fred Lubben, à la réflexion concernant les questions discutées dans cet article.