

Université de Montréal

**La modélisation mathématique dans l'enseignement de la chimie
des gaz à des élèves de la cinquième
année du secondaire**

par

Diane Gauthier

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
Philosophiae Doctor (Ph. D.)
en sciences de l'éducation, option didactique**

juillet 1998

©Diane Gauthier, 1998





National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-39747-5

Canada

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée:

**La modélisation mathématique dans l'enseignement de la chimie
des gaz à des élèves de la cinquième
année du secondaire**

présentée par:

Diane Gauthier

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes:

Marcel Thériault

président-rapporteur

Guillaume Lemoine

directeur de recherche

Louise Poirier

membre du jury

Françoise Ruel

examineur externe

Michel Masson

Représentant du doyen

Thèse acceptée le: 03.12.1998

Sommaire

Les problèmes que pose l'enseignement actuel de la chimie des gaz parfaits sont nombreux. Plusieurs études ont montré que les conceptions naïves des élèves sur les gaz sont peu affectées par l'enseignement (Kautz, Héron et McDermott, 1998; Kesidou et Duit, 1993; Stavy, 1988, 1991, 1994; Treagust, 1995). Les difficultés des élèves dans l'application et l'interprétation des lois sur les gaz parfaits ont également été mises en évidence dans plusieurs recherches et ces difficultés montrent des rapports inadéquats non seulement aux notions impliquées dans ces lois, mais aussi à la notion de proportionnalité (Confrey, 1990; Erickson et Driver, 1983; Pfundt et Duit, 1994). La notion de proportionnalité est reconnue un des pivots le plus ancien et le plus fondamental reliant les mathématiques aux sciences (Rouchier, 1991) et les problèmes de compréhension de cette notion chez un grand nombre d'élèves du primaire et du secondaire sont majeurs, comme le soulignent plusieurs chercheurs (Kieren, 1988, 1989; Noelting et Béland, 1988; Ricco, 1982; Viennot, 1989).

Les problèmes d'enseignement de la chimie des gaz parfaits sont donc importants. Si plusieurs études ont été réalisées dans le but d'identifier et d'interpréter ces problèmes, aucune recherche, à notre connaissance, n'a été réalisée sur l'enseignement des lois sur les gaz parfaits. Notre recherche sur l'enseignement est donc pionnière. Elle a pour objectif général de construire et d'analyser une séquence d'enseignement de la chimie des gaz comportant diverses situations de modélisation mathématique des conduites des gaz. Les principaux objectifs spécifiques sont les suivants: 1- identifier et caractériser les situations qui provoquent une évolution des conceptions naïves des élèves, évolution vers des connaissances plus adéquates sur les gaz; 2- identifier et caractériser les situations qui provoquent une évolution des connaissances mathématiques des élèves leur permettant d'interpréter convenablement les résultats des expériences, d'éprouver leurs conceptions, de donner un sens aux notions et aux relations impliquées dans les lois des gaz parfaits, lois de Boyle-Mariotte et Gay-Lussac.

Une séquence d'enseignement comportant huit situations est expérimentée auprès d'une classe d'élèves de secondaire V. La construction de ces situations est orientée par les recherches sur les conceptions naïves des élèves, par les études sur l'évolution historique des conceptions sur les gaz et des pratiques scientifiques, ainsi que par les études théoriques et empiriques réalisées en didactique des sciences et des mathématiques. La méthodologie de l'ingénierie didactique (Artigue,

1998) qui constitue une application de la théorie des situations didactiques (Brousseau, 1986) est utilisée dans la construction et l'analyse des situations d'enseignement. Une analyse a priori de chacune des situations d'enseignement est effectuée; elle a pour but d'expliquer les choix des tâches qui font partie des situations et de préciser la gestion didactique des situations. Diverses situations d'enseignement de la chimie ont ainsi été construites.

L'analyse a posteriori des situations, analyse des interactions didactiques lors du déroulement en classe de ces situations, est confrontée à l'analyse a priori réalisée lors de la construction de ces situations. La pertinence de ces situations est ainsi examinée, en regard des objectifs de la recherche.

Plusieurs des situations d'enseignement que nous avons construites se sont avérées efficaces, résultant en une transformation des conceptions naïves, une évolution des connaissances en mathématiques et en sciences et une entrée des élèves dans une pratique scientifique de modélisation mathématique des conduites des gaz. La modélisation mathématique a souvent été à la source de conflits cognitifs entre les prédictions faites à partir des représentations spontanées des phénomènes et celles découlant du modèle mathématique. Plus encore, grâce à notre démarche de confrontation des analyses a priori et a posteriori, nous avons pu caractériser ces situations et identifier les choix concernant les variables de commande (variables de tâches et variables didactiques) qui ont été déterminants.

Par ailleurs, si dans d'autres situations, les tâches de modélisation mathématique ont été l'occasion pour les élèves de formuler des explications relevant de conceptions naïves, elles n'ont pas résulté en une mise à l'épreuve de ces conceptions. Ce résultat peut être attribué à une difficulté de concevoir des situations qui permettent cette mise à l'épreuve; le débat que nous avons instauré dans la classe à propos de ces conceptions n'a pas suffi à déclencher chez les élèves un travail cognitif important sur ces conceptions. Il faut admettre que la gestion didactique des conceptions naïves ou erronées des élèves est complexe et que l'on dispose de peu d'indications sur les situations à mettre en place pour gérer ces conceptions.

Il nous apparaît enfin important de souligner la pertinence de la méthodologie d'analyse a priori et a posteriori à laquelle nous nous sommes référée dans la construction des situations et dans l'analyse

des données de notre recherche. Cette méthodologie a permis d'identifier les lacunes des situations et de proposer des façons d'y remédier. Dans une recherche future, il serait important de procéder à des transformations des situations et d'en mesurer les effets sur les apprentissages des élèves.

Liste des tableaux

Tableau 1.	Variations du volume et de la température d'un gaz	75
Tableau 2.	Variations du volume et de la pression d'un gaz	79
Tableau 3.	Variations de la température, du volume et de la pression d'un gaz	81
Tableau 4.	Variations du volume d'un gaz dont la masse est de 16 g	84
Tableau 5.	Performances des élèves à l'épreuve de révision des connaissances en chimie	98
Tableau 6.	Les données expérimentales consignées par chacune des équipes et les explications du phénomène	106
Tableau 7.	Variations du volume et de la température d'un gaz	111
Tableau 8.	Procédés utilisés par les élèves dans l'identification de la relation entre le volume et la pression	112
Tableau 9.	Variations du volume et de la pression d'un gaz	118
Tableau 10	Les calculs et les graphiques effectués par chacune des équipes et les interprétations de la relation entre le volume et la pression	119
Tableau 11.	Variations de la température, du volume et de la pression d'un gaz	126
Tableau 12.	Les écritures des relations entre la température, le volume et la pression produites par les diverses équipes d'élèves	128
Tableau 13.	Variations du volume d'un gaz dont la masse est de 16 g	130
Tableau 14.	Démarches des élèves dans l'interprétation des différences entre les tableaux 4.1, 4.2, 4.3	132
Tableau 15.	Performances de chacun des deux groupes d'élèves à l'examen de chimie	143

Chapitre IV.	Analyse et interprétation des résultats	94
	Analyse des interactions didactiques dans le déroulement de chacune des situations	95
	Synthèse et interprétation des résultats de notre recherche	145
Chapitre V.	Conclusions	152
	Les principales contributions de notre recherche	153
	Les limites de notre recherche	154
	Perspectives pour de futures recherches	155
Bibliographie.		157

Liste des tableaux

Tableau 1.	Variations du volume et de la température d'un gaz	75
Tableau 2.	Variations du volume et de la pression d'un gaz	79
Tableau 3.	Variations de la température, du volume et de la pression d'un gaz	81
Tableau 4.	Variations du volume d'un gaz dont la masse est de 16 g	84
Tableau 5.	Performances des élèves à l'épreuve de révision des connaissances en chimie	98
Tableau 6.	Les données expérimentales consignées par chacune des équipes et les explications du phénomène	106
Tableau 7.	Variations du volume et de la température d'un gaz	111
Tableau 8.	Procédés utilisés par les élèves dans l'identification de la relation entre le volume et la pression	112
Tableau 9.	Variations du volume et de la pression d'un gaz	118
Tableau 10	Les calculs et les graphiques effectués par chacune des équipes et les interprétations de la relation entre le volume et la pression	119
Tableau 11.	Variations de la température, du volume et de la pression d'un gaz	126
Tableau 12.	Les écritures des relations entre la température, le volume et la pression produites par les diverses équipes d'élèves	128
Tableau 13.	Variations du volume d'un gaz dont la masse est de 16 g	130
Tableau 14.	Démarches des élèves dans l'interprétation des différences entre les tableaux 4.1, 4.2, 4.3	132
Tableau 15.	Performances de chacun des deux groupes d'élèves à l'examen de chimie	143

REMERCIEMENTS

Cette recherche n'aurait pu être menée à terme sans la disponibilité, l'enthousiasme, le sens critique et les compétences en didactique de madame Gisèle Lemoyne, professeur titulaire au département de l'Université de Montréal. Je la remercie vivement.

Je remercie également monsieur Jacques Rousseau, directeur de l'école Jeanne-Mance, qui m'a permis de mener cette recherche dans l'école.

J'aimerais aussi remercier tous les élèves de la classe qui ont participé à l'expérience d'enseignement.

Il me semble enfin important d'exprimer ma reconnaissance à la Faculté des études supérieures qui m'a octroyé une bourse d'études, à deux reprises.

INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, les recherches en didactique des sciences ont permis de mettre en évidence la présence chez les élèves de l'enseignement primaire, mais aussi de l'enseignement secondaire et universitaire, de nombreuses conceptions naïves des savoirs et des phénomènes scientifiques. Les analyses du développement des connaissances scientifiques au cours des siècles ont également permis d'identifier de nombreuses conceptions, dont certaines s'apparentent à celles observées chez les élèves.

Les études sur l'épistémologie des sciences ont permis également de montrer que ce que nous considérons aujourd'hui comme la science moderne est le fruit d'une longue quête de moyens pour appréhender l'univers. Dans cette quête, la construction d'instruments de mesure et l'élaboration d'outils mathématiques pour modéliser les phénomènes à l'étude se sont avérées fondamentales. Les humains de notre siècle qui considèrent normaux les outils de laboratoire du chercheur et les modèles abstraits développés par ces chercheurs, sans pour autant les trouver familiers ni en comprendre le fonctionnement, sont souvent peu informés du long processus qui a conduit à faire ainsi de la science.

L'apparition de ces outils et de ces pratiques d'investigation de l'univers n'a toutefois imprégné les pratiques d'enseignement des sciences, du moins au secondaire, que récemment. Les études en didactique des sciences réalisées au cours des dernières décennies ont sûrement contribué à transformer les pratiques d'enseignement des sciences et à réaliser une transposition didactique des pratiques scientifiques. Depuis les années 60, tous les manuels et les programmes de sciences pour le secondaire prônent la nécessité pour les élèves d'approcher les phénomènes scientifiques en conduisant des expériences contrôlées en laboratoire, en mettant en oeuvre une méthode inductive d'apprentissage des sciences. Mais qu'en est-il de ces principes dans les pratiques mises en place dans l'enseignement des sciences? Comment faire en sorte que les expériences de laboratoire réalisées par les élèves soient constitutives de l'apprentissage des notions scientifiques? Comment faire entrer les élèves dans une pratique scientifique? Quelles situations d'enseignement doit-on concevoir pour transformer les conceptions naïves des élèves et leur permettre de développer des connaissances scientifiques? Voilà autant de questions qui nous ont amenée à entreprendre une recherche sur l'enseignement des sciences.

La recherche que nous menons vise à éclairer l'enseignement des sciences. Elle porte sur l'enseignement de la chimie des gaz; cet enseignement s'adresse à des élèves de secondaire V qui ont déjà une base d'expériences, de savoir-faire et de connaissances en sciences. La recherche a pour objectif général de concevoir et d'analyser des situations d'enseignement visant la construction de savoirs sur la chimie des gaz, par un travail de modélisation mathématique des conduites des gaz parfaits prenant en compte la pression, la température et le volume de ces gaz. Il s'agit essentiellement d'un enseignement des lois de Boyle-Mariotte et Gay-Lussac. *objectif général*

Dans la construction de situations d'enseignement de la chimie des gaz parfaits, nous tenterons ainsi de tenir compte: a) des conceptions naïves des élèves sur les gaz; b) de l'évolution au fil de l'histoire des conceptions scientifiques sur les gaz; c) de l'évolution historique des pratiques scientifiques; d) des théories, outils et méthodes de la didactique qui permettent d'orienter la construction de situations.

Dans le premier chapitre, nous définissons la problématique de notre recherche. Une analyse des pratiques actuelles d'enseignement de la chimie des gaz au Québec est effectuée et permet de mieux comprendre les problèmes que pose cet enseignement, entre autres, la persistance des conceptions naïves chez les élèves et les difficultés qu'éprouvent ces élèves à appliquer et à interpréter les lois sur les gaz. Nous montrons d'ailleurs que ces problèmes sont relevés dans plusieurs études sur l'enseignement de ce savoir. Nous complétons ce chapitre par une présentation des principales questions de notre recherche.

Au second chapitre, nous présentons le cadre conceptuel de notre recherche. Une analyse de l'évolution historique des concepts et des pratiques scientifiques relatifs à l'étude des gaz et de la chaleur est d'abord conduite et permet de montrer comment la modélisation mathématique de phénomènes scientifiques a permis une évolution de ces concepts. Une analyse du processus de modélisation mathématique est aussi réalisée. Dans une seconde partie de ce chapitre, nous exposons les défis et les enjeux de l'enseignement de la chimie des gaz, en tenant compte des études précédentes sur l'évolution des concepts et des pratiques scientifiques et de certaines études en didactique des sciences et des mathématiques. Ce chapitre se termine par une présentation des objectifs de notre recherche.

Au troisième chapitre, nous présentons la méthodologie de notre recherche. Nous décrivons la population d'élèves avec laquelle l'enseignement est réalisé. Une description et une analyse des

situations que comporte notre séquence d'enseignement de la chimie des gaz sont ensuite effectuées. Nous présentons enfin les modalités de réalisation en classe des situations d'enseignement et indiquons brièvement la démarche d'analyse des données de la recherche.

Dans le quatrième chapitre, nous procédons d'abord à une analyse des interactions didactiques lors du déroulement des situations d'enseignement, afin d'examiner la pertinence des choix qui ont été effectués dans la construction des situations d'enseignement, en regard des objectifs de notre recherche. Dans un second temps, nous effectuons une synthèse et une interprétation des principaux résultats, en tenant compte du cadre théorique et des objectifs de notre recherche.

Dans le dernier chapitre, nous dégageons les principales contributions de notre recherche. Nous identifions également certaines lacunes et certaines limites du travail que nous avons réalisé. Nous complétons ce chapitre par une présentation de quelques perspectives pour de futures recherches en ce domaine.

CHAPITRE I

PROBLEMATIQUE

Dans l'enseignement de la chimie au Québec, les gaz parfaits constituent un objet important. Près du tiers du temps consacré à l'enseignement de la chimie aux élèves de la cinquième année secondaire y est consacré. Si les pratiques d'enseignement ont subi des modifications au fil des années, cet enseignement pose toujours problème.

Dans le cadre de notre enseignement, lors des périodes de révision en fin d'étapes et en fin d'année, nous avons observé qu'un nombre important d'élèves conservent toujours des conceptions naïves des notions impliquées dans la loi des gaz parfaits et des relations entre ces notions. Plusieurs éprouvent des difficultés à rappeler l'écriture mathématique de cette loi ou à utiliser avec pertinence cette écriture dans la résolution de problèmes. Ces observations ne sont pas singulières à notre expérience. En effet, Kautz, Héron et McDermott (1998; introduction à un séminaire gradué publiée sur un site WEB) font état de résultats similaires à propos de l'enseignement de cette loi. La persistance de conceptions naïves, les difficultés d'interprétation d'écritures mathématiques ou de représentations graphiques modélisant certains phénomènes scientifiques, les difficultés de résolution de problèmes scientifiques sont également notées dans un nombre considérable d'études sur l'enseignement des sciences (Confrey, 1990; Erickson et Driver, 1983; Pfundt et Duit, 1994).

Pour mieux identifier ces problèmes, nous effectuons dans un premier temps un examen des pratiques d'enseignement des sciences et notamment, des gaz parfaits. Nous identifions ensuite certaines conceptions des élèves et certaines difficultés d'application de la loi des gaz parfaits que nous avons relevées dans le cadre de notre enseignement ou qui ont été mises en évidence dans plusieurs recherches. Nous terminons enfin ce chapitre par une présentation des questions que notre recherche entend examiner.

EXAMEN DES PRATIQUES D'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES ET NOTAMMENT, DE LA CHIMIE DES GAZ PARFAITS

Les pratiques d'enseignement de la chimie des gaz parfaits au secondaire sont similaires à celles de l'enseignement des sciences, procédant de mêmes principes et méthodes. Nous décrivons d'abord

les pratiques d'enseignement des sciences et nous examinons ensuite leur application dans l'enseignement de la chimie des gaz parfaits.

L'enseignement des sciences: ses principes, ses méthodes, ses limites

Dans la majorité des cours de sciences au niveau secondaire, l'enseignement débute par une démonstration en classe ou en laboratoire d'un phénomène scientifique à partir duquel sont mis en évidence les concepts et les lois qui s'y rattachent. Cette démarche, généralement bien considérée par les enseignants, comporte des lacunes importantes. De prime abord, elle est sécurisante pour l'élève car tout est clair, mais la conceptualisation doit se faire rapidement. L'apprentissage est souvent programmé. L'élève assiste à la révélation de la loi, car toutes les manipulations qu'il fait en laboratoire sont dirigées; c'est l'enseignant qui contrôle toutes les étapes de l'expérience. Robardet (1989, p. 62) parle en ces termes de cette démarche: *«L'objectif de cette démarche est l'enseignement du modèle et non la modélisation.»*

L'enseignant crée un prototype expérimental qui permet de montrer des faits et d'enseigner un modèle. Ce prototype est une expérience épurée à l'avance des causes d'erreurs, des incertitudes, dont le but essentiel est de permettre à l'élève d'adhérer au modèle. Plus on fabrique une situation d'expérimentation idéale, plus on éloigne l'élève d'une pratique expérimentale qui l'obligerait à interpréter les données fluctuantes, les échecs expérimentaux, à revoir ses représentations. Selon Closset (1983) et Dupin et Johsua (1985: voir Bednarz et Garnier, 1989), cette façon de concevoir la méthode inductive, dont se réclament les concepteurs des guides pédagogiques et des manuels, ignore les représentations naïves des élèves et leur résistance à les abandonner. Les conséquences d'un tel enseignement sont importantes.

L'élève apprend à manipuler le modèle, mais il garde en tête ses représentations naïves car l'enseignant n'apporte pas une explication assez forte par son expérience dirigée pour le convaincre de rejeter les conceptions naïves qu'il a développées antérieurement. De plus, l'élève est amené à appréhender les phénomènes scientifiques, à les interpréter avec la même approche et la même rigueur que celles qu'il emploie face à des événements quotidiens. Selon Larochelle et Désautels (1992), l'élève utilise les mêmes mécanismes et les mêmes concepts qu'en d'autres occasions et ce, parce qu'il est ignorant des lois et des conventions qui régissent le savoir scientifique, ses expériences en classe de sciences ne lui permettant pas de construire de telles lois et conventions. Face à un échec de l'élève en sciences, l'enseignant peut donc être porté à conclure qu'il s'agit d'un problème d'apprentissage, mais avec un regard plus approfondi, on est plutôt enclin à mettre en cause l'enseignement réalisé.

Plusieurs autres chercheurs ont examiné les problèmes conceptuels découlant du recours à des expériences prototypées et simplifiées. Piaget et Garcia (1983) ont utilisé l'exemple du corps en chute libre pour montrer que la compréhension de la loi qui régit cette chute ne peut faire l'économie de la transformation du concept de mouvement et de la construction des relations entre les variables de la distance et du temps de chute. Séré et Moppert (1989) ont montré également que le recours à un modèle préalablement établi dans le but de simplifier les difficultés des élèves dans l'étude de la cinétique des gaz ne permet pas la formation de concepts adéquats. Regardons maintenant de plus près les pratiques actuelles d'enseignement de la chimie des gaz parfaits, enseignement qui concerne notre recherche.

Aperçu de l'enseignement de la chimie des gaz parfaits

Dans les pratiques actuelles, l'enseignement de la chimie des gaz parfaits suit une introduction à la chimie comme méthode expérimentale, à la théorie atomique et aux réactions chimiques simples. Cet enseignement débute par un exposé sur les contenus suivants: le modèle moléculaire d'un gaz, le volume et la pression d'un gaz. Puis, avant de présenter les lois sur les gaz, les élèves sont amenés en laboratoire pour étudier les effets simultanés de la température et de la pression sur le volume d'un gaz donné. À la suite de ce laboratoire, l'enseignant expose en classe les lois sur les gaz: loi de Charles, loi de Boyle-Mariotte, loi de Charles et Boyle-Mariotte; il examine les taux de variation que les élèves ont trouvés en laboratoire et montre la relation entre ces taux et les lois définies. Puis, il effectue quelques problèmes en classe, en les commentant et en montrant surtout comment on peut les résoudre; il donne ensuite des problèmes similaires aux élèves.

Ce travail fait, une présentation des savoirs suivants est réalisée par l'enseignant: l'hypothèse d'Avogadro sur le nombre de molécules des gaz, le volume molaire, le gaz parfait, les conditions normales de température et de pression, la loi des pressions partielles de Dalton, la masse volumique d'un gaz et la masse volumique de l'air sec, la loi de Graham sur les vitesses de diffusion des gaz. Des problèmes sont alors faits et commentés par l'enseignant, puis d'autres problèmes sont donnés aux élèves. Selon les données que nous avons recueillies auprès des enseignants, ces pratiques d'enseignement sont très fréquentes. Mais, regardons de plus près, les manuels dont disposent les enseignants et aussi, comment les approches constructivistes mises de l'avant sont incarnées dans les manuels récents. Pour ce faire, nous proposons d'examiner les divers manuels offerts aux enseignants du Québec depuis 1970.

1. L'enseignement de la chimie des gaz des années '70 et '90

Dans les cours de chimie générale, pour les élèves du secondaire V, les enseignants disposent de manuels d'enseignement qui définissent les principaux contenus de savoir et pour chacun de ces contenus, d'un ensemble de problèmes, ainsi que des documents pédagogiques qui indiquent comment réaliser cet enseignement. Une comparaison de 2 manuels de classe, un premier édité en 1976 et un second en 1992, nous permet de mieux saisir comment l'approche constructiviste a transformé l'enseignement des gaz depuis les deux dernières décennies (Lahaie, Papillon et Valiquette, 1976; Bachand, 1992; Bachand et Petit, 1996).

Le manuel conçu par Lahaie, Papillon et Valiquette (1976) intègre plusieurs éléments des manuels antérieurs et en particulier, du manuel Chemistry - An experimental science rédigé par McClellan, Pimentel et MacNab (1963). Ce manuel insiste sur les liens à créer entre la chimie enseignée à l'école et la chimie du quotidien. On y retrouve ainsi des photos, des dessins, par exemple, le dessin de l'intérieur d'une centrifugeuse. Des séances types de laboratoire sont également présentées. On insiste sur la nécessité de conduire des séances post-laboratoire dans lesquelles l'enseignant anime des discussions de groupe sur les résultats obtenus en laboratoire. De plus, le vocabulaire tend à se rapprocher du vocabulaire du quotidien. Enfin, l'approche constructiviste est prônée, mais sa compréhension se ramène à un énoncé du type: la participation active de l'élève. Les laboratoires et les discussions sont garants de cette participation active.

Dans un manuel plus récent de Bachand et Petit (1996), manuel encore en usage aujourd'hui, les présentations théoriques sont réduites; les relations mathématiques entre les variables impliquées dans le comportement des gaz parfaits ne sont pas définies, devant d'abord être construites par les élèves dans les travaux de laboratoire. Les modèles mathématiques des conduites de certains gaz soumis à des variations de pression et de température produits par les élèves sont examinés, lors de discussions animées par l'enseignant; de la confrontation des modèles des élèves devrait résulter un modèle ou quelques modèles pas trop éloignés du modèle adéquat, objet d'enseignement. Cette façon de concevoir l'enseignement représente, de toute évidence, une évolution dans le sens d'une épistémologie constructiviste de l'apprentissage et par transposition, de l'enseignement. Les résultats des expériences en laboratoire deviennent ainsi des connaissances à formuler, à valider, à institutionnaliser. Le laboratoire n'est plus, comme c'était le cas dans les programmes et manuels antérieurs, un lieu de vérification de la théorie; il devient le moteur même du développement de la théorie.

Certaines connaissances sur l'histoire des sciences sont aussi rappelées dans le manuel précédent. Chaque chapitre du manuel contient une portion historique, dont le but est de montrer l'évolution

des conceptions et des concepts, au fil des ans, des siècles, et rendre compte des efforts de compréhension des phénomènes et des démarches qui ont été décisives dans le développement des concepts, entre autres, les démarches successives de modélisation; ce rappel est vu important par plusieurs chercheurs, notamment par Kuhn (1983).

Dans le guide du ministère de l'éducation qui oriente l'enseignement des sciences, on suggère de plus aux enseignants de faire des liens entre la théorie et son implication dans le quotidien. Par exemple, on peut demander aux élèves d'identifier des phénomènes naturels et technologiques qui mettent en cause les concepts étudiés sur les gaz. Selon Posner, Strike, Hewson et Gertzog (1982) et selon Désautels, Anadon et Larochelle (1988), si on souhaite l'abandon des conceptions naïves, l'enseignement ne doit pas isoler l'apprenant de la matière à apprendre; les phénomènes choisis, lorsqu'il est possible, doivent parler à l'élève et les explications de ces phénomènes doivent être suffisamment convaincantes pour obliger l'élève à penser autrement.

C'est dans ce même esprit d'application des notions enseignées que les élèves sont invités à effectuer un petit travail de recherche comportant trois volets: un volet documentaire; un volet expérimental ou technologique; un volet vulgarisation. L'objet étudié doit être relié de près ou de loin aux notions enseignées en cours d'année: a) Les gaz et leurs applications; b) Les réactions chimiques et l'énergie; c) Les réactions chimiques et la vitesse de réaction; d) Les réactions chimiques et l'équilibre. L'élève doit alors formuler son sujet sous la forme d'un problème à résoudre; il élabore ensuite un plan de recherche qu'il fait approuver par son professeur; il établit une façon de communiquer les résultats à son professeur et/ou aux professeurs de sciences.

Dans tout enseignement, le problème de l'évaluation des acquisitions des élèves est non négligeable. Cette évaluation peut être cohérente ou non avec les orientations et les approches d'enseignement. Le manuel du maître conçu par Lahaie, Papillon et Valiquette (1976) proposait une évaluation sous la forme de questions à choix multiples; les examens du ministère de l'éducation de l'époque étaient également composés uniquement de questions à choix multiples. Maintenant, les examens doivent comporter un pourcentage d'environ 35% de questions à développement; ces questions à développement sont justifiées par les orientations de l'enseignement visant davantage la compréhension que la rétention de textes écrits et l'application de formules.

L'examen comparé des manuels précédents montre le trajet parcouru au cours des deux dernières décennies. En effet, le manuel publié en 1992 montre une meilleure articulation didactique d'une approche constructiviste de l'enseignement de la chimie. Le laboratoire de chimie est ainsi devenu

un lieu de résolution de problèmes, de construction de connaissances; ces connaissances sont ensuite explicitées, validées et institutionnalisées. Mais pour que le laboratoire joue ce rôle dans l'enseignement, les problèmes à résoudre doivent faire «*agir, parler, réfléchir, évoluer de son propre mouvement* » l'élève qui les résout, selon Brousseau (1996, p. 64). En est-il ainsi? Est-ce possible de trouver de tels problèmes? Pour répondre à la première question, nous décrivons et commentons la planification d'une séquence type sur l'enseignement des gaz, séquence réalisée par un bon nombre d'enseignants de chimie de notre entourage (ainsi que par l'auteure de cette recherche, dans les années antérieures), à quelques variantes près. La réponse à la seconde question concerne tout le travail d'analyse de la séquence d'enseignement qui fait l'objet de notre recherche.

2. Analyse d'une séquence type sur l'enseignement des gaz

La séquence suivante est préparée à l'aide du manuel de Bachand et Petit (1996) et du cahier d'exercices rédigé par Bachand (1992) que nous avons brièvement commentés. Le but visé par cette séquence est l'appropriation et l'utilisation pertinente de la formule sur les gaz parfaits, selon le modèle proposé par Boyle-Mariotte, Charles et Gay-Lussac. La séance comporte huit périodes d'enseignement (cours), d'une durée de 75 minutes chacune. Cet enseignement est, à quelques variantes près, celui dispensé par les enseignants des écoles secondaires de la CECM; à notre connaissance, il est aussi comparable à celui dispensé par les enseignants des autres commissions scolaires du Québec. Nous décrivons quelques-uns des cours donnés par les enseignants de notre école au cours des dernières années.

Le premier cours est consacré à l'identification de certaines fonctions des gaz dans la vie de tous les jours et à un rappel des préoccupations des savants des XVII et XVIII siècles sur les conduites des gaz. L'enseignant écrit au tableau les mots suivants: C.F.C. (chloro-fluoro-carbone), ozone, montgolfière, réfrigérateur, pompe à bicyclette, bombonne à gaz. Il dépose sur son bureau une pompe à bicyclette, une chambre à air vide et une bombonne de gaz. Puis, il interroge les élèves pour cerner leurs connaissances, suscite des discussions et propose des pistes de réflexion.

Questions types:

Connaissez-vous la fonction de chacun de ces mots?

Est-ce vrai que les C.F.C. ont un rôle néfaste dans notre environnement; ces gaz sont-ils reliés à la pollution atmosphérique?

L'enseignant distribue un texte, soit «*Des sons qui donnent des frissons*» (Québec-Sciences, 1981, p.9). Ce texte lu, l'enseignant poursuit son interrogation:

Questions types:

Est-ce qu'il y a un lien entre les différents mots inscrits au tableau?

Est-ce que toutes les réactions chimiques qui se produisent dans l'environnement représentent des phénomènes polluants? Pourriez-vous en citer quelques-unes qui ne le sont pas?

Le cours se poursuit par une introduction de la théorie cinétique moléculaire; cette théorie sert à identifier les propriétés des gaz à l'aide d'un modèle scientifique. L'enseignant pose la question suivante: Pourquoi un ballon de baudruche placé au-dessus d'un feu éclatait-il, sans qu'il y ait contact avec celui-ci ? Les commentaires des élèves sont recueillis et notés de façon abrégée au tableau.

L'enseignant poursuit en disant que pour répondre à certaines de ces questions, les savants ont décidé de considérer les gaz comme des particules en mouvement. La théorie cinétique moléculaire permet alors l'analyse du passage d'un état à un autre ainsi que les différents phénomènes physiques qui s'y rattachent.

L'enseignant demande aux élèves de noter les six points suivants (Bachand, 1992, p. 55):

- «1. Les gaz sont constitués de particules extrêmement petites appelées molécules.*
- 2. Les distances entre les molécules sont très grandes si on les compare avec leur propre dimension.*
- 3. Le mouvement des molécules est continu et dans toutes les directions.*
- 4. L'énergie cinétique est proportionnelle à la température absolue.*
- 5. Les molécules se frappent continuellement et aussi heurtent les parois du récipient qui les renferme.*
- 6. Ces collisions se font sans perte d'énergie.»*

L'enseignant insiste sur le fait qu'un gaz existe indéfiniment avec des caractéristiques qui lui sont propres. Si les vitesses des gaz diminuaient, les gaz cesseraient d'exister. Ces conditions correspondent à la description d'un modèle scientifique qui aide à comprendre le comportement des gaz.

Le cours se poursuit par une petite expérience. L'enseignant demande à un élève volontaire de gonfler une chambre à air, à l'aide de la pompe à bicyclette qui a été déposée sur le bureau. Pendant ce temps, il note au tableau les mots suivants: l'expansion, la pression, la compression, la

diffusion. Suite à ce qui se passe devant eux, l'enseignant demande aux élèves de définir ce qu'il vient d'écrire au tableau. Les élèves font cet exercice en équipe de deux, avant de faire part de leurs travaux au groupe. Normalement, les mots expansion et pression sont plus facilement définis que ne le sont les autres; pour faciliter la définition de ces derniers mots, l'enseignant fait un rappel des éléments de la théorie sur le comportement des gaz que les élèves ont copiés. Les définitions sont discutées en groupe et celles jugées les plus appropriées par l'enseignant sont retenues.

Le second cours est consacré à l'identification des facteurs qui influencent le comportement des gaz. L'enseignant effectue une révision de quelques minutes sur la pertinence de l'utilisation des températures en °Kelvin. Cette mesure de température est connue des élèves depuis la quatrième secondaire. La question suivante est formulée: Comment peut-on transformer en Kelvin une température qui est en Celsius, ou l'inverse?

Puis, l'enseignant fait une démonstration de l'influence de la variation de facteurs qui régissent le comportement des gaz. L'enseignant dépose sur son bureau une plaque chauffante sur laquelle sont placés un bécher rempli d'eau, une seringue de 30 mL dans laquelle on a placé 10 mL de CO₂ et qui est munie d'un bouchon d'étanchéité. Ensuite, l'enseignant plonge la seringue dans le bécher d'eau qui se réchauffe et demande à deux élèves de prendre des mesures de la température et du volume de l'eau, à chaque 30 secondes, et d'inscrire ces mesures au tableau; l'intervalle entre les mesures est fixé par l'enseignant pour mieux contrôler les actions des élèves et pour faciliter le tracé du graphique qui sera demandé aux élèves, à la suite de cette expérience. Les autres élèves du groupe peuvent aussi se présenter au bureau de l'enseignant pour y observer l'évolution de l'expérience en cours. Tous les élèves doivent noter les résultats dans leur cahier.

Lorsque l'expérience est terminée, l'enseignant demande aux élèves de transformer les températures en °Kelvin et de tracer un graphique avec les résultats, en insistant pour qu'ils identifient bien les axes. Une analyse des graphiques est alors effectuée; l'enseignant discute avec les élèves de l'aspect du graphique, et de la covariation des variables.

Ce travail fait, l'enseignant demande aux élèves de noter que le volume d'un gaz varie proportionnellement à sa température. Il écrit ensuite cette relation de proportionnalité de la façon usuelle (V: volume en litres; T: température en °Kelvin; k: constante)

$$V/T = k$$

Puis, il interroge à nouveau les élèves. Les questions sont de cette nature: Dans le graphique que vous avez entre les mains, à quoi correspond la constante? Que représente V/T ? Peut-on calculer la

pente avec n'importe quel couple de points sur la droite? Cette interrogation faite, l'enseignant écrit au tableau:

$$\text{si } V_1/T_1 = k_1$$

$$\text{et } V_2/T_2 = k_2$$

$$\text{alors } V_1/T_1 = V_2/T_2 \text{ la loi de Charles}$$

Les élèves notent dans leur cahier que le volume d'un gaz est directement proportionnel à la température absolue, lorsque les autres facteurs sont constants, soit la pression et le nombre de moles. La pression atmosphérique de la classe demeure constante durant la manipulation, ainsi que le nombre de moles de gaz.

L'enseignant fait un problème au tableau; les élèves prennent en note ce problème et la solution montrée par l'enseignant. Un des problèmes souvent choisis est le suivant (Bachand et Petit, 1996, p. 71): «*Quel sera le volume final du dioxygène gazeux à une température de 150 °K si à une température initiale de 27 °C, le volume était de 8,0 L?*»

Solution:

$$T_1 = (27 \text{ °C} + 273) = 300 \text{ °K}$$

$$V_1 = 8,0 \text{ L}$$

$$T_2 = 150 \text{ °K}$$

$$V_2 = ?$$

$$V_1/T_1 = V_2/T_2$$

$$8,0 \text{ L}/300 \text{ °K} = V_2/150 \text{ °K}$$

$$V_2 = 8,0 \text{ L } 150 \text{ °K}/300 \text{ °K} = 4,0 \text{ L}$$

L'enseignant distribue une feuille de devoir comportant trois autres problèmes de même type que celui qu'il a fait. Voici le libellé d'un des problèmes souvent présentés: Quelle est la température finale d'un gaz si le volume initial est de 20,0 L à une température de 20 °C et que le volume final est de 40,0 L ?

Le troisième cours a pour but d'identifier l'effet de la variation du nombre de moles sur le volume, lorsque la température et la pression atmosphérique sont fixes. L'enseignant écrit au tableau le texte suivant:

Pour une température constante, le rapport entre le volume d'un gaz (V) et le nombre de moles de ce gaz (n) est une constante:

$$V_1/n_1 = k_1$$

et $V_2/n_2 = k_2$

alors $V_1/n_1 = V_2/n_2$

Selon la théorie cinétique des gaz à température absolue constante, l'augmentation du nombre de moles a pour conséquence d'augmenter le nombre de collisions. Si les parois du contenant sont flexibles, alors on peut remarquer que le volume augmente."

L'enseignant fait ensuite le problème suivant au tableau (Bachand, 1992, p. 65): «*Une seringue de 250 mL contient 0,0100 mole de N₂ (g) à une pression de 101,3 kPa et une température de 28 C. Considérant que la température et la pression atmosphérique demeurent constantes, si le volume du gaz diminue à 45,0 mL, qu'en est-il du nombre de moles?*»

La solution suivante est inscrite au tableau:

$$V_1 = 250 \text{ mL}$$

$$n_1 = 0,0100 \text{ mole}$$

$$V_2 = (250 - 45,0) \text{ mL}$$

$$n_2 = ?$$

$$V_1/n_1 = V_2/n_2$$

$$250 \text{ mL} / 0,0100 \text{ mole} = 205 \text{ mL} / n_2$$

$$n_2 = 205 \text{ mL} \cdot 0,0100 \text{ mole} / 250 \text{ mL}$$

$$n_2 = 0,00816 \text{ mole}$$

L'enseignant propose par la suite aux élèves divers exercices portant sur la matière enseignée durant les cours 2 et 3. Les élèves débutent ces exercices en classe et complètent au besoin leur travail à la maison; l'enseignant est toutefois disponible pour répondre en classe aux questions des élèves.

Le quatrième cours vise à déterminer l'effet de la variation de la température sur la pression d'un gaz. L'enseignant utilise un manomètre. Ce manomètre est plongé dans différents milieux: un b cher rempli avec l'eau du robinet placé sur une plaque chauffante, glace, acétone. La pression du gaz contenu dans la partie arrondie du manomètre sera alors affectée par les variations de température dans les divers milieux.

Durant cette expérience, des élèves volontaires construisent un tableau à 2 colonnes, mettant en correspondance les pressions du gaz lues sur le cadran du manomètre et les températures. Les

élèves sont ensuite invités à faire un graphique à partir de ces données, montrant les relations entre ces mesures. L'enseignant les questionne sur la proportionnalité ou non de la relation entre les variables.

L'écriture de la relation algébrique impliquant les variables pression et température est notée au tableau par un élève volontaire qui pense l'avoir déduit de son graphique. L'enseignant rectifie au besoin les erreurs de l'élève, puis il écrit le texte qui suit:

Pour un volume constant, le rapport entre la pression d'un gaz (P) et la température de ce gaz (T) est une constante:

$$P_1/T_1 = k_1$$

et $P_2/T_2 = k_2$

alors $P_1/T_1 = P_2/T_2$

L'enseignant propose alors le problème suivant aux élèves (Bachand et Petit, 1996, p. 73): «*Un cylindre de fer d'un volume de 20,0 L a une pression de 350 mm de Hg à une température de 21 °C. Si la température du cylindre monte à 168 °C, quelle sera la pression dans le cylindre?*» Lorsque les élèves ont terminé ce problème, l'enseignant inscrit la solution au tableau, en la commentant.

$$T_1 = (21\text{ °C} + 273) = 294\text{ °K}$$

$$P_1 = 350\text{ mm Hg}$$

$$T_2 = (168\text{ °C} + 273) = 441\text{ °K}$$

$$P_2 = ?$$

$$P_1/T_1 = P_2/T_2 \quad 350\text{ mm Hg}/294\text{ °K} = P_2/441\text{ °K}$$

$$P_2 = 350\text{ mm Hg} \cdot 441\text{ °K}/294\text{ °K}$$

$$P_2 = 525\text{ mm de Hg}$$

Les élèves reçoivent ensuite une feuille contenant des exercices similaires au précédent.

Le cinquième cours est en quelque sorte une révision des cours précédents. L'enseignant questionne les élèves sur la relation entre les variables pression et volume; des questions de ce type sont formulées: Qu'arrive-t-il à un ballon de baudruche si je presse sur les parois externes de celui-ci ? Est-ce que le volume est modifié ? Si oui, de quelle façon ? Donc vous pensez que plus la pression est grande, plus le volume diminue? Quelle serait la relation entre ces variables? Les élèves notent la relation entre ces deux variables qui est inversement proportionnelle. Puis, l'enseignant

écrit au tableau les relations suivantes, en demandant aux élèves de les commenter ou de dire ce qu'ils en comprennent.

$$P_1 V_1 = k_1$$

$$P_2 V_2 = k_2$$

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

Ce cours complète l'enseignement proprement dit sur les gaz. Les élèves sont alors invités à résoudre les problèmes, à faire les exercices du manuel, en vue de mieux approfondir ce qu'ils savent.

Malgré l'affirmation soutenue de la nécessité d'une approche constructiviste à l'enseignement de la chimie, la séquence précédente d'enseignement montre de façon évidente combien il est difficile de concevoir des situations d'enseignement engageant cognitivement les élèves dans une démarche scientifique.

Dès le premier cours, en effet, l'enseignant semble ouvrir une discussion avec des questions générales, trop générales, qu'il referme immédiatement en invitant les élèves à noter dans leur cahier les éléments qu'il souhaite voir retenir. L'expérience avec la chambre à air n'a ainsi d'autres fonctions que celle d'amener l'enseignant vers un examen des notions qu'il souhaite enseigner.

Dans les cours suivants, l'enseignant propose des expériences visant à cerner les relations entre la température, le volume et la pression d'un gaz. Si le but visé par ces cours est que les élèves s'engagent dans une démarche de modélisation de la conduite d'un gaz, ce but est difficilement atteignable. En effet, l'enseignant guide pas à pas les données qu'il souhaite voir prendre par les élèves et, plus encore, indique comment il souhaite que ces données soient traitées. De plus, il évoque lui-même les connaissances mathématiques, outils de la modélisation. Cette gestion témoigne d'un souci de l'enseignant de livrer la matière et d'en contrôler par un guidage excessif l'apprentissage. Souci qui se réalise au détriment d'un travail conséquent d'acquisition de savoirs par les élèves. Dans une telle optique, les effets Topaze et Jourdain (Brousseau, 1996, pp. 53-55) ne peuvent que se multiplier. L'effet Topaze caractérise la conduite d'un enseignant qui souhaitant vivement que ses élèves produisent la réponse correcte finit par suggérer cette réponse *«en la dissimulant sous des codages didactiques de plus en plus transparents»*, tel un choix de questions qui conduisent à la réponse. L'effet Jourdain est associé à la conduite d'un enseignant qui reconnaît dans les conduites et réponses relativement banales des élèves: *«l'indice d'une connaissance savante.»*

Dans de telles conditions, comme le rapportent Schauble, Klopfer et Raghavan (1991), les expériences réalisées en laboratoire ne semblent souvent que des moyens de retenir l'attention des élèves, en générant des effets. Ou, tout au mieux, elles semblent servir que de tremplin à une présentation ostensive des savoirs (Salin, sous presse). Cette dernière fonction est également manifeste dans la multiplication par l'enseignant des exercices à faire, exercices permettant l'application des formules données en classe.

On peut se demander, à juste titre, en quoi résident les différences entre un tel enseignement et celui qui avait cours dans les années 60? Si les différences ne sont pas plus apparentes dans les pratiques d'enseignement des années 60 et 90, à quoi cela tient-il? Cette dernière interrogation nous semble importante.

Le peu de différences entre l'enseignement des années 60 et 90 nous semble attribuable à divers facteurs. D'abord, s'il est aisé d'évoquer des principes d'enseignement, il est plus difficile de concrétiser ces principes dans un enseignement effectif. Cette concrétisation est d'autant plus difficile que ces principes sont généraux, souvent mal définis. Ainsi, en est-il du principe constructiviste. Que signifie une approche constructiviste de l'enseignement? Si les études piagésiennes montrent bien en quoi consiste une épistémologie génétique que l'on peut qualifier, après coup, de constructiviste, il faut remarquer que ces études n'envisagent pas le problème de la transmission des savoirs par l'enseignement, mais bien celui de la construction des structures de connaissance. Et, si une telle construction a été étudiée en relation avec diverses catégories de la connaissance et dans le cadre d'épreuves spécifiques, elle n'a pas encore pris en compte l'intention d'enseigner un savoir institué qui caractérise le projet de l'enseignement, comme le remarque fort à propos Brun (1994). Une approche constructiviste de l'enseignement est un produit de la transposition de savoirs élaborés en d'autres lieux et à d'autres fins que ceux poursuivis dans l'enseignement de savoirs institués.

Dire que l'enseignement des années 60 et 90 est comparable, cela peut aussi vouloir dire que l'enseignement est réalisé dans une institution qui a ses traditions, ses rites, ses méthodes. On peut parler alors d'une culture institutionnelle qui traverse les générations d'enseignants, membres de cette institution. Une telle culture, que l'on peut également qualifier de traditionnelle, a ses raisons d'être pour le maintien de l'institution; elle prémunit aussi contre les modes qui suscitent l'engouement mais qui sont souvent passagères, ne pouvant souvent résister aux problèmes nouveaux qu'elles engendrent.

Enfin, il importe d'affirmer la complexité de construire des situations d'enseignement permettant aux élèves de faire des sciences pour les apprendre. Dans notre recherche, nous tenterons de prendre en compte les études épistémologiques et didactiques sur l'enseignement des sciences et des mathématiques dans la construction de situations d'enseignement qui puissent permettre la construction de connaissances sur la chimie des gaz par une entrée des élèves dans une démarche d'interrogation et de modélisation scientifique. Ces études seront examinées dans le chapitre suivant définissant le cadre théorique de notre recherche.

RESULTATS PROBLEMATIQUES DES PRATIQUES D'ENSEIGNEMENT DE LA CHIMIE DES GAZ PARFAITS

Lors de l'examen des pratiques d'enseignement des sciences et notamment, de la chimie des gaz parfaits, nous avons émis plusieurs réserves sur ses pratiques et sur leurs possibilités d'engager les élèves dans un processus d'adaptation de leurs connaissances qui produit une transformation de leurs conceptions naïves des notions impliquées dans la loi des gaz parfaits et qui permet une résolution juste et éclairée de problèmes concernant les comportements des gaz parfaits. Il importe maintenant de préciser davantage les résultats problématiques des pratiques d'enseignement de la chimie des gaz parfaits.

La persistance de conceptions naïves

La majorité des notions impliquées dans l'enseignement de la loi des gaz parfaits ont été enseignées dans les cours de sciences précédant cet enseignement. Des laboratoires visant l'examen des propriétés de la matière ont ainsi été réalisés dans les cours de sciences physiques de la deuxième et de la quatrième année secondaire. Pourtant, lors des rappels effectués, dans les divers cours sur l'enseignement de la chimie des gaz parfaits, très peu d'élèves montrent des conceptions satisfaisantes de ces notions; les conceptions naïves prédominent et ne semblent pas ainsi avoir été affectées par les enseignements antérieurs. Comme le souligne Treagust (1995), il est possible que ces conceptions soient celles construites par les élèves avant l'enseignement; il est aussi possible que ces conceptions aient été élaborées au cours d'un enseignement inapproprié. Avant de discuter du problème de la persistance des conceptions naïves, il nous semble approprié de rapporter brièvement les principales conceptions naïves sur les gaz mises en évidence dans plusieurs études.

Selon les travaux de Piaget et Inhelder (1962), Driver (1985), Erickson et Driver (1983), Tiberghien (1980), les enfants se représentent très difficilement l'état gazeux de la matière. Et pour cause! En effet, les paramètres qui définissent les grandeurs physiques des gaz sont moins évidents

que ceux qui entrent dans la définition des grandeurs physiques des solides et des liquides. De plus, lors de jeux éducatifs qui impliquent l'identification des paramètres physiques, les enfants manipulent davantage les solides et les liquides.

Dans des études visant à mettre en évidence les conceptions naïves des élèves, Stavy (1988, 1991, 1995) a demandé à des enfants de 6 à 13 ans de classer les éléments selon l'état de la matière qu'ils représentent: solides, liquides ou gazeux. Les résultats de ces études montrent que seulement 5% des enfants de 6 ans sont capables d'identifier correctement un gaz; ce pourcentage passe à 55% chez les élèves de 13 ans. Cette amélioration, selon Stavy (1995), n'est pas significative d'une meilleure définition de chacun des états de la matière, mais d'une meilleure reconnaissance des propriétés associées à chacun des états de la matière. Nous verrons plus loin quelles sont les propriétés retenues.

Lorsqu'il est question des actions exercées par les gaz et plus généralement, des lois sur les gaz parfaits, les représentations des élèves sur l'état gazeux de la matière et sur les notions de quantité, de volume, de pression et de température forment un réseau assez complexe de conceptions (Lemeignan et Weil-Barais, 1988; Séré et Moppert, 1989). Des études conduites par Séré et Moppert (1989), par Thouin (1996) et par Stavy (1988, 1991, 1995), nous retenons les conceptions principales suivantes:

- a) Les particules qui composent la matière sont identiques et les propriétés des particules rappellent celles des corps.
- b) La masse de l'air est nulle.
- c) Un contenant vidé de son contenu liquide est vide.
- d) Les gaz exercent des forces sur les objets uniquement si ces objets sont en mouvement.
- e) Les gaz ne poussent (expression souvent utilisée par les élèves pour parler de la pression) que s'ils sont eux-mêmes poussés ou encore, si on augmente leur température.
- f) Les comportements des gaz sous l'effet d'une transformation de la température relèvent de connaissances stéréotypées qui s'expriment ainsi: l'air chaud monte, l'air chaud est léger. Les commentaires des élèves ne concernent que l'air chaud; les élèves n'expriment aucune opinion sur les conduites de l'air froid.

g) Si les élèves peuvent concevoir un mouvement de particules, ce mouvement se fait dans une seule direction (monter et descendre) et le gaz en est le seul responsable.

h) Un gaz détendu a une pression nulle et n'exerce aucune force; un gaz que l'on chauffe se dilate suivant le mouvement de l'air. Il exerce alors une action sur une paroi souple et exclusivement sur elle.

i) La pression d'un gaz n'agit que de bas en haut.

j) La température d'un corps est liée à sa taille et son poids.

k) En l'absence de source continue d'énergie calorifique, le mouvement des particules d'un gaz s'atténue et peut même cesser.

Ce bref énoncé de diverses conceptions sur les gaz et leurs comportements montre bien l'engagement cognitif de l'enfant ou de l'élève, dans un processus d'élaboration d'explications de phénomènes liés à des expériences variées (Goethe, 1978: voir di Sessa, 1981). L'enfant ou l'élève, à l'instar de tout individu, a tendance à retenir les expériences dans lesquelles les résultats physiques sont différents de ce qu'il considère normal. Il s'en suit un processus de filtration au travers des cas qu'il perçoit dans son quotidien, à partir de la répétition d'un phénomène qu'il jugeait anormal au début. Ce phénomène ainsi repéré, l'individu essaie de le classer parmi d'autres, de l'expliquer. Ce processus de filtration, de classification et d'explication des phénomènes conduit vers des conceptions de plus en plus organisées. Comment ces conceptions interviennent-elles dans l'enseignement de la chimie des gaz? Comment sont-elles modifiées en cours d'enseignement? Quelles sont les conceptions qui demeurent inchangées et comment cette persistance se manifeste-t-elle?

A l'entrée dans le cours sur la chimie des gaz parfaits, la majorité des élèves ont retenu des cours de sciences des connaissances fort réduites sur les états de la matière. Sur les gaz, ils déclarent qu'il s'agit d'une matière compressible et extensible dont le poids est faible; cette déclaration est faite, en ces termes par une forte proportion d'élèves. Certains élèves ajoutent que les gaz sont formés de particules. Ces déclarations laissent souvent une impression de redites d'énoncés lus, entendus et retenus. Cette impression qui se dégage des observations que nous avons recueillies au fil des années ne nous est pas singulière. En effet, dans ses études sur les conceptions de la matière et en particulier, des gaz chez les élèves de 6 à 13 ans, Stavy (1988, 1991, 1994) fait état de résultats

similaires. Ces résultats montrent que si, à la suite d'un enseignement, les élèves savent décrire un gaz comme une matière formée de particules et ayant un faible poids, seulement 25% d'entre eux peuvent effectuer des comparaisons entre les particules qui forment les gaz et les autres états de la matière et 15% savent expliquer les changements d'états en utilisant la théorie particulaire.

Chez les élèves que nous avons rencontrés lors de notre enseignement, la référence au caractère d'extensibilité des gaz se manifeste de façon évidente dans leur interprétation de la conduite d'un gaz chauffé. Ainsi, les élèves parlent d'explosion d'un ballon ou d'un pneu sous l'effet de la chaleur; lorsqu'on chauffe un gaz, il prend plus de place, disent-ils. L'exemple du gonflement d'un pneu est celui que les élèves donnent le plus souvent et supporte un raisonnement analogique sur l'explication particulaire de l'augmentation de volume. Ainsi, les particules, les molécules selon les élèves, se gonflent également sous l'effet de la chaleur.

Il faut admettre que ces conceptions sont difficilement contredites par les premières expériences faites en laboratoire, de telle sorte que l'enseignant croit naturellement légitime de poursuivre son exposé sur les lois des gaz parfaits, s'il ne s'enquiert pas du sens que les élèves donnent aux premières déclarations en apparence savantes sur les gaz et s'il est peu informé des conceptions naïves ou des préconceptions des phénomènes scientifiques chez les élèves, comme le soulignent Berg et Brouwer (1991). Si l'enseignement subséquent permet quelquefois de modifier certaines de ces conceptions, ces modifications peuvent aussi quelquefois produire des almagames assez surprenants entre ces conceptions et celles associées à la théorie particulaire. Certains élèves questionnés en fin d'année retiennent et l'augmentation de la taille des particules et de l'espace entre les particules pour expliquer l'effet de la température et de la pression sur le volume d'un gaz. Le mouvement des particules, lorsqu'il est invoqué, est associé à des explications fort variées faisant intervenir le transfert de chaleur. Examinons de plus près ces explications qui montrent la persistance des conceptions naïves.

Plusieurs chercheurs (Kesidou et Duit, 1993; Wiser et Carey, 1983) ont montré que, même après un enseignement, peu d'élèves semblent comprendre le mouvement des particules et le transfert de chaleur. Anderson (1990) et Rennstrom (1987: voir Kesidou, Duit et Glynn, 1995) expliquent cette situation par le fait que la majorité des élèves effectuent un transfert des caractéristiques du monde macroscopique vers le monde microscopique. La croyance erronée des élèves de 15 et 16 ans que nous avons pu observer et que plusieurs chercheurs ont également rapportée (Brook, Briggs, Bell et Driver, 1984: voir Kesidou, Duit et Glynn, 1995) est la suivante: lorsqu'une substance est chauffée, elle tend à fondre ou à augmenter de volume. Les élèves croient aussi que les gaz ont un niveau d'inertie faible et demandent peu d'énergie pour avoir un mouvement.

D'autres croient qu'en se frappant les unes contre les autres, les particules deviennent alors plus chaudes et que la chaleur se transfère d'une particule à l'autre, expliquant ainsi le processus de conduction. Les élèves perçoivent aussi les particules dans un état de mouvement; la diminution continue du mouvement permet d'atteindre un état stable, comme le souligne Stavy (1995).

Un autre résultat problématique de l'enseignement de la chimie des gaz concerne la confusion entre la pression atmosphérique et la pression interne d'un récipient contenant du gaz. Cette confusion est, il nous semble, en partie créée par les expériences initiales dans lesquelles il est fait mention uniquement de la pression ambiante. Cette confusion n'affecte pas les performances des élèves à des problèmes, lorsque les récipients dont il est fait mention dans ces problèmes ont des parois rigides; mais, lorsqu'il s'agit de récipients à parois élastiques, cette confusion conduit à un échec. De plus, lorsque dans une situation, l'enseignant évoque un déséquilibre entre la pression interne et externe d'un ballon, par exemple, l'élève est porté à répondre que c'est la pression ambiante qui varie. Si on ajoute à cette confusion, les conceptions naïves rappelées précédemment, on peut se demander à juste titre quel sens l'élève peut construire des énoncés suivants que l'enseignant fait étudier: les gaz exercent une pression à cause des collisions entre les molécules et la surface avec laquelle elles entrent en contact; l'agitation des molécules est reliée à l'énergie cinétique, associée à une température donnée.

En nous référant aux observations que nous avons recueillies au cours de notre enseignement et aux résultats de certaines études, nous avons identifié plusieurs conceptions naïves rencontrées chez les élèves et nous avons montré que plusieurs de ces conceptions ne sont pas affectées par l'enseignement sur les lois des gaz parfaits. Nous complétons cette première partie par une présentation de quelques items d'examen peu réussis par les élèves au terme d'un enseignement de cette matière. Nous devons convenir que les examens actuels sont de pauvres outils pour mettre en évidence les conceptions naïves, car la tendance est d'éviter d'inclure dans les examens des questions ou des problèmes sources de difficulté. Les examens trahissent aussi la vision quasi-algorithmique qui caractérise l'enseignement sur les gaz. Dans notre consultation électronique des sites WEB traitant de l'enseignement des lois sur les gaz parfaits, nous avons relevé une étude effectuée par Kautz, Héron et McDermott (1998; introduction à un séminaire gradué sur la pédagogie de la physique) qui montre comment l'enseignement des lois des gaz parfaits ne permet pas aux élèves de développer des connaissances et savoir-faire adéquats à propos des gaz parfaits; malheureusement, les résultats de cette étude ne nous sont pas encore accessibles.

Items d'examen peu réussis

Item 1

Lequel des énoncés suivants explique l'augmentation de pression qui se produit lorsque la température d'un gaz est augmentée et son volume gardé constant.

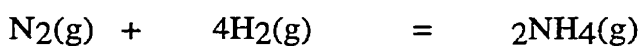
- a) L'élasticité des molécules augmente.
- b) La fréquence des collisions entre les molécules et les parois du contenant augmente
- c) L'espace séparant les molécules du gaz augmente.
- d) La masse volumique du gaz augmente.

Réponses 1

Même si au cours de l'enseignement, ces diverses explications ont été examinées par l'enseignant lors de situations et de problèmes appropriés, lors de l'examen de fin d'année donné aux élèves, un nombre important d'élèves choisissent l'explication C. L'agitation des molécules associée à l'augmentation de l'énergie cinétique semble moins évidente que l'augmentation de l'espace entre les molécules. On pourrait attribuer cette réponse erronée à un défaut de prise en compte de l'ensemble des paramètres de la situation évoquée par l'énoncé; on pourrait aussi penser que le choix c est davantage en accord avec les représentations initiales sur les gaz. Quoiqu'il en soit, cette réponse produite par une majorité d'élèves montre bien les limites de l'enseignement.

Item 2

Dans un laboratoire, à T.P.N. on fait la synthèse de l'ammoniac selon l'équation suivante :



Considérant que la pression ambiante demeure stable. Quel sera le volume final de l'ammoniac si la température passe à 20 °C. ?

Réponses 2

Pour résoudre ce problème, on doit considérer qu'une mole de n'importe quel gaz à T.P.N. occupe un volume de 22,4 L. Dans le cas présent, nous avons deux moles; le volume à T.P.N. sera de 44,8 L. Cette mesure définie, on peut ensuite utiliser la relation $V_1/T_1 = V_2/T_2$. V_2 est la valeur inconnue; T_1 est la température 273 °K; T_2 est la température 293 °K. Il s'agit, somme toute, d'un problème fort courant dans ce cours. Pourtant, en fin d'année, plusieurs élèves associent à V_1 la valeur 2 Litres, confondant volume du gaz et nombre de moles ($2\text{NH}_3(\text{g})$);

d'autres élèves oublient de faire la transformation en °Kelvin; certains élèves se contentent de répondre 2 Litres; d'autres commettent des erreurs dans l'utilisation de la relation. La confusion entre le nombre de moles et le volume d'un gaz est assez étonnante, étant donné le temps consacré à des problèmes de ce type en classe. On peut faire l'hypothèse que la nécessité d'assigner des valeurs aux paramètres de la relation occulte un travail plus important sur le sens des notions impliquées dans le problème. On peut aussi supposer que l'oubli de la mesure du volume d'un gaz à T.P.N. est en cause et que la nécessité de réponse contraint certains élèves à choisir parmi les nombres impliqués, un nombre pouvant entrer dans le calcul.

Item 3

Paul gonfle une chambre à air; il utilise 2,5 L d'air. Si Paul gonflait cette chambre à air sur une planète où la température est la même, mais la pression atmosphérique est le triple de la notre. Quel volume d'air devrait-il utiliser s'il veut que sa chambre à air soit aussi grosse que celle qu'il a sur la terre?

Réponses 3

Considérant que la température est la même que sur la terre, il n'y a seulement que la pression qui varie. Le volume varie alors inversement avec la pression externe. Selon la relation $P_1V_1 = P_2V_2$, le volume sera trois fois plus petit sur la planète. Pour pouvoir conserver des volumes égaux sur la terre et sur la planète, il faudra mettre trois fois plus de gaz dans la chambre à air qui est sur la planète que dans celle qui est sur la terre, afin de maintenir le même équilibre entre les pressions externes et internes dans les deux conditions.

Plusieurs élèves n'effectuent pas ce problème, ne sachant interpréter les rapports entre les pressions externes et internes dans ces conditions. Interrogés, ces élèves avouent ne pouvoir résoudre ce problème, puisqu'ils ne peuvent changer la température.

Item 4

Un litre de dihydrogène pèse 0,0893g. Peux-tu utiliser cette information pour montrer qu'une mole de molécules occupe un volume de 22,4 L?

Réponses 2

Ce problème dont la solution mathématique est plus simple que celles que les élèves rencontrent dans plusieurs autres problèmes est échoué d'une année à l'autre par la très grande majorité des élèves. Pourtant ces élèves ont effectué divers exercices d'identification de gaz en recourant aux connaissances impliquées dans ce problème et à des calculs similaires à ceux exigés par ce problème.

Plusieurs élèves avouent ne pas comprendre ce qui est demandé ou encore, manquer d'information pour résoudre le problème, entre autres, le nom de la mole de molécules qui occupe un volume de 22,4 L. D'autres élèves effectuent justement les calculs, mais ne peuvent interpréter le résultat de ces calculs. D'autres élèves, quoique moins nombreux, disent qu'on ne peut montrer ce qui est demandé pour toute sorte de molécules de gaz, arguant qu'il faut aussi considérer le poids atomique et que le volume dépend de ce poids.

Ces exemples de réponses à des questions d'examen, ainsi que les observations que nous avons recueillies durant l'enseignement de la chimie des gaz et celles que nous avons puisées des études publiées sur les conceptions des élèves, montrent de toute évidence que l'enseignement actuel n'est pas satisfaisant. Même en privilégiant une démarche constructiviste, l'enseignement semble vite bifurquer vers un enseignement ostensif des lois et concepts. Mais, là encore, cet enseignement produit des résultats fort discutables. Les difficultés d'application des lois sur les gaz sont aussi manifestes. Examinons ces difficultés.

Les problèmes d'interprétation et d'application des lois sur les gaz parfaits

Depuis plusieurs années, les rapports des élèves aux savoirs mathématiques sont invoqués par des enseignants de sciences et des chercheurs en didactique des sciences et des mathématiques pour expliquer certains problèmes d'enseignement des sciences (Camacho et Good, 1989; Heller, Ahlgren, Post, Behr, Lesh, 1989; Larkin, McDermott, Simon (D.P.), Simon (H. A.), 1980; Steen, 1987). Steen (1987) soutient que, dans plusieurs contextes, les sciences se distinguent difficilement des mathématiques. Suivant l'interprétation de certains travaux de Chevallard concernant le savoir mathématique (Chevallard, 1991), il nous semble qu'une telle similitude concerne davantage le symbolisme ou le sémiotisme des praxèmes que les objets de savoir. Cette remarque n'exclut toutefois aucunement que des savoirs mathématiques fonctionnent en sciences. C'est en effet le fonctionnement de ces savoirs qui apparaît à plusieurs un véritable défi pour l'enseignement des sciences.

Dans l'enseignement actuel de la chimie des gaz parfaits, les problèmes d'application des lois des gaz parfaits occupent un espace important. Ces lois impliquent la notion de proportionnalité. Cette notion est reconnue un des pivots le plus ancien et le plus fondamental reliant les mathématiques aux sciences (Rouchier, 1991). Kieren (1988, 1989), Noelting et Béland (1988), Ricco (1982) et Viennot (1989) ont montré que la maîtrise de la proportion métrique ne constitue pas l'achèvement du développement du raisonnement proportionnel. Ainsi, dans des épreuves où les variations dépendent de plusieurs variables ou paramètres, comme c'est le cas en chimie des gaz, plusieurs élèves de 16 ans ne peuvent conduire un raisonnement proportionnel approprié. Viennot (1989) a aussi obtenu des résultats comparables dans sa recherche sur le développement de concepts de la physique. Elle a de plus montré que la notion de proportionnalité intervenant dans les raisonnements linéaires (fonctions simples) constitue un obstacle à la construction de connaissances en sciences que l'enseignement ne sait pas encore prendre en compte.

Au fil des années, nous avons ainsi pu observer plusieurs difficultés d'interprétation et d'application des lois sur les gaz parfaits. Malgré les interventions ponctuelles faites au cours de l'enseignement, plusieurs de ces difficultés demeurent à la fin de l'enseignement. Nous examinons certaines des erreurs que nous avons notées dans les réponses des élèves aux examens utilisés durant les dernières années.

Items d'examen peu réussis

Item 1

- a) Quel sera le volume final du dioxygène gazeux à une température de 150°K , si à une température initiale de 27°C , le volume était de $8,0\text{ L}$?
- b) Quel sera le volume du même gaz, si la température de 150°K obtenue précédemment est diminuée de 50°K ?

Réponses 1

Le premier problème de cet item est identique à celui solutionné en classe par l'enseignant (voir le second cours de la séquence d'enseignement décrite précédemment). Quelques élèves omettent toutefois de faire la conversion en Kelvin de la température de 27°C . Mais, si la plupart des élèves réussissent ce problème, il en est autrement du second problème. En effet, près de la moitié des

élèves enlèvent d'abord 50 L au volume de 4 L obtenu à la suite de la résolution du premier problème. Obtenant un volume négatif, certains élèves abandonnent le problème, d'autres enlèvent 1/3 L au volume de 4 L, d'autres enfin recourent à la formule $P_1V_1/T_1 = P_2V_2/T_2$ (bien que la pression soit constante) et effectuent les calculs correctement.

Le traitement additif du rapport dans le second problème n'est pas singulier à ces élèves, comme le montrent les résultats des études ci-haut rappelés. Dans notre étude visant à mieux comprendre le fonctionnement des savoirs sur la proportionnalité en classe de chimie et en classe de mathématiques (Lemoyne et Gauthier, 1996), nous avons retrouvé également des résultats comparables.

Les réponses des élèves au second problème de cet item montrent aussi, il nous semble, comment le traitement mathématique de ce problème occulte le contrôle sémantique qui pourrait être effectué par l'activation de connaissances sur la chimie des gaz. Seul le rejet d'un volume négatif nous semble en effet montrer une entrée de connaissances, par ailleurs générales, sur la notion de volume. Les conduites des élèves ne nous apparaissent pas supportées par un raisonnement qualitatif sur les relations entre les paramètres impliqués dans le problème ou par un calcul relationnel, selon le sens donné par Vergnaud à ce calcul dans sa théorie des champs conceptuels (Vergnaud, 1991).

Item 2

Une masse de gaz a un volume de 6,4 L, mesurée à 65 °C. A quelle température son volume ne sera plus que de 405 mL?

Réponses 2

Plusieurs élèves se contentent d'écrire la formule $V_1/T_1 = V_2/T_2$, se disant incapables de poursuivre parce qu'ils ignorent la mesure de la masse du gaz. Face à la difficulté précédente, certains élèves cherchent à faire le calcul de la masse du gaz utilisé en faisant une règle de trois avec le volume d'une mole à T.P.N. Comme il manque des données, ils abandonnent leur solution. Par ailleurs, si on retire de l'énoncé de ce problème la référence à la masse du gaz (ex: Un gaz à un volume de ...), la majorité de ces élèves savent résoudre correctement ce problème.

Ces conduites témoignent d'un rapport particulier au travail de résolution de problèmes, rapport que la notion de contrat didactique (Brousseau, 1996) a permis de mieux comprendre. En effet, ces

élèves jugent normal d'utiliser toutes les données du problème. Dans ce problème, l'absence de mesures de masse les amène à abandonner leur solution. Pourquoi n'invoquent-ils pas leurs connaissances sur les notions impliquées pour lever cette impasse? Est-ce uniquement parce que leur lecture des attentes de l'enseignant est primordiale? Est-ce aussi parce qu'ils doutent de leurs connaissances?

Item 3

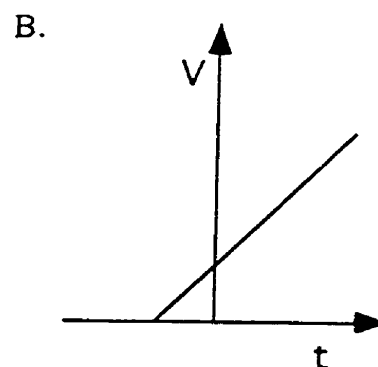
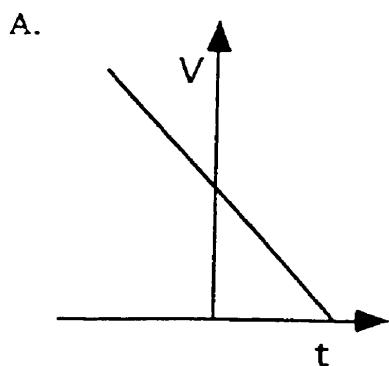
La température et le nombre de moles d'un gaz sont maintenus constants pendant que la pression est doublée. Que pouvez-vous dire du volume du gaz qui résulte de cette variation.

Réponses 3

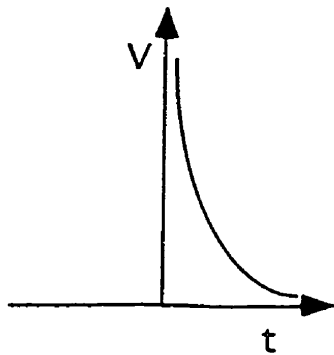
Plusieurs élèves ne savent répondre à cette question, invoquant l'absence du volume dans l'énoncé du problème. D'autres élèves écrivent la formule usuelle $P_1V_1/T_1 = P_2V_2/T_2$ et attribuent des valeurs numériques aux variables de ces formules; ils trouvent une réponse chiffrée et arrêtent là leur travail. Lorsque l'enseignant leur demande s'ils peuvent dire ce qui arrive dans de telles conditions pour tout gaz, ils se disent incapables de répondre ne connaissant ni le gaz impliqué ni son volume de ce gaz. Enfin, quelques élèves répondent correctement, mais avouent douter de leur réponse.

Item 4

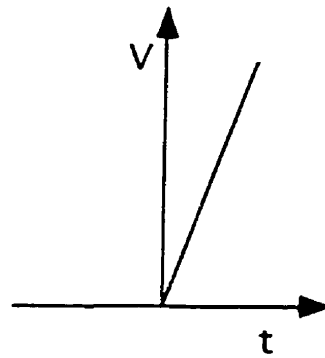
Parmi les graphes suivants, lequel représente correctement la variation du volume d'un gaz en fonction de sa température exprimée en °Celsius?



C.



D.

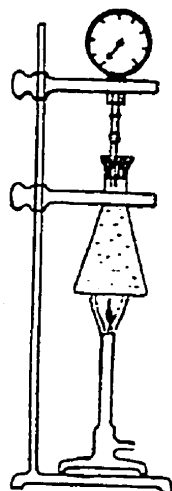


Réponses 4

Moins de la moitié des élèves choisissent le graphe B. Le choix le plus fréquent est le graphe D; certains élèves choisissent C selon une interprétation erronée du rapport de proportionnalité. Les arguments avancés par les élèves pour rejeter le graphe B sont variés: on ne peut avoir des valeurs négatives; si on a un rapport de proportionnalité, le graphique de la fonction ne peut couper l'axe des x; à 0 degré, le volume est 0, si on fait un bon graphique.

Item 5

On chauffe avec un brûleur à gaz muni d'un indicateur de pression, un erlemeyer contenant un gaz. A partir de la relation des gaz illustrée par ce montage: a) Écris, sous forme symbolique, son énoncé littéral. (Qualitative); b) Écris ses relations mathématiques (Quantitatives); c) Dessine sa représentation graphique.



Réponses 5

En réponse à la question a, un bon nombre d'élèves décrivent ce qu'ils voient mais ne peuvent identifier correctement les variations. Chez près du tiers des élèves, l'écriture des relations (question b) est souvent incorrecte; ainsi, on retrouve fréquemment, l'écriture suivante: $P = T$. Par ailleurs, la grande majorité des élèves savent produire une représentation graphique adéquate; même les élèves qui écrivent $P = T$ en b savent produire une représentation juste. Il est assez étonnant qu'une relation très fréquemment traitée dans les cours soit encore, chez plusieurs élèves, difficile à exprimer mathématiquement.

Discussion

Nous avons fait état de plusieurs résultats problématiques des pratiques actuelles d'enseignement de la chimie des gaz parfaits. Pour mieux organiser la description et l'analyse de ces résultats, nous avons distingué deux classes de résultats: la première concerne la persistance des conceptions naïves et la seconde, les difficultés d'interprétation et d'application des lois sur les gaz parfaits. Ces classes ne sont toutefois pas disjointes, comme nous l'avons montré à certaines occasions.

Dans cet exposé des résultats problématiques, nous avons fait appel à plusieurs études sur les conceptions naïves. Pour montrer les problèmes d'interprétation et d'application des lois sur les gaz parfaits, nous avons également rappelé les difficultés associées au raisonnement proportionnel. Nous avons enfin fait état d'observations sur les conceptions des gaz et sur les problèmes d'application des lois sur les gaz que nous avons recueillies au fil des années. Si l'ensemble de ces résultats permet de dresser un portrait des problèmes d'enseignement de la chimie des gaz parfaits, il faut souligner les limites d'un tel portrait.

En effet, nous disposons actuellement de peu d'études qui permettent d'examiner les conditions de production de tels résultats. Nous pouvons bien sûr caractériser l'enseignement en nous référant aux programmes, aux manuels et aux pratiques en usage. Cette caractérisation fait toutefois abstraction du rôle essentiel des échanges didactiques, échanges entre l'enseignant et les élèves dans le cadre de l'enseignement réalisé. Tous les chercheurs en didactique savent combien ces échanges influent sur les connaissances et savoirs qui seront construits par les élèves (Brousseau, 1986, 1996; Johsua et Dupin, 1993). Il n'est pas exclu que ces échanges marquent tout autant que les approches et les contenus d'enseignement les connaissances et savoirs construits par les élèves. Comme le montrent Berg et Brouwer (1991), des enseignants qui sont peu informés des

conceptions naïves des élèves ou qui ne peuvent les prendre en compte dans leurs échanges avec les élèves peuvent priver ces derniers de possibilités de transformation de ces conceptions, quels que soient par ailleurs les expériences et les problèmes qu'ils utilisent dans leur enseignement. Pour mieux comprendre les problèmes que pose l'enseignement de la chimie des gaz et proposer des alternatives aux pratiques actuelles d'enseignement, il nous semble essentiel d'examiner non seulement les approches et les contenus d'enseignement, mais aussi les interactions didactiques en cours d'enseignement.

Malgré les réserves que nous faisons concernant les résultats que nous avons mis en évidence dans notre examen des pratiques d'enseignement de la chimie des gaz, il faut reconnaître que ces résultats montrent de façon éloquente les difficultés de penser un enseignement qui pourrait faire entrer les élèves dans un rapport autre que technologique à la chimie des gaz parfaits, qui pourrait faire entrer les élèves dans une culture ou encore, une pratique scientifique. L'importance d'aménager l'entrée des élèves dans une pratique scientifique a maintes fois été soulignée par plusieurs chercheurs, notamment par Kuhn (1993) et par Schauble, Klopfer et Raghavan (1991).

ORIENTATIONS ET QUESTIONS DE NOTRE RECHERCHE

Les problèmes que pose l'enseignement de la chimie des gaz parfaits sont nombreux. L'analyse des pratiques d'enseignement de cette matière et des résultats de cet enseignement nous a permis de soulever plusieurs questions. Il importe maintenant de préciser les questions de notre recherche. Pour rendre plus intelligibles ces questions et en saisir la portée, quelques précisions sur les orientations de notre travail s'imposent.

Dans cette recherche, les activités d'enseignement de la chimie des gaz parfaits qui seront étudiées seront réalisées dans le cadre d'un enseignement régulier dispensé à des élèves de la cinquième secondaire, en prenant en compte les contraintes didactiques et institutionnelles et les ressources matérielles limitées avec lesquelles les enseignants de ce milieu doivent composer. Dans l'examen des pratiques d'enseignement et des résultats de ces pratiques, nous avons déploré le manque d'information sur les conditions de réalisation de ces pratiques et sur les conditions de production des résultats problématiques que nous avons relevés. Nous nous proposons d'agir dans et sur le système didactique actuel pour mieux comprendre les possibilités et les limites des activités d'enseignement que nous pouvons mettre en place.

Dans le second chapitre, nous aurons l'occasion de mieux définir les cadres épistémologique et didactique qui guideront la conception de nos activités d'enseignement. Contentons-nous pour le

moment d'indiquer que la modélisation mathématique sera au coeur de ces activités d'enseignement. Comme le souligne Thouin (1996, p. 165), les mathématiques «*font partie intégrante du langage des sciences de la nature*». Dans le cas de la chimie des gaz parfaits, les observations peuvent être exprimées par des grandeurs de volume, de pression et de température; la construction de relations mathématiques entre ces grandeurs dans le travail de modélisation vise l'explication et la prédiction des conduites des gaz parfaits. Ainsi envisagé, le modèle est un outil de représentation, de prédiction et de conceptualisation des phénomènes sur les gaz parfaits. La modélisation mathématique fait partie des pratiques des scientifiques (Orange, 1997); dans l'enseignement que nous envisageons, nous comptons ainsi faire entrer les élèves dans une telle pratique et non uniquement, dans un travail technique d'application des lois sur les gaz parfaits qui, comme nous l'avons montré antérieurement, ne permet pas aux élèves de donner sens à ces lois et aux concepts et théories sur les gaz parfaits.

Les questions principales auxquelles notre recherche veut apporter des éléments de réponse sont les suivantes:

1- Comment prendre en compte les conceptions naïves des élèves sur les gaz dans la conception et la gestion d'un enseignement qui puisse leur permettre de transformer ces conceptions et de construire des conceptions satisfaisantes des notions impliquées dans les lois sur les gaz parfaits?

2- Comment prendre en compte les problèmes de construction des rapports proportionnels que rencontrent les élèves dans l'interprétation et l'application des lois sur les gaz parfaits, dans la conception et la gestion d'un enseignement qui puisse leur permettre d'interpréter les résultats des expériences, d'éprouver leurs conceptions, de donner un sens aux relations impliquées dans les lois des gaz parfaits et plus globalement, d'entrer dans une pratique scientifique?

3- Comment les contraintes didactiques et institutionnelles et les ressources matérielles avec lesquelles l'enseignement doit composer influent sur le processus de conception et de gestion d'un enseignement qui vise les objectifs définis dans les questions précédentes?

CHAPITRE II
CADRE THEORIQUE

Dans la présentation de la problématique de notre recherche, au premier chapitre, nous avons montré comment les conceptions naïves des élèves sur les notions impliquées dans les lois des gaz parfaits et sur l'interprétation de ces lois sont peu affectées par l'enseignement; nous avons aussi fait état des difficultés d'interprétation et d'application des lois des gaz parfaits dans la résolution de problèmes. Nous avons aussi effectué un examen critique de l'enseignement. Ce travail nous a permis de préciser les questions de notre recherche.

Dans ce second chapitre, nous dressons un portrait de l'évolution des concepts et des pratiques scientifiques relatifs à l'étude des gaz et de la chaleur, au cours de l'histoire. Dans l'exposé des pratiques scientifiques, nous procédons à une analyse plus poussée de la méthode expérimentale, en relation avec la modélisation de phénomènes scientifiques. Les notions de modèle et de modélisation sont alors précisées. Le processus de modélisation est également examiné et son application dans l'étude des conduites des gaz parfaits est brièvement commentée. Ce premier travail nous conduit, dans un second temps, à mieux cerner les défis et les enjeux de l'enseignement des sciences et notamment, de la chimie des gaz parfaits; ce travail est réalisé par une clarification de certaines orientations et principes pour l'enseignement de la chimie des gaz parfaits, par un examen de diverses propositions didactiques et par une présentation de certains concepts et outils de la théorie des situations didactiques auxquels nous nous référons pour construire notre séquence d'enseignement de la chimie des gaz parfaits. Nous complétons ce chapitre par une présentation des objectifs de notre recherche.

L'ÉVOLUTION DES CONCEPTS ET DES PRATIQUES SCIENTIFIQUES RELATIFS À L'ÉTUDE DES GAZ ET DE LA CHALEUR, AU COURS DE L'HISTOIRE

Selon plusieurs chercheurs en sciences cognitives, en philosophie et en histoire des sciences, les procédés utilisés dans la description et l'analyse du développement des connaissances dans un champ d'étude donné et dans la description et l'analyse du processus de construction de connaissances chez l'individu ont beaucoup plus en commun que ce que nous serions enclins à

penser spontanément (Duschl, Hamilton et Grandy, 1990; Duschl et Gitomer, 1991; Carey, 1986; Piaget 1970; Rissland, 1985; Vosniadou et Brewer, 1987). Ces descriptions et analyses partagent fréquemment un lexique commun: schème, concept, réseau conceptuel, théorie, modèle, ... Plus encore, selon Duschl et Gitomer (1991), dans l'évolution des connaissances au fil de l'histoire et dans celle réalisée chez un individu, le recours à des exemples et à des analogies est frappant. Ces similitudes de surface recouvrent-elles des similitudes plus profondes sur les genèses? Peu de chercheurs oseraient apporter des réponses précises à cette question. Pourquoi alors s'encombrer d'un tel détour historique?

A l'instar des chercheurs précédents, nous pensons qu'être informé sur l'évolution des concepts et des pratiques scientifiques au cours de l'histoire permet d'abord de mieux comprendre les pratiques actuelles en sciences, de mieux apprécier la complexité de l'enseignement des sciences, d'être plus attentif aux conceptions naïves des élèves et de mieux en comprendre l'utilité, mais également les limites. Se renseigner sur l'évolution historique des concepts et pratiques scientifiques permet enfin de résister à la tentation utopique de croire qu'il pourrait être possible de construire un enseignement qui puisse à court terme permettre la transformation ou le rejet de l'ensemble des conceptions naïves et la construction de conceptions adéquates, scientifiques. Comme le font remarquer plusieurs chercheurs (Ruel, 1986; Berg et Brouwer, 1991), lorsque les conceptions ou les modèles des élèves sont examinés en situation d'enseignement, on assiste dans le meilleur des cas à une réorganisation et à une transformation de ces modèles et conceptions, à la création très souvent de versions sophistiquées des conceptions initiales et, dans des cas moins favorables, à une juxtaposition des modèles et des conceptions initiales à d'autres modèles et conceptions construits dans l'enseignement et généralement, plus adéquats. Ces précisions étant faites, nous rappelons brièvement les grandes étapes dans l'évolution des concepts et pratiques scientifiques relatifs à l'étude des gaz et de la chaleur. Puis, nous examinons de plus près les relations entre l'expérimentation et la modélisation de phénomènes scientifiques.

L'évolution historique de plusieurs concepts en sciences, comme le soulignent Astolfi et Develay (1989), Bachelard (1967), Koyré (1973), Halbwachs (1974), et Thouin (1996), montre diverses façons d'appréhender et de représenter l'univers. Pour montrer comment ces façons ont évolué au cours de l'histoire, nous rappelons l'évolution des conceptions sur la chaleur et les gaz. Dans ce rappel, nous faisons abstraction des périodes de consensus et de dissensions scientifiques qui ont marqué cette évolution (Kuhn, 1983; Lakatos et Musgrave, 1970, éd. 1974; Thagard, 1990), pour ne retenir que les étapes importantes de cette évolution.

L'évolution au fil de l'histoire des conceptions sur les gaz et la chaleur et la production de résultats expérimentaux

La matière est un des concepts fondamentaux en sciences et plus encore, le principal objet d'étude de la chimie. Le problème de la détermination des frontières de la matérialité a préoccupé les scientifiques et les philosophes pendant des millénaires (Stavy, 1995). La distinction entre la matière et la non matière, la non matière étant identifiée à un agent physique tel la chaleur ou le magnétisme ne comportant pas de masse, a été ainsi acceptée au cours de la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, du moins en ce qui concerne certains éléments. Avant cette période, l'air, la vapeur, le feu, la chaleur étaient tous considérés comme une matière. La transformation de ces conceptions de la matière a été réalisée grâce aux recherches empiriques et aux élaborations théoriques.

1. L'évolution des conceptions sur les gaz

Si les solides et les liquides sont des formes concrètes de la matière qui possèdent des attributs visibles, les gaz sont, en revanche, des formes abstraites de la matière dont les attributs ne sont pas aisément perceptibles. Nous présentons fort succinctement les grands moments de l'évolution des conceptions sur les gaz, en nous appuyant sur des ouvrages écrits à différents moments du siècle actuel (Bauer, 1907; Koyré, 1973; Lockemann, 1959; Serres, 1989).

van Helmont fut le premier à faire référence au mot gaz dans ses écrits datant du XVI^{ème} siècle. Nous attribuons par ailleurs à Rey (1630) les premières expériences montrant que l'air, comme toute autre substance naturelle, est caractérisé par un poids. Rey fait chauffer de l'étain et du plomb et remarque que le poids de ces métaux est augmenté; il conclut que c'est l'action de l'air sur ces métaux, de la même manière que l'eau agit sur le sable, qui les rend plus lourds. Il montre également qu'un ballon rempli devient plus lourd lorsqu'on y ajoute de l'air et, qu'au contraire, son poids diminue lorsqu'on le chauffe ou qu'on y retire de l'air. Il ne réussit pas cependant à expliquer l'effet de la chaleur sur les variations de poids; il ne parvient pas non plus à expliquer le phénomène de la combustion de certains métaux.

En 1665, Hooke présente une explication de la combustion de certains métaux. Il affirme que l'air possède certains composés qui possèdent la propriété de dissoudre tous les combustibles à haute température; il fait l'hypothèse que ces composés possèdent une grande quantité de salpêtre. Mais, il ne réalise toutefois pas des expériences concluantes.

Au début du XVIII ième siècle, Sthal énonce le principe selon lequel plus une substance contient du phlogiston, plus elle est inflammable. Le charbon est ainsi considéré comme une substance riche en phlogiston. Puisque l'air permet la combustion, c'est à la même période que l'air est considéré comme étant un mélange de deux gaz. Un de ces gaz est responsable de la respiration humaine et animale tandis que l'autre est un produit de la fermentation et de la combustion; ce dernier gaz est connu à l'époque sous le nom d'air vicié. En 1774, Priestley et Scheele identifieront le premier de ces gaz qui correspond, selon la nomenclature actuelle, à l'oxygène et montreront le rôle actif de cette substance dans la respiration et la combustion. Priestley montre alors qu'on peut obtenir ce gaz en chauffant de l'oxyde de mercure et du plomb.

Il faudra attendre la fin du XIX ième siècle pour que Lavoisier réalise des expériences quantifiées et élabore une théorie sur la combustion. Nous rappelons certaines des conclusions des expériences de Lavoisier: a) les substances brûlent seulement dans l'air pur; b) l'augmentation du poids de la substance brûlée est égale à la diminution du poids de l'air. En se basant sur les travaux réalisés principalement par Boyle et Guyton de Morveau, Lavoisier effectue une classification des éléments et des composés. Puis, à la même époque, Dalton définit la loi des proportions multiples qu'il énonce globalement de cette manière: chaque élément peut se combiner avec un autre selon des proportions de masse et de poids spécifiques. C'est aussi à Dalton que revient une première formulation de la théorie atomique: a) chaque élément d'une même matière est constituée d'atomes identiques et de poids invariables; b) un composé chimique est formé d'atomes d'éléments différents, selon des proportions numériques simples.

A la suite de la formulation par Dalton de la théorie atomique, Gay-Lussac (XIX ième siècle) rend publiques ses travaux sur les relations entre les volumes des gaz et définit la loi suivante: deux gaz se combinent toujours dans des proportions de volume simples et le volume du produit formé est en relation simple avec les volumes de ses constituants. Puis, il formule la loi sur les gaz: sous de mêmes conditions de température et de pression, un même quantité de n'importe quel gaz se comportera de la même façon. Avogadro complétera cette loi sur les gaz par une explication moléculaire: sous de mêmes conditions de température et de pression, des volumes égaux de n'importe quel gaz contiennent le même nombre de molécules.

L'évolution des conceptions sur les gaz, comme le montre la description précédente, a été accompagnée d'une clarification de plusieurs concepts et d'une théorisation de nombreux phénomènes. Pour mieux comprendre cette évolution, il nous apparaît important d'y associer

également l'évolution d'un autre concept déterminant dans l'histoire des sciences et notamment, dans l'élaboration des lois sur les gaz parfaits.

2. L'évolution du concept de chaleur

La chaleur fait partie très tôt du monde expérientiel de l'enfant. De plus, le concept de chaleur est impliqué dans un bon nombre d'expériences scolaires et nous avons vu, au premier chapitre, qu'il est présent dans les représentations construites par les élèves sur les conduites des gaz. Pour retracer l'évolution des conceptions de la chaleur, au fil de l'histoire, nous faisons référence à l'étude effectuée par Astolfi et Develay (1989) qui résume bien les analyses historiques que l'on peut retrouver dans plusieurs ouvrages, tels ceux consultés précédemment.

Dans leur examen des conceptions scientifiques de la matière, Astolfi et Develay (1989) distinguent deux grandes catégories, une première dite substantialiste et une seconde dite mécaniste. Dans le texte qui suit, nous nous référons à cette catégorisation pour retracer l'évolution du concept de chaleur et de gaz.

2.1. Les conceptions substantialistes

Dans l'antiquité, selon Aristote (dans Astolfi et Develay, 1989), la chaleur est décrite et reliée aux quatre qualités de la matière, à savoir le chaud, le froid, l'humide et le sec. Si l'on associe deux à deux ces qualités, on obtient l'un des états suivants de la matière: le feu, l'eau, la terre, et l'air. Ces conceptions substantialistes, il va sans dire, ne permettent pas de répondre à toutes les interrogations concernant la matière (ex: comment expliquer la combustion). Plus encore, elles sont imprégnées d'un certain lyrisme. Ainsi, pour Lucrèce (poète latin), le chaud provient du soleil, le froid des rivières et le feu est formé d'une substance mystérieuse et se transfère à travers les pores de la matière. Jusqu'à la Renaissance, ces représentations de la matière seront partagées par plusieurs savants, tels Gassendi, Boyle et Galilée.

Au XVIII^{ème} siècle, on assiste à une transformation de ces représentations, sous l'impulsion des savants chimistes. Dans un souci de scientificité, Stahl et Becher proposent (vers 1720) l'idée du phlogistique. Nous avons vu précédemment comment cette idée a été utilisée par Stahl pour expliquer la combustion et définir les propriétés de l'air. Les conceptions sur la chaleur sont aussi imprégnées de cette idée. À la fin du XVIII^{ème} siècle, Lavoisier (1775) introduit les bases de la chimie moderne. Il s'intéresse en particulier à la conservation de la masse globale au cours d'une

réaction chimique. Ces bases de la chimie éloigneront alors à jamais le phlogistique du monde de la science.

Enfin, à cette même époque, Black (1760) avec formules mathématiques à l'appui explique les différences entre chaleur et température. La chaleur a alors une interprétation matérielle; on la considère comme un gaz, un calorique; la température est alors une mesure ou un indicateur numérique. Ces différences conceptuelles sont appuyées par les expériences de Fahrenheit. En 1724, Fahrenheit fabrique un thermomètre en utilisant un mélange réfrigérant de sel et de glace; il détermine alors un point de congélation et un point d'ébullition de l'eau. L'échelle centigrade est conçue vers 1742 par Celsius; au départ, c'est une échelle inversée, soit 0 C pour l'eau bouillante et 100 C pour la glace fondante. L'utilisation du mercure dans la fabrication du thermomètre vient de Fahrenheit; le mercure est préféré à l'alcool et à l'huile parce que sa composition est définie.

2.2. Les conceptions mécanistes

Depuis l'Antiquité, la pensée mécaniste a marqué, tout autant que la pensée substantialiste, le développement de plusieurs concepts scientifiques, dont celui de la chaleur. Selon cette pensée mécaniste, la matière est étudiée à l'état particulaire; la chaleur représente un échange de mouvement entre les particules. Dans l'Antiquité, Platon soutient l'hypothèse que le feu donne un mouvement aux particules de la matière. Si on chauffe un corps, on assiste à une augmentation de son volume, donc à la dilatation de ce dernier.

Au XVII^e siècle, plusieurs savants, dont Kepler, Bacon, Descartes, Boyle et Huygens, associent les différents états thermiques aux mouvements ou aux vibrations de la matière. Cette représentation est aussi teintée d'une conception substantialiste, la chaleur demeurant encore une grandeur de nature sensorielle. La distinction entre la chaleur et la température n'est pas encore faite.

2.3. La synthèse des conceptions mécanistes et substantialistes et les vérifications expérimentales des intuitions de Laplace et de Lavoisier

Au XVIII^e siècle, Laplace et Lavoisier réalisent une synthèse des conceptions mécanistes et substantialistes. La quantité de chaleur contenue dans un corps représente l'intensité de la force de vibration. L'agitation des particules est un facteur dissocié de la vibration et de la température. Quoique véridiques, ces affirmations ne reposent pas encore sur des résultats expérimentaux. Il

faut attendre les travaux scientifiques de la fin du XIX^{ième} siècle et du début du présent siècle pour fonder expérimentalement les intuitions de Laplace et de Lavoisier. Ces travaux sont réalisés par plusieurs chercheurs, dont Graham (1840; vitesse de dispersion des gaz), Clausius (1850; la thermodynamique), Boltzmann (1870; comportement des gaz parfaits) et Gibbs (1900; modélisation mathématique du comportement des gaz parfaits).

Les conceptions mécanistes de la chaleur, à l'inverse des conceptions substantialistes, se rapportent à la structure invisible de la matière; elles ont cependant, au cours de l'histoire, remporté moins de succès que les conceptions substantialistes. Eloigner les conceptions des impressions sensorielles n'a pas ainsi été chose facile. En permettant de mesurer la chaleur, l'apparition du thermomètre a toutefois permis la disparition des conceptions substantialistes de la chaleur.

C'est à partir de la reconnaissance de la nécessité de se dégager des impressions sensorielles et de se doter d'outils pour interroger et agir sur l'univers qu'on a pu, au fil de l'histoire, surpasser les limites de la théorie d'Aristote et que des expérimentations ont pu être réalisées.

Concepts scientifiques et expérimentation

L'expérimentation sera donc décisive dans le développement des concepts scientifiques et impliquera une nouvelle manière d'associer raisonnement et expérience. Blanché (1969, p.11) écrit à ce propos:

«N'allons donc pas nous imaginer, selon une vue trop simpliste, que ce qui fait l'essence de la méthode expérimentale et la nouveauté de la science moderne par rapport à l'ancienne, c'est de remplacer le raisonnement par l'expérience. Le changement consiste dans une manière d'associer raisonnement et expérience: une nouvelle manière de raisonner au sujet des faits d'expérience, une nouvelle manière d'interroger l'expérience pour à la fois la soumettre et lui permettre de le contrôler.»

La science expérimentale devient donc la science moderne. Elle part de l'expérience pour se diriger vers les lois, les axiomes. Elle emprunte donc des chemins contraires à ceux de la science démonstrative. Le raisonnement par induction est associé à la science moderne. En 1687, Newton présente ses trois livres traitant de la physique. Il reprend les résultats connus et les démontre, formant ainsi ce qu'on appelle un système déductif. L'apport de Newton devient important parce que sa théorie engendre des mesures numériques des phénomènes scientifiques, mesures qui peuvent être produites par l'expérience.

C'est également Newton qui a été le premier à affirmer l'infinité de l'univers, pour des raisons scientifiques de référence à la physique galiléenne, mais aussi pour des raisons théologiques. Ainsi, au XV^e siècle, on assiste à une révolution spirituelle qui présente deux caractéristiques importantes. Premièrement, l'univers est maintenant jugé infini; deuxièmement, l'espace est géométrisé, en effectuant une substitution de la géométrie euclidienne à une conception d'un espace cosmique, une physique que Koyré (1973) qualifie de prégaliléenne. Cet héritage du XVI^e siècle permet à Newton de prouver l'attraction mutuelle des corps et le mouvement des planètes. L'idée n'était pas nouvelle, mais il est le premier à mathématiser le phénomène ainsi, il prédit la position exacte de la planète dans le temps. Blanché (1969, p. 84) commente de la façon suivante ce travail scientifique:

«Le problème est celui de la composition de deux forces: la force d'inertie, selon laquelle la planète tendrait, à chaque instant de son parcours à le continuer en ligne droite et à s'échapper par la tangente, et une force centripète perpendiculaire à la première et lui faisant équilibre, assurant ainsi la déflexion de la tangente et maintenant la planète sur son orbite.»

Newton devient alors un physicien expérimental comme l'étaient à la même époque Pascal, Roberval, Boyle. Ces derniers s'opposent à la physique démonstrative telle que la concevaient Descartes et ses disciples. Pour les cartésiens, l'idée de gravitation ou d'attraction à distance n'est pas très évidente, mais la gravité nous est imposée et elle est prouvée par l'expérience.

Le recours à l'expérimentation au XVIII^e siècle va donc entraîner une création d'instruments de mesure variés. Parmi ces instruments, le baromètre de Toricelli et de Pascal va permettre de produire des données, des phénomènes qui retiendront l'attention de plusieurs savants qui proposeront des explications variées. Ainsi, en 1648, Roberval montre qu'une toute petite quantité d'air, une goutte (assimilation de l'air à un liquide à l'époque), qui a une masse presque nulle, placée dans le tube de Toricelli en fait baisser le niveau. En 1647, tirant son opinion des concepts de l'hydrostatique assimilant l'air à un liquide, Pascal explique l'apparition du vide dans le tube à mercure, par un équilibre de poids. Dans ses traités sur l'équilibre des liqueurs et la pesanteur de la masse d'air, il indique clairement la compression de l'air au niveau du sol et sa raréfaction au sommet d'une montagne.

Vers 1650, l'utilisation intelligente de la théorie atomiste permet à Gassendi, de prendre position avant Boyle, dans l'interprétation des expériences sur le baromètre de Toricelli et de Pascal. Gassendi constate alors une variation de la colonne de mercure (tube de Toricelli) en fonction de l'altitude à laquelle elle se trouve placée. Pour ce faire, il fait une distinction entre deux notions: le

poids et la pression élastique. Il explique également ainsi les phénomènes de dilatation (expansion) et de condensation (compression) de l'air: une même quantité d'air a le même nombre de particules, donc le même poids, et peut donc exercer, selon son état (compression ou dilatation), des pressions extrêmement variables.

Ce sont les analogies entre la compression et la pression résultante qui permettent donc à Gassendi d'expliquer la différence entre poids et pression. Le poids de la colonne d'air (qui touche au tube de mercure) exerce une pression sur les couches inférieures et c'est cette pression qui fait monter le mercure dans le tube. Bérigard (1578-1663) et Basson (1621) avaient formulé avant Gassendi une telle explication, mais ils ne sont pas parvenus à étayer cette explication, en reliant l'atomisme de l'Antiquité à la physique et à la mécanique du XVII^e siècle. Koyré (1973, p. 333) parle en ces termes du travail scientifique de Gassendi:

«Gassendi a cherché à fonder sur l'atomisme antique une physique qui était encore une physique qualitative. Cela lui a permis par le renouvellement ou la résurrection de l'atomisme antique de donner une base philosophique, une base ontologique, à la science moderne qui a uni ce qu'il n'a pas su unir, à savoir l'atomisme de Démocrite au mathématisme de Platon, représenté par la révolution galiléenne et cartésienne; c'est l'union de ces deux courants qui a produit comme nous le savons, la synthèse newtonnienne de la physique mathématique.»

La physique newtonnienne propose une modélisation mathématique de phénomènes scientifiques. Une telle modélisation semble aujourd'hui naturelle; elle est la façon privilégiée de faire des sciences. Pour bien saisir l'intérêt majeur de la modélisation, il convient maintenant de décrire brièvement les sens donnés aux modèles ainsi créés en sciences.

L'expérimentation et la modélisation de phénomènes scientifiques

L'évolution des concepts scientifiques au cours de l'histoire est marquée par la transformation et le rejet de conceptions naïves et par la construction d'outils pour mener des expériences contrôlées. Ces expériences procèdent d'un souci de modélisation de phénomènes scientifiques. Mais qu'entend-on par modélisation et quels sens faut-il attribuer au concept de modèle?

1. Quels sens revêt le concept de modèle?

Le concept de modèle est un concept clé en sciences. Peut-on parler en effet de pratiques scientifiques et en particulier, d'expérimentations scientifiques, sans invoquer ce concept. L'étude de ce concept revêt une importance évidente pour l'enseignement des sciences. En effet, les lectures

que l'élève peut faire d'une expérience sont fortement teintées de ses représentations de la finalité de cette expérience et ses représentations dépendent fortement de son rapport à la modélisation et plus spécifiquement, à la notion de modèle.

Le terme de modèle est polysémique et dépend fortement des représentations épistémologiques de la science. Régnier (1974) effectue une précision importante sur le concept de modèle. Il déclare ainsi qu'un modèle d'un objet concret, objet provenant du monde réel, est un objet abstrait, appartenant à un univers représentatif; la description de cet objet abstrait est alors envisagée comme une description de l'objet concret. Il ajoute de plus que l'objet abstrait devient un modèle d'un objet concret, lorsque la définition de l'objet abstrait correspond à la représentation du concret. En tenant compte de ces caractéristiques, il regroupe les modèles selon deux catégories:

a) les modèles nominaux: provenant du courant positiviste, ceux qui nous servent à représenter l'objet tel qu'il apparaît dans l'expérience. Les concepts de base de ces modèles doivent être exprimés en termes d'expérience.

b) les modèles réels: ceux par lesquels on s'efforce de décrire la structure réelle de l'objet concret. Les concepts de base de ces modèles doivent être exprimés en terme d'objets qui, bien que n'étant pas perceptibles par nos sens, doivent exister réellement..

Le modèle réel correspond en plusieurs points à un modèle-image; il implique une représentation qui soit isomorphe à une image tirée du monde sensible. Il doit posséder les mêmes signes que ceux employés dans les modèles descriptifs reliés au monde sensible.

Dans un ouvrage plus récent que le précédent, Astolfi et Drouin (1992) regroupent ainsi les modèles: un modèle peut évoquer un objet concret (maquette, modèle réduit), un schéma simplificateur sous forme d'image concrète ou encore une analogie. En se référant à divers travaux sur la nature de l'activité scientifique (Kuhn, 1983; Stevens et Collins, 1980: dans Gilbert, 1991), Gilbert (1991) écrit que les modèles sont des représentations de systèmes cibles du monde ambiant: *«Ils sont les systèmes des mots, des nombres, des images, des programmes, des actions, et des mages concrètes qui constituent les communications scientifiques.»* (p. 73). D'une façon générale, comme le fait observer Papert (1981), un modèle peut être considéré comme une sorte d'outil pour penser ou un schéma directeur se traduisant souvent par une image ou un objet concret.

Ces diverses conceptions du modèle présentent des similitudes; elles définissent ainsi diverses façons d'appréhender l'expérience, les phénomènes étudiés et de simuler, en quelque sorte, cette expérience. C'est à partir de ce monde simplifié constitué par le modèle que le savant essaie de retrouver les apparences, tout au moins dans le domaine auquel il se limite. La modélisation accroît de façon extraordinaire le pouvoir de prévision de la science, en réunissant un nombre restreint de principes pour construire un domaine conceptuel. A ce propos, Dupin (1995) soutient que la science construit des modèles en partant de notions d'une extrême complexité pour ne conserver que des aspects très limités. Ces aspects servent ainsi à définir les limites de la validité du modèle et prémunissent contre les interprétations abusives que l'on pourrait être tenté de construire à partir du modèle. Les propos exprimés par Halbwachs (1974, p. 126) sur la modélisation montrent bien les difficultés rencontrées par le savant dans son interrogation de l'univers à partir de son travail sur le modèle qu'il construit:

«La modélisation est l'approche habituelle de la théorisation. ... Modéliser c'est construire un modèle, or un modèle est souvent polysémique cependant la science cherche des significations uniques à ses termes.»

Jusqu'à maintenant, dans notre analyse du concept de modèle et de l'activité de modélisation, nous avons fait abstraction du travail mathématique qui est déterminant dans l'évolution scientifique des derniers siècles. L'avènement de la modélisation mathématique en sciences modernes introduit enfin un nouveau type de modèle qui transforme les rapports à la théorie scientifique et la structure même de la théorie.. Il en résulte que toute théorie est susceptible d'être rejetée, que l'évolution de la science occasionnera des variations radicales des concepts et des liens entre les paramètres identifiés d'un phénomène. Dans les livres de physique moderne, on présente un modèle comme un ensemble de notions liées par des propositions. De prime abord, il semble y avoir dominance du raisonnement mathématique pour développer ces propositions et leurs relations. Il importe donc de regarder de plus près comment la modélisation mathématique intervient dans l'activité scientifique moderne.

2. La modélisation mathématique dans l'activité scientifique moderne

La modélisation mathématique de phénomènes scientifiques est tributaire du développement des mathématiques. En 1899, Gilbert (dans Halbwachs, 1974) introduit des notions nommées par des mots d'usage courant en mathématiques tels le point, la droite, le plan, l'angle dans l'enseignement de la géométrie. Ces mots appartenant au monde des sensibles, il établit certaines relations entre ces

mots qu'il formule en axiomes d'appartenance, d'ordre, d'égalité ou de congruence, de parallélisme et de continuité sous forme de relation logique. Ainsi, Hilbert permet une restructuration des mathématiques par les axiomes. Il présente pour la première fois, des notions non plus d'une façon linéaire comme on le faisait auparavant, mais d'une façon circulaire. Il fait également mentir les deux principes suivants sur lesquels toutes démonstrations mathématiques doivent être faites:

1. *«On ne peut démontrer une proposition qu'à partir d'au moins une autre proposition antérieurement admise»*
2. *«On ne peut définir une notion qu'à partir d'au moins une autre notion antérieurement définie.»* (Halbwachs, 1974, p. 51)

Il introduit plusieurs notions en les définissant exclusivement les unes par les autres. Ceci, par l'établissement de leurs rapports mutuels. Il prouve alors qu'il est possible de constituer un système rationnel fermé, purement formel, doté d'une totale transparence et qui ne comporte que ce qu'on y a placé d'une façon explicite.

Par la présence des axiomes et de liaisons formelles, Hilbert marque un point dans l'histoire des mathématiques. Il fait évoluer la méthode de preuve par des axiomes structurés. Selon Halbwachs (1974), cette méthode d'édification des axiomes appliquée à la physique permet à cette science d'avoir un statut quasi-identique à celui des mathématiques. Une nouvelle définition du concept de modèle est possible:

«Les notions de base du modèle sont définies les unes par les autres au moyen d'énoncés qui introduisent entre elles des relations prises et indépendamment de toute référence au monde sensible comme au monde réel. Tout modèle est alors édifié par déduction à partir de ces énoncés, et en y introduisant des notions dérivées définies à partir de ces notions de base» (Halbwachs, 1974, p. 51)

Selon cette définition, les objets de perception reliés aux sens ont un rôle moins important qu'on ne l'aurait cru. Cette façon de faire la preuve d'un phénomène scientifique est au centre du problème épistémologique tel que le soutiennent l'empirisme classique et les écoles du positivisme.

La perception est prise en considération dans les différentes opérations impliquant des mises au point. La mesure joue ainsi un rôle primordial. L'instrument de mesure donne une information plus raffinée que celle fournie par nos sens. Il raffine les perceptions. Il est aussi possible de mener

des opérations mathématiques sur les mesures obtenues et de procéder à des comparaisons, en se référant à une mesure ou à une longueur-étalon.

L'évolution de la technologie et de la science a permis la réduction de l'incertitude dans la prise de mesure. Elle a également permis l'accession à l'expérimentation en classe. Le modèle fournit des informations supplémentaires à l'expérience; il permet l'intervention des nombres. Ces nombres nous donnent accès à des ordres de grandeur implicites à la théorie (qui est représentée sous forme d'axiomes). Les nombres sont représentés par des symboles inclus dans le modèle. Les résultats de l'expérimentation mesurés à l'aide d'instruments sont donc introduits dans le modèle. Des erreurs ou des imprécisions de mesure sont ainsi relevées; mais cette marge d'incertitude est moins apparente, une fois les résultats expérimentaux appliqués au modèle.

On peut donc se prononcer sur la cohérence entre la valeur calculée et la valeur théorique, en prenant en compte la marge d'incertitude liée à la prise des mesures. Le résultat se présente sous la forme d'un nombre rationnel situé à l'intérieur d'une marge d'erreur appelée marge d'incertitude.

Ainsi est établi, selon Halbwachs (1974), un *"critérium de la connaissance scientifique correcte."* Il y a, de ce fait, un parallélisme entre les étapes de la transformation théorique présentes dans le modèle et les manipulations qui s'inscrivent dans le cadre de l'expérimentation. Ce parallélisme contraint à procéder à des comparaisons entre: a) les prévisions qualitatives du modèle et les perceptions sensorielles obtenues par l'expérience, en des points précis de leur parcours parallèle; b) les prévisions quantitatives, c'est-à-dire les valeurs calculées en utilisant le modèle (la formule mathématique), et les valeurs obtenues par l'expérience, soit les valeurs mesurées. Cette dernière comparaison est plus importante, car elle permet à l'expérimentateur de porter des jugements sur la pertinence du modèle et la validité de l'expérience. Par le calcul d'erreur, on obtient un intervalle numérique à l'intérieur duquel on doit retrouver les valeurs théoriques et les valeurs expérimentales; il s'agit ainsi de préciser le champ de validité du modèle.

La modélisation mathématique dans l'activité scientifique moderne est donc un outil privilégié de formalisation et de vérification de théories. Weil-Barais (1994) écrit à ce propos que la modélisation permet de regrouper la démarche scientifique et la formation de concepts.

3. Le processus de modélisation mathématique de phénomènes scientifiques et notamment, des conduites des gaz parfaits

La modélisation mathématique de phénomènes scientifiques est aujourd'hui l'outil conceptuel et méthodologique privilégié pour interroger l'univers. Comment procède cette modélisation?

La fonctionnalité du calcul mathématique se montre dans diverses situations. Elle se montre d'abord dans l'étude des objets mathématiques eux-mêmes; Chevallard (1989) qualifie d'intramathématiques ces emplois du calcul. Par ailleurs, il existe des domaines, autres que les mathématiques, où le recours au calcul mathématique est essentiel; tels sont les domaines de la physique, de la chimie, de la biologie, ... etc. On parle dans ces cas d'une utilisation extramathématique. L'étude mathématique des systèmes reliés à ces domaines se nomme la modélisation mathématique. Dans l'étude de tout système, selon Chevallard, le processus de modélisation comporte trois étapes:

a) Dans une première étape, il s'agit de définir les points importants du système à l'étude. Chaque point est identifié par une variable. Par exemple, dans l'étude des gaz parfaits, la pression est représentée par P , le volume par V , la température par T .

b) Dans une seconde étape, il faut établir les relations entre les variables représentant les points importants du système à l'étude. Le modèle du système à l'étude est alors formé de toutes les relations entre les variables identifiées. Les systèmes (ex: la chimie) et les modèles (ex: la loi des gaz parfaits) deviennent alors des objets mathématiques. Tout objet mathématique est le produit d'une mathématisation. Ainsi, lorsqu'on représente la relation entre la pression et la température dans l'étude des gaz parfaits, on mathématise des notions de la chimie. Certains objets à l'étude commandent le recours à des lois qui ne proviennent pas de conventions humaines. Telles sont, par exemple, la loi sur l'accélération gravitationnelle et la loi sur le rythme de reproduction des cellules. D'autres objets à l'étude, objets appartenant à d'autres domaines de l'activité humaine, sont le produit de conventions humaines; les calculs d'intérêts relevant du domaine général des finances sont fixés par des conventions humaines.

c) Dans une troisième étape, il importe d'élaborer les connaissances sur un système à partir du modèle de ce système. C'est l'étape la plus mathématique; on retrouve des relations nouvelles reliant les variables qu'il s'agit par la suite d'interpréter en tenant compte de leurs relations au système étudié. Un modèle est intéressant s'il permet de produire des connaissances nouvelles sur le système à l'étude et si une telle production est économique.

Pour comprendre le fonctionnement d'un système ou pour étudier un phénomène dans un système donné, on peut être amené à construire plusieurs modèles successifs. On crée de la récurrence dans la modélisation. Selon Chevallard (1989, p. 57), *"Lorsqu'un système a été étudié et est de ce fait, supposé connu, il fournira par translation des indications sur l'un ou l'autre de ses modèles."*

L'analyse du processus de modélisation mathématique effectuée par Chevallard rend bien compte du travail complexe et délicat qui définit cette pratique scientifique. Chevallard évoque également le problème délicat du choix d'un modèle. Selon Orange (1997), le choix d'un modèle doit être fait en tenant compte de certaines contraintes. Le modèle retenu doit être compréhensible, c'est-à-dire manipulable intellectuellement; il doit être aussi transformable, par application d'outils intellectuels. Examinons comment la modélisation mathématique des conduites des gaz parfaits (la loi des gaz parfaits) tient compte de ces contraintes.

Comme le souligne Orange (1997), la modélisation des conduites des gaz parfaits, comme plusieurs autres modélisations en sciences, est un processus ouvert, car il opère sur une phénoménologie. Pour décrire le comportement des molécules gazeuses soumises à des conditions variables, on se sert de caractéristiques macroscopiques: la pression, la température et le volume. Le modèle opère alors sur les grandeurs de ces mesures de pression, de température et de volume. Cette fonction de processeur associée à l'utilisation du modèle des gaz parfaits peut être appliquée à un domaine de phénomènes plus vaste que celui prévu initialement. Par exemple, lors de l'étude du modèle particulière des molécules de gaz, on s'est aperçu que le modèle pouvait également servir à calculer les vitesses des molécules et les distances moyennes entre elles. Comme le soutient Orange (1997), cette nouvelle phénoménologie n'est possible que parce qu'on peut donner un sens aux variables introduites dans le processeur qu'est le modèle. Dans le cas du modèle des gaz parfaits, le sens des variables renvoie à des conceptualisations complexes des notions de pression, de volume et de température.

Le modèle élaboré en sciences revêt donc une double fonction, comme le soulignent également Walliser (1977): une première qui est établie à partir des expériences auxquelles il a été soumis et une seconde qui lui confère un rôle explicatif et heuristique. Ces idées renvoient bien à celles exprimées précédemment par Orange. Une telle représentation du modèle fait enfin écho aux distinctions faites par Shauble, Klopfer et Raghavan (1991) entre une conception technologique d'un modèle et une conception scientifique d'un modèle, la dernière étant portée par une conceptualisation plus élaborée et adéquate des notions impliquées dans le modèle et de leurs relations.

LES DÉFIS ET LES ENJEUX DE L'ENSEIGNEMENT DE LA CHIMIE DES GAZ PARFAITS

Dans la présentation de la problématique de notre recherche, nous avons montré comment les conceptions naïves des élèves sur les gaz se manifestent et sont peu affectées par l'enseignement. Nous avons également fait état de problèmes importants dans l'application et l'interprétation de la loi des gaz parfaits. Comment peut-on penser un enseignement qui puisse provoquer une évolution des conceptions des élèves et une entrée dans des pratiques scientifiques?

Le parcours historique que nous venons de faire sur l'évolution des concepts et pratiques scientifiques, s'il ne nous apporte pas de réponses à nos interrogations didactiques, est par ailleurs fort instructif. Dans un premier temps, nous dégageons de cette analyse certaines orientations et certains principes pour l'enseignement des sciences. Dans un second temps, nous examinons certaines propositions didactiques en relation avec ces orientations et ces principes. Nous présentons enfin certains concepts et outils de la théorie des situations didactiques auxquels nous nous référons pour construire notre séquence d'enseignement de la chimie des gaz parfaits, en regard des orientations, principes et propositions didactiques retenues.

Énonces de quelques principes et orientations pour l'enseignement des sciences découlant des analyses historiques sur l'évolution des conceptions et des pratiques scientifiques

Parce que les sciences lui sont enseignées, l'élève n'a pas besoin de reprendre tout le cheminement d'interrogations, d'expériences, de preuves et de réfutations qui a été celui du développement de certains savoirs scientifiques. L'enseignement réalise ainsi une genèse artificielle de ces savoirs, de sorte qu'une grande partie de l'évolution historique de la recherche scientifique y est absente. En effet, une perception des sciences très répandue dans la société et dans l'institution scolaire est à l'effet que le contenu de la science se limite aux théories et aux énoncés d'observation décrits dans les livres scientifiques. Les livres ignorent notamment tout le contexte historique entourant l'activité de recherche propre à un sujet donné. Ainsi, les livres ne contiennent que les méthodes scientifiques qui ont pu être représentées par les techniques expérimentales ainsi que les démonstrations mathématiques qui s'y rattachent.

Selon cette perspective, le savoir scientifique est considéré comme un bien provenant du monde réel, existant avant, après et en dehors de l'esprit humain. Ainsi, depuis l'ère présocratique, l'épistémologie scientifique reflétée dans l'enseignement traditionnel et la philosophie occidentale partage cette vision du savoir scientifique. Selon Larochelle et Désautels (1992), l'enseignement traditionnel sert à accélérer le transfert des connaissances; cet enseignement se greffe autour des concepts de vérité, d'objectivité et d'évidence. L'exposé des savoirs tient lieu d'enseignement.

L'évolution des sciences amène à interroger cette vision traditionnelle des sciences et plus spécifiquement, les thèses réalistes, naïves et empiristes des sciences sur lesquelles se fonde cette vision (Audet 1983; Thuillier, 1971, 1972, 1980). L'évolution scientifique prise dans un contexte historique nous procure en effet une information précieuse sur les finalités et les méthodes des sciences.

L'histoire nous renseigne ainsi sur l'évolution scientifique en considérant deux préoccupations:

a) déterminer par quel homme et à quel moment chaque énoncé d'observation, chaque loi ou théorie scientifique a été découvert ou inventé.

b) décrire et expliquer les nombreuses erreurs dues très fréquemment aux mythes et aux superstitions et qui ont ralenti considérablement le développement des sciences.

Selon Kuhn (1983), la recherche historique nous montre combien il est difficile d'isoler les inventions et les découvertes individuelles. De plus, elle atteste de la quasi impossibilité de concevoir le développement scientifique comme un processus cumulatif suivant lequel les contributions individuelles des chercheurs seraient complémentaires et constitueraient ainsi la science. L'analyse de l'évolution du concept de chaleur montre comment les conceptions substantialistes et mécanistes se sont chevauchées et confrontées pendant plusieurs siècles; elle montre aussi comment la confrontation de ces conceptions a soutenu l'activité scientifique et la construction d'outils conceptuels et méthodologiques qui ont permis au cours des derniers siècles de faire une synthèse de ces conceptions, des conceptions sur la matière et en particulier, sur les gaz et enfin, de modéliser les conduites des gaz parfaits.

La science est donc une production sociale. Et, le savoir est une construction et non une lecture d'une réalité. Comme le montre la construction du savoir sur les gaz parfaits, l'évolution des conceptions scientifiques est marquée par la construction d'outils cognitifs permettant d'interroger

l'univers et d'opérer ainsi une distanciation vis-à-vis des données immédiatement perceptibles par les sens. Les études piagésiennes montrent également comment le savoir résulte d'un processus d'abstraction empirique et réfléchissante (Piaget, 1974a, 1974b). La thèse constructiviste soutenue par von Glaserfeld (1983: dans Larochelle et Désautels, 1992), thèse s'inspirant, entre autres, de la théorie piagésienne conduit aussi au rejet des thèses réalistes et empiristes sur la construction du savoir.

Envisager la science comme une production sociale et le savoir comme une construction de la réalité, c'est statuer sur la manière de faire de la science, de construire des savoirs scientifiques. Si l'enseignement doit ainsi se donner comme orientations de faire faire de la science aux élèves et de leur faire construire le savoir, il doit essayer de mieux comprendre les chemins qu'empruntent les élèves dans leur apprentissage des concepts scientifiques, s'informer des conceptions naïves des élèves, trouver des moyens de les faire se confronter, de les faire évoluer; il doit aussi créer des situations qui permettent aux élèves d'entrer dans des pratiques scientifiques de construction et de validation de modèles, en un mot, dans des pratiques de modélisation de phénomènes scientifiques. Comment le faire?

Examen de certaines propositions didactiques en vue de la concrétisation dans l'enseignement de la chimie des gaz parfaits des orientations et des principes énoncés précédemment

Pour mieux comprendre les chemins qu'empruntent les élèves dans la construction du savoir scientifique, Posner, Strike, Hewson et Gertzog (1982) conseillent fortement d'utiliser la philosophie et l'histoire des sciences; la philosophie et l'histoire des sciences constituent un réservoir conceptuel pouvant donner accès à une lecture cognitive des conduites des élèves. De plus, comme le soulignent Lakatos, Kuhn et Toulmin (dans Larochelle et Désautels, 1992), il faut s'intéresser aux croyances et aux raisons qui président à la rationalisation et à l'évidence que l'élève construit de ses expériences. Enfin, même si on accorde un statut épistémologique aux conceptions de l'élève dans le processus de modélisation, il faut bien garder présent à l'esprit les transformations que ces conceptions subissent dans la construction de concepts scientifiques.

La modélisation est un moyen de créer des images dans la tête de l'apprenant, mais ce processus ne sera complet que s'il est intériorisé. Ainsi, selon Fourez (1988) et Latour (1989), il faut initier l'élève à ce savoir socialement construit que constitue le savoir scientifique pour qu'il puisse prendre conscience du cadre épistémique sur lequel les connaissances ont été édifiées. Selon notre

compréhension de ce travail d'initiation, il ne suffit pas d'exposer ce cadre comme un savoir, mais bien de créer des situations pour l'appréhender, pour en débattre. La modélisation mathématique des phénomènes scientifiques, parce qu'elle impose un travail de validation des modèles, peut constituer un moyen propice à ce travail de conscientisation.

Dans le processus de modélisation proposé dans l'enseignement, le savoir visé est premier. Les outils nécessaires pour le construire ne sont que des moyens pour accéder à ce savoir. Selon Morf (1985), le savoir enseigné au niveau secondaire qui n'engage pas l'élève dans une démarche de modélisation est près de la logique substantialiste des élèves. Ce savoir se veut sécurisant et éloigné de l'inconnu; on y a retiré plusieurs éléments pouvant produire des situations contradictoires. Cette épuration rend intelligibles certains commentaires des élèves concernant le fait que le savoir est résumé en une présentation au tableau de chiffres et/ou de mots ou, en d'autres termes, d'évidences empiriques.

La modélisation mathématique d'un phénomène scientifique relie les variables mathématiques à l'explication de ce phénomène. Faire du processus de modélisation l'outil de construction des savoirs enseignés ne va pas de soi, comme le souligne Chevallard (1989). Dans l'enseignement de la chimie des gaz parfaits qui concerne notre recherche, on pourrait être enclin à penser, à tort, que l'entrée des élèves dans un processus de modélisation mathématique des conduites des gaz parfaits est facilitée par le savoir visé qui est résumé dans une loi mathématique relativement simple, du moins du point de vue de l'enseignant. Or, nous avons montré comment plusieurs élèves du secondaire éprouvent des difficultés à interpréter et à calculer les rapports proportionnels impliqués dans cette loi. Nous avons aussi montré comment plusieurs élèves ne savent donner sens aux relations exprimées dans cette loi, en raison de leurs conceptions des notions impliquées.

Faire entrer les élèves dans une pratique de modélisation des conduites des gaz parfaits suppose que l'on crée des situations permettant aux élèves d'exprimer leurs conceptions des phénomènes à l'étude, de produire des modèles de ces phénomènes, de recourir convenablement à leurs connaissances en mathématiques et à leurs connaissances en sciences pour formaliser ces modèles, ce qui requiert une coordination de connaissances qui n'est pas simple à réaliser (Lemoyne et Gauthier, 1996), et enfin, comme l'ont souligné plusieurs chercheurs (Orange, 1997; Shauble, Klopfer et Raghavan, 1991), de dépasser une conception technologique du modèle des gaz parfaits, au profit d'une conception scientifique de ce modèle.

La modélisation doit ainsi devenir pour les élèves un outil pour expliquer les conduites des gaz parfaits, pour effectuer des prédictions sur ces conduites, pour susciter un questionnement et une remise en question de leurs conceptions naïves (Chomat, Larcher et Méheut, 1992; Goffard, 1994). La modélisation doit donc soutenir l'évolution de la pensée de l'élève (Giordan et De Vecchi, 1987); dans le cas de l'enseignement de la loi des gaz parfaits, elle doit permettre, par un travail sur des caractéristiques macroscopiques des phénomènes étudiés, une certaine prise sur des conduites qui relèvent de phénomènes fort complexes qui se jouent à une autre échelle.

Comment mettre en oeuvre ces diverses propositions didactiques? Comment en faire l'étude?

L'intérêt de certains concepts et outils de la théorie des situations didactiques dans la construction de situations d'enseignement, en regard des orientations, principes et propositions didactiques retenues

Parmi les théories de la didactique pouvant permettre d'orienter la construction de situations d'enseignement de la chimie des gaz parfaits, la théorie des situations didactiques élaborée par Brousseau (1986, 1996) retient particulièrement notre attention. Même si les situations didactiques dont il est question dans cette théorie sont des situations de mathématiques, les concepts qui les expliquent nous apparaissent tout aussi pertinents pour l'enseignement des sciences, comme le montrent Johsua et Dupin (1993) dans leur ouvrage sur la didactique des sciences et des mathématiques.

La théorie des situations didactiques renvoie à une définition spécifique de la didactique de savoirs institués, tels les mathématiques et les sciences. La didactique a pour objet l'étude des conditions de diffusion d'un savoir qui sont spécifiques de ce savoir. L'acquisition de connaissances, la construction d'un savoir, est un processus déterminé, en grande partie, par un ensemble de situations identifiables. Chacune des situations met en présence un savoir, des sujets et des moyens didactiques.

Une situation didactique, selon le sens donné par Brousseau à ce concept, est une situation dans laquelle les connaissances à faire acquérir sont les seules qui permettent à l'élève d'obtenir le résultat envisagé dans la recherche d'une solution à un problème dans lequel il s'est investi. Cette dernière définition donne la pleine mesure du travail difficile, complexe, qu'il faut mener pour concevoir une situation didactique. Elle met d'abord de l'avant une idée également fort importante en enseignement des sciences, soit celle de faire acquérir des connaissances qui soient à la fois

garantes de la maîtrise cognitive de la situation et auxquelles font obstacle des connaissances autres. Ainsi, dans une situation didactique pour les sciences, les connaissances acquises devront montrer leur efficacité, en regard d'autres connaissances, voire de conceptions naïves.

La définition précédente fait de l'investissement cognitif de l'élève un critère essentiel. Selon Brousseau,

"Une bonne reproduction par l'élève d'une activité scientifique exigerait qu'il agisse, qu'il formule, qu'il prouve, qu'il construise des modèles, des langages, des concepts, des théories, qu'il les échange avec d'autres, qu'il reconnaisse celles qui sont conformes à la culture, qu'il lui emprunte celles qui lui sont utiles, etc.

....

Le professeur doit donc simuler dans sa classe une micro-société scientifique s'il veut que les connaissances soient des moyens économiques pour poser de bonnes questions et pour trancher des débats, s'il veut que les langages soient des moyens de maîtriser des situations de formulation et que les démonstrations soient des preuves » (Brousseau, 1986, pp. 37-38).

La théorie des situations parle donc d'enseignement d'un savoir prédéfini et oriente ainsi l'étude de la réalisation d'une intention didactique.

"A l'intérieur d'une situation didactique (donc organisée par le maître pour un certain enseignement), le terme de situation a-didactique désigne toute situation (finalisée par un résultat) qui d'une part ne peut être maîtrisée de façon convenable sans la mise en oeuvre des connaissances ou du savoir visé et qui d'autre part sanctionne, sur le mode de l'évidence pour l'élève, les décisions qu'il prend (bonnes ou mauvaises), sans intervention du maître relativement au savoir à mettre en oeuvre » (Berthelot et Salin, 1992, p 45)

La théorie des situations didactiques partage de toute évidence les orientations et les principes généraux que nous retenons dans notre recherche. Dans la séquence d'enseignement de la chimie des gaz que nous désirons construire et analyser, nous envisageons ainsi de construire des situations dans lesquelles les élèves devront proposer, formuler et valider leurs modèles sur les conduites des gaz. Si les propositions et les formulations pourront être organisées dans un discours en langue naturelle, elles devront pouvoir également être réalisées en recourant au langage symbolique des mathématiques, opérant ainsi une modélisation mathématique des phénomènes étudiés qui permette d'éprouver les modèles et les conceptions mises de l'avant.

Afin de pouvoir conduire une analyse conséquente des situations d'enseignement, il nous semble essentiel de recourir à des outils et des méthodes de construction et d'analyse de situations qui soient reliés à la théorie des situations didactiques. La méthodologie de l'ingénierie didactique (Artigue, 1988) permet d'aborder les rapports entre la recherche et l'action sur le système d'enseignement (Chevallard, 1992)

L'ingénierie didactique se caractérise en premier lieu par un schéma expérimental basé sur des réalisations didactiques en classe, c'est-à-dire sur la conception, la réalisation, l'observation et l'analyse de séquences d'enseignement. Dans toute ingénierie didactique, les phases suivantes sont essentielles: 1. les analyses préalables; 2. la conception et l'analyse a priori des situations didactiques; 3. l'expérimentation et l'analyse a posteriori.

1. Les analyses préalables

La phase de conception d'une recherche d'ingénierie s'effectue en s'appuyant sur un cadre théorique didactique général et sur les connaissances déjà acquises dans le domaine étudié. Les analyses préalables comprennent:

a) une analyse épistémologique des problèmes qui ont marqué la construction d'un savoir. Dans notre recherche, nous nous sommes intéressée aux conceptions qui ont marqué le développement des sciences et aussi aux outils et méthodes utilisés pour l'étude des phénomènes scientifiques, en montrant comment l'expérimentation contrôlée et la modélisation mathématique ont entraîné des progrès considérables du savoir scientifique.

b) une analyse de l'enseignement usuel et de ses effets (état d'équilibre de fonctionnement du système) qui nous renseigne sur les conditions d'enseignement, sur les objectifs de savoir visés, sur le temps accordé à l'atteinte de ces objectifs et sur les moyens de réaliser l'enseignement. Au premier chapitre, nous avons montré comment l'enseignement des sciences n'a été que superficiellement marqué par les connaissances sur l'épistémologie des sciences et sur la didactique des sciences.

c) une analyse des conceptions des élèves, des difficultés et obstacles qui marquent leur évolution. Dans le premier chapitre de notre travail, nous avons ainsi présenté les résultats des études sur les conceptions des élèves en sciences et plus spécifiquement, sur les notions impliquées dans les lois sur les gaz parfaits. Nous avons également élargi notre domaine d'investigation aux connaissances mathématiques qui interviennent dans l'enseignement des sciences et plus spécifiquement, des lois sur les gaz.

d) une analyse du champ de contraintes dans lequel va se situer la réalisation didactique effective. Dans le cas de notre étude, il s'agira de construire une séquence didactique qui vaut pour tous les élèves d'une classe, qui peut être réalisée en respectant les horaires, l'agencement des contenus de programme et les moyens matériels pour l'enseignement des sciences.

2. Conception et analyse a priori de la séquence didactique

La seconde phase de l'ingénierie didactique est celle de la conception et de l'analyse a priori de la séquence didactique. Dans la conception des situations didactiques, le chercheur doit définir les savoirs visés par les situations et les moyens qu'il se donne pour que l'élève s'approprie les problèmes que comportent ces situations et s'engage dans un processus de construction de connaissances qui, à terme, peut conduire aux savoirs visés.

L'analyse a priori est à concevoir comme analyse du contrôle des sens des situations de la séquence. L'objectif de l'analyse a priori est donc de déterminer en quoi les choix effectués permettent de contrôler les comportements des élèves et leur sens. Ces choix concernent tout autant les variables des tâches que comportent les situations (ex: type, taille et représentation des données; outils à utiliser; formulation des consignes) que les variables didactiques (ex: interventions prévues du maître, gestion des interactions entre les élèves, entre les élèves et le maître). Dans le chapitre suivant sur la méthodologie de la recherche, nous rendrons compte du travail d'analyse a priori que nous avons fait dans la construction de notre séquence d'enseignement.

3. Expérimentation de la séquence didactique et analyse a posteriori

L'expérimentation de la séquence didactique est essentiellement la réalisation de l'enseignement en classe. L'analyse a posteriori de cette séquence se fait à l'aide des données recueillies au cours de l'enseignement. Les échanges entre les élèves et entre les élèves et l'enseignant, les conduites des élèves en cours d'enseignement, mais aussi dans l'ensemble des activités reliées normalement à tout enseignement (devoirs, exercices faits en classe) sont alors utilisés pour un examen de la pertinence des situations utilisées.

C'est sur la confrontation des deux analyses a priori et a posteriori que se fonde essentiellement la validation des hypothèses engagées dans la recherche. Nous avons fait des choix: choix de situations et choix de paramètres; il faut maintenant examiner d'un point de vue critique ces

différents choix. Dans notre étude, par exemple, si nous choisissons une première situation en laboratoire dans laquelle les élèves doivent trouver les relations entre la pression, le volume et la température d'un gaz, sans intervenir d'aucune façon sur la prise de données, il conviendra dans l'analyse a posteriori d'examiner les conséquences d'un tel choix.

D'autres choix seront effectués en cours d'expérimentation de la séquence: choix de réponses aux demandes des élèves en cours de la réalisation des tâches; choix d'intervenir auprès des élèves qui s'engagent dans une démarche hasardeuse ou inappropriée de résolution de problèmes; choix concernant la gestion didactique des réponses des élèves; ... Ces divers choix reliés à la gestion didactique des situations, comme l'ont montré plusieurs chercheurs (Brousseau, 1986, 1996; Mercier, 1995; Salin, sous presse) ont des répercussions importantes sur les acquisitions de connaissances. Dans l'analyse a posteriori, il faut en tenir compte.

POSITION DU PROBLÈME ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Les problèmes que pose l'enseignement de la chimie des gaz parfaits sont nombreux. L'analyse des pratiques d'enseignement de cette matière et des résultats de cet enseignement nous a permis, au premier chapitre, de soulever plusieurs questions concernant la prise en compte des conceptions naïves et des problèmes de construction des rapports proportionnels dans un enseignement qui puisse entraîner une évolution de ces conceptions et une construction du sens des lois sur les gaz parfaits. Nous avons aussi clairement dit notre intention de construire une séquence d'enseignement pour examiner ces questions, en respectant les contraintes didactiques et institutionnelles et les ressources matérielles avec lesquelles l'enseignement actuel doit composer.

Dans ce chapitre, nous avons d'abord examiné l'évolution des conceptions et des pratiques scientifiques au cours de l'histoire; cet examen nous a permis de mieux comprendre les problèmes de construction du savoir scientifique et aussi, le rôle déterminant des outils construits pour interroger l'univers dans l'évolution des conceptions. Ce travail nous a conduit à examiner de plus près les pratiques de la science moderne, en particulier, le travail exigeant de conception, d'explication, de théorisation qui est engagé dans le processus de modélisation mathématique des phénomènes scientifiques. L'analyse de ce travail dans le cas de la modélisation des conduites des gaz parfaits nous a permis de mieux comprendre les écueils et les risques conceptuels d'un enseignement technologique des lois sur les gaz parfaits.

Dans une seconde partie de ce chapitre, à la lumière des analyses précédentes, nous avons défini certaines orientations et principes pour la construction d'un enseignement sur les gaz parfaits; nous avons examiné certaines propositions didactiques; nous avons ensuite cherché dans la théorie des situations didactiques des outils conceptuels et méthodologiques pour penser des situations qui puissent permettre d'incarner les orientations, les principes et les propositions didactiques identifiées.

En tenant compte de l'ensemble de ces éléments, notre recherche se propose donc d'agir sur le système didactique actuel pour mieux définir les conditions à satisfaire pour amener chez les élèves une évolution de leurs conceptions sur les gaz et sur les lois qui régissent leurs conduites, ainsi que de leurs pratiques scientifiques, qui leur permette de donner un sens aux relations impliquées dans les lois sur les gaz parfaits.

Bien que notre étude ne soit pas une étude expérimentale permettant de confirmer ou d'infirmar des hypothèses, certaines hypothèses sont sous-jacentes à notre travail de conception et d'analyse de situations d'enseignement. Nous formulons ces hypothèses ainsi:

C'est par l'engagement des élèves dans des situations de modélisation des conduites des gaz parfaits, de formulation des modèles construits, de confrontation et de validation de ces modèles,

1- que les conceptions naïves pourront être examinées, qu'elles pourront évoluer, qu'elles pourront conduire à des adaptations et à des coordinations de connaissances qui pourront résulter en des conceptions satisfaisantes des gaz et de leurs conduites.

2- que les rapports problématiques des élèves aux mathématiques impliquées dans les lois sur les gaz seront transformés et résulteront en des applications et interprétations adéquates des lois qui régissent les conduites des gaz.

Notre recherche a pour objectif général de construire et d'analyser une séquence d'enseignement de la chimie des gaz comportant diverses situations de modélisation des conduites des gaz. La confrontation entre les analyses a priori et a posteriori des situations d'enseignement, selon la perspective de la théorie des situations et de l'ingénierie didactique, aura pour objectifs spécifiques:

1- d'identifier et de caractériser (variables de tâche et variables didactiques: voir la définition de l'analyse a priori donnée antérieurement) les situations qui déclenchent ou provoquent une évolution des conceptions naïves des élèves, évolution vers des connaissances plus adéquates en relation aux objets du savoir sur les lois des gaz parfaits.

2- d'identifier et de caractériser (voir 1-) les situations qui déclenchent ou provoquent une évolution des connaissances mathématiques des élèves leur permettant d'interpréter convenablement les résultats des expériences, d'éprouver leurs conceptions, de donner un sens aux notions et aux relations impliquées dans les lois des gaz parfaits et plus globalement, d'entrer dans une pratique scientifique.

3- d'identifier et de caractériser (voir 1-) les situations qui n'ont pas d'effet positif ou plus encore, qui ont un effet nuisible, sur les conceptions et les pratiques scientifiques des élèves, et plus généralement, sur leur construction de connaissances en relation aux objets de savoir sur les lois des gaz parfaits.

CHAPITRE III
METHODOLOGIE

Dans ce chapitre, nous présentons la méthodologie de notre recherche. Dans un premier temps, nous expliquons brièvement notre choix d'effectuer nous-mêmes l'enseignement de la chimie des gaz. Nous décrivons ensuite la population d'élèves qui bénéficie de cet enseignement. Puis, nous présentons ensuite les situations d'enseignement de la chimie des gaz parfaits. Nous complétons ce chapitre par une description du déroulement de l'expérimentation et des outils d'analyse des données retenus.

CONSIDÉRATIONS PRÉLIMINAIRES SUR LA POSITION DUALE DE LA CHERCHEUSE DANS L'EXPERIMENTATION ET L'ANALYSE DES DONNEES

Les situations d'enseignement de la chimie des gaz parfaits sont construites, réalisées et analysées par l'auteure de cette recherche. L'expérimentatrice, au sens usuel de ce terme, est à la fois l'enseignante titulaire de la classe dans laquelle l'enseignement est réalisé et la chercheuse. Nous aurions pu demander à un autre enseignement de notre école d'effectuer l'expérimentation des situations d'enseignement que nous avons construites. Nous avons choisi de procéder autrement pour diverses raisons.

Les situations d'enseignement que nous avons construites résultent d'analyses épistémologiques et didactiques, d'analyses préalables et a priori (Brousseau, 1986, 1996). La gestion de ces situations ne peut faire abstraction ni des intentions didactiques découlant de ces analyses, ni des objectifs de la recherche. Dans la gestion de ces situations et plus généralement de toutes situations, l'enseignant est amené à réagir sur le vif, à faire des choix, à prendre des décisions; les interventions de l'enseignant peuvent ainsi annéantir les possibilités d'acquisition de connaissances prévues initialement dans la conception des situations (Brousseau, 1986; Salin, sous presse). Dans l'enseignement des sciences, comme l'ont de plus montré plusieurs chercheurs (Berg et Brouwer, 1991; Carey, 1986; Chomat, Larcher et Méheut, 1992; Duschl et Gitomer, 1991; Johsua et Dupin, 1993), l'enseignant informé des conceptions naïves des élèves et de leur rapport aux mathématiques est aussi mieux préparé que les enseignants qui ne disposent pas de telles

connaissances, à entendre et à voir ce que font les élèves et enfin, à intervenir plus judicieusement sur les conduites des élèves.

Dans cette première étude sur l'enseignement de la chimie des gaz, à défaut de pouvoir mieux documenter la gestion didactique des situations que nous avons construites, il nous a semblé plus pertinent et plus prometteur que nous assumions la responsabilité de réaliser l'enseignement. De plus, notre position d'enseignante titulaire de la classe nous semblait un atout supplémentaire, dans la mesure où notre expérience en enseignement et plus spécifiquement, auprès des élèves de la classe concernée par notre projet, nous permettait de nous concentrer davantage sur la gestion didactique des situations, la gestion pédagogique étant moins problématique que la précédente. Pour mieux apprécier cet argument, nous rappelons très brièvement les définitions des notions de gestion didactique et de gestion pédagogique.

La gestion didactique concerne les interactions entre le maître et les élèves qui sont déterminées par les objets de savoir. Le contrat didactique est le moteur de cette gestion; il détermine pour une grande part sous un mode implicite, par les échanges entre le maître et les élèves, ce que chacun de ces partenaires devra faire et dont il sera responsable (Brousseau, 1996). Il réfère globalement aux attentes réciproques du maître et de l'élève, en regard de l'enseignement d'un savoir spécifique. Il convient de le distinguer du contrat pédagogique qui relève des règles en vigueur dans une classe et n'est pas lié à un savoir spécifique d'enseignement (Briand et Chevalier, 1995). Ces règles peuvent concerner les attitudes des élèves entre eux et envers l'enseignant, la coopération dans un travail d'équipe, l'organisation de la correction des devoirs, la fréquence de ces devoirs, la prise de parole des élèves, ..., la nature des contrôles. Ce qui est couramment appelé gestion pédagogique de la classe, ce qui relève également de la gestion de la discipline en classe, renvoient à ce concept de contrat pédagogique. Legendre (1993) écrit aussi que le contrat pédagogique constitue l'élément formalisé de l'ensemble des interventions de l'enseignant, destinées à orienter et à maintenir les élèves en contact avec la tâche d'apprentissage. Le contrat peut ainsi impliquer, par un énoncé des règles et des conséquences, l'ensemble du groupe-classe (contrat social) ou encore, lier par une entente spécifique relative, un seul élève à l'enseignant (contrat individuel).

Si plusieurs raisons motivent notre décision de réaliser l'enseignement, il faut admettre que cette décision comporte certains risques, un des plus grands risques étant de minimiser les problèmes d'enseignement qui relèvent des situations construites ou des interventions de l'enseignante, en un mot, d'attribuer aux élèves les défauts de notre enseignement. Un autre risque non moins

important est celui de ne mettre en évidence que les résultats positifs de l'enseignement. Nous verrons plus loin, lors de la présentation des procédés d'analyse choisis, comment nous comptons minimiser ces risques. Par ailleurs, il faut admettre que lorsque les chercheurs confient à des expérimentateurs ou à des enseignants la réalisation de séquences d'enseignement, ils ne sont pas à l'abri des risques de ne retenir des expériences réalisées que les résultats qui ne vont pas à l'encontre de leurs positions épistémologiques et didactiques et d'attribuer aux expérimentateurs ou aux enseignants les résultats négatifs.

DESCRIPTION DE LA POPULATION D'ÉLÈVES

L'expérimentation est conduite auprès d'une classe de 24 élèves inscrits au cours de chimie de la cinquième secondaire. Le français n'est pas la langue maternelle de 16 de ces élèves; toutefois, ces élèves possèdent un vocabulaire suffisamment riche et une maîtrise suffisante de la langue orale et écrite pour ne pas éprouver de problème à recevoir un enseignement en français.

Le cours de chimie est optionnel et est offert aux élèves qui suivent également le cours le plus avancé de mathématiques de la cinquième secondaire. La classe inclut donc des élèves performants et qui souhaitent poursuivre leurs études collégiales en sciences pures ou en sciences de la santé. La motivation de ces élèves est généralement très élevée et se manifeste par une implication sérieuse et soutenue dans les cours.

LES SITUATIONS D'ENSEIGNEMENT DE LA CHIMIE DES GAZ PARFAITS

Aux chapitres précédents, les analyses préalables portant sur les conceptions naïves des élèves et leurs rapports problématiques aux mathématiques impliqués dans l'enseignement de la chimie des gaz, sur les problèmes que pose l'enseignement actuel en ce domaine et enfin, sur le développement des concepts, des outils et des pratiques scientifiques au cours de l'histoire, nous ont amenée à proposer un enseignement de la chimie des gaz parfaits qui comporte des situations engageant l'élève dans un processus de modélisation mathématique des conduites des gaz et plus précisément, des relations entre la pression, le volume et la température des gaz (lois de Boyle-Mariotte et de Gay-Lussac). L'engagement des élèves dans un tel processus, selon les hypothèses de notre recherche, devrait entraîner une évolution des conceptions naïves et des connaissances mathématiques des élèves leur permettant de construire des connaissances plus adéquates en relation aux objets du savoir sur les lois des gaz parfaits et d'entrer dans une pratique scientifique.

Comment concevoir de telles situations? Voilà, la tâche qui nous occupe maintenant. Selon la méthodologie de l'ingénierie didactique sur laquelle nous nous appuyons pour réaliser cette tâche (Artigue, 1988), il nous faut trouver des situations propices et effectuer l'analyse a priori de ces situations, en identifiant les variables de commande de ces situations (variables de tâche et variables didactiques: voir les définitions de l'analyse a priori et des variables de commande présentées au chapitre précédent). Avant de présenter les situations que nous avons construites, nous indiquons quelques principes généraux qui guident notre travail.

Principes directeurs de la construction des situations d'enseignement

Un premier principe qui guide notre travail de conception de situations d'enseignement est la prise en compte des méthodes d'enseignement des sciences en vigueur dans l'institution scolaire où l'enseignement est réalisé et des habitudes des élèves dans les classes de sciences. L'examen de l'enseignement usuel des sciences et plus spécifiquement de l'enseignement de la chimie des gaz que nous avons effectué au premier chapitre a fait ressortir les distorsions entre les méthodes expérimentales prônées dans les guides pédagogiques et les pratiques se réclamant de ces méthodes. Tenter de réduire ces distorsions nous apparaît un objectif important. Mais, pour ce faire, il ne faut pas ignorer les habitudes des élèves dans les classes de sciences et surtout, dans les laboratoires de sciences; en effet, dans ces classes, les élèves effectuent des expériences selon un protocole défini entièrement par l'enseignant: prise des données, enregistrement des données, représentations des données, ... Il convient donc de rompre avec de telles habitudes.

Pour réaliser une première entrée des élèves dans un processus de modélisation mathématique, la situation choisie doit pouvoir faire agir et parler les élèves; les élèves doivent être assez familiers avec les phénomènes pour accepter d'agir, de parler, de prendre des risques en formulant des explications. Les phénomènes doivent être perceptibles et se prêter à des mesures que les élèves savent réaliser avec des instruments usuels simples.

Le temps de réalisation de l'expérience en laboratoire et de la première modélisation doit être celui habituellement consacré à une leçon, soit 75 minutes; les transformations doivent donc être apparentes et suffisantes pour pouvoir permettre une première modélisation. Puisque la modélisation mathématique implique la proportionnalité, le nombre de mesures différentes pouvant être prises en un temps relativement court doit être suffisamment élevé pour aller à l'encontre d'une

modélisation plus simple, de nature additive par exemple. Il s'agit d'une variable de tâche cruciale non seulement dans cette expérience en laboratoire, mais également dans les autres situations d'enseignement qui font appel à une démarche de modélisation mathématique. A l'instar de plusieurs chercheurs en didactique des mathématiques et des sciences et en nous référant plus précisément à la théorie des champs conceptuels élaborée par Vergnaud (1991), nous considérons qu'une activité de résolution de problème impliquant une identification des données, une représentation de ces données en une forme symbolique permettant la conduite d'un calcul relationnel et la mise en place de procédés pour obtenir une solution au problème identifié, est une activité de modélisation. La résolution de problèmes ainsi définie se distingue, il va sans dire, d'exercices usuels d'application.

La gestion didactique de chacune des situations retient également notre attention dans la conception des situations. Il nous faut déterminer pour chacune des situations comment l'enseignante devra répondre ou s'abstenir de répondre aux demandes des élèves lors de l'exécution des tâches que comportent ces situations: Doit-elle indiquer clairement qu'elle ne veut pas répondre à ces demandes? Doit-elle répondre en invitant les élèves de prendre en compte certaines variables des tâches? Doit-elle, selon le cas, donner la réponse attendue des élèves? ... Les interventions de l'enseignante lors des moments de formulation et de validation des solutions trouvées par les élèves doivent être aussi être prévues. Ce travail sur la gestion didactique des situations permet de contrôler, tout au moins dans une certaine mesure, les interactions didactiques; en effet, comme nous l'avons mentionné précédemment, l'enseignante devra inévitablement improviser, prendre des décisions sur le vif.

Notre séquence d'enseignement doit également comporter des exercices ou des applications-problèmes permettant aux élèves qui sont engagés dans ce travail de pouvoir reconnaître l'efficacité comparable de leur enseignement et de celui que reçoivent les élèves dans les autres classes de chimie. Les exercices et les applications-problèmes joueront donc un rôle normal de consolidation des acquisitions et de raccord aux enseignements réalisés dans les autres classes.

Il est également apparu nécessaire de ne pas engager l'institution dans des transformations importantes des dispositifs matériels qui sont en place pour les laboratoires. Se débrouiller avec les moyens du bord est donc devenu un principe à respecter. Ce travail se devait donc d'être crédible et accessible aux autres enseignants de l'institution. Ce principe a joué également dans le choix des examens sanctionnant pour toutes les classes de chimie la réussite des apprentissages.

Nous présentons maintenant l'ensemble des situations que comporte notre séquence d'enseignement, en précisant et justifiant, lorsque cela est possible, les choix réalisés.

Description des situations de la séquence d'enseignement

La séquence d'enseignement comporte une première situation de révision des connaissances en chimie, cinq situations d'enseignement de la chimie des gaz et une situation d'évaluation préparatoire à l'examen.

1. Première situation: révision des connaissances en chimie

A l'entrée dans la séquence d'enseignement, les élèves ont déjà un bagage de connaissances acquises lors du cours de sciences physiques (436) qu'ils ont suivi en quatrième secondaire. La révision se fait à l'aide de questions et de problèmes de chimie familiers aux élèves. Elle traite de connaissances utiles pour l'enseignement de la chimie des gaz. Elle porte aussi sur le raisonnement proportionnel; la construction de la loi Boyle-Mariotte-Gay-Lussac dépend entre autres de la possibilité d'identifier les relations de proportionnalité entre les variables de pression, de température et de volume.

La révision est un procédé couramment utilisé dans l'enseignement. Dans leurs études sur la mémoire didactique, Brousseau et Centeno (Brousseau et Centeno, 1992; Centeno, 1995) ont répertorié diverses utilisations de la mémoire didactique. Ils ont montré, entre autres, comment l'utilisation de la mémoire didactique permet à l'enseignant de prendre la mesure des connaissances des élèves à l'entrée dans un nouvel enseignement, de faire un raccord entre l'enseignement réalisé et ainsi, préparer leur entrée dans un nouvel enseignement. Voici les questions et problèmes présentés aux élèves.

Consignes:

Vous avez eu l'occasion, l'an dernier, d'apprendre plusieurs notions importantes en chimie; j'aimerais que vous essayiez de répondre aux questions suivantes. J'aimerais ensuite que vous compariez vos réponses à celles de votre voisin, de votre co-équipier habituel. Vos réponses me seront très précieuses pour savoir mieux adapter le cours de chimie sur les gaz que nous entreprenons.

Questions:

1. Selon l'hypothèse d'Avogadro, des volumes égaux de gaz différents contiennent, dans les mêmes conditions de température et de pression, le même nombre de molécules.

a) Quelle est la différence entre mole et molécule?

b) Quelle est la différence entre mole de molécules et mole d'atomes?

c) Combien y a-t-il de moles d'atomes dans

1. 24 g de C?
2. 27 g de Al?
3. 100 g de Al?
4. 100g de Ag?

d) Dans 117 g de NaCl, il y a

1. _____ moles de molécules de NaCl
2. _____ moles d'atomes de Na
3. _____ moles d'atomes de Cl

e) Dans 684 g de $C_{12}H_{22}O_{11}$ il y a:

1. _____ moles de molécules $C_{12}H_{22}O_{11}$
2. _____ moles d'atomes de C
3. _____ moles d'atomes de H
4. _____ moles d'atomes de O

f) Combien de molécules y a-t-il dans :

1. 16 g de O_2 _____
2. 68 g de NH_3 _____
3. 100 g de $C_{12}H_{22}O_{11}$ _____

g) Quelle est la masse molaire des molécules suivantes:

1. Gaz carbonique CO_2 _____
2. Méthane CH_4 _____
3. Octane C_8H_{18} _____

2. Calcul du volume molaire

a) Une mole de molécules de n'importe quel gaz occupe donc, à T.P.N. le même volume. Quel est ce volume ?

b) Un litre d'oxygène à T.P.N. a une masse de 1,43 g. La masse molaire moléculaire de O_2 est de 32,0 g/mol

1. Quel est son volume _____

2. Qu'entend-on par pression normale _____

3. Quelle est la masse de 44,8 L de CO_2 à T.P.N. _____

4. Température normale_____

5. La pression normale _____

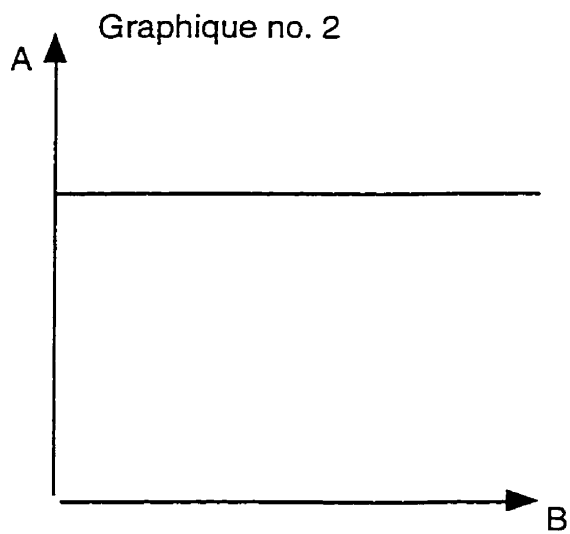
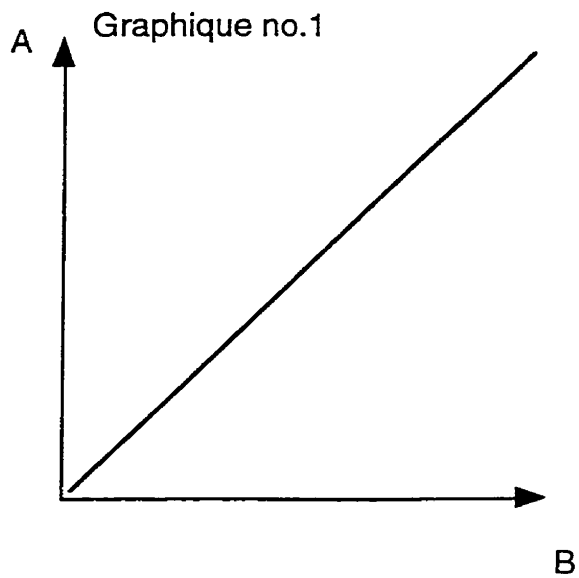
6. Température ambiante_____

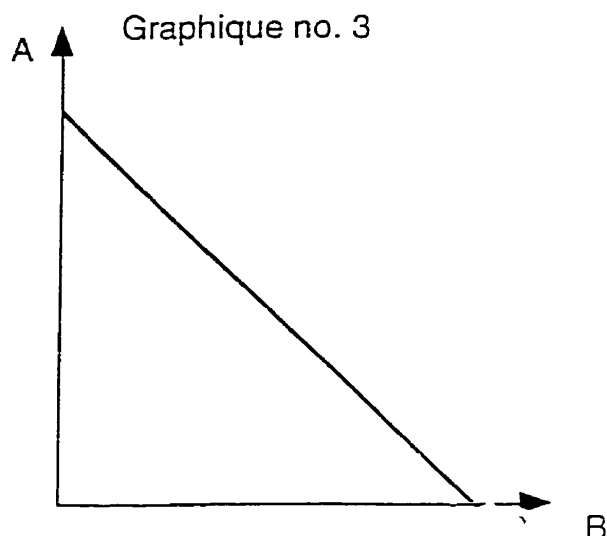
Dans un premier temps, les élèves travaillent seuls; il leur est demandé d'écrire ce qu'ils savent sur les notions suivantes: molécule, mole, nombre d'Avogadro, conversion Celsius-Kelvin de la température, regroupement des propriétés des éléments de la matière dans le tableau périodique. L'enseignante met à la disposition des élèves une calculatrice et leur propose aussi divers problèmes reliant la masse molaire et le nombre de moles dont la solution implique un raisonnement proportionnel. Les élèves forment des équipes de 2. Dans un premier temps, chacun des élèves répond aux questions et fait les problèmes puis, ce travail fait, les élèves d'une même équipe partagent leurs solutions et leurs réponses, et dans le cas de différence, revoient leurs solutions et leurs réponses.

Dans une second temps, l'enseignante corrige l'ensemble des travaux; pour chacune des questions et chacun des problèmes, elle invite un élève volontaire à inscrire sa réponse, sa solution au tableau et demande aux autres élèves d'évaluer cette réponse, cette solution. Diverses réponses et solutions peuvent être ainsi recueillies; si les élèves ne peuvent s'entendre sur la réponse ou la solution juste et défendre leur choix, l'enseignante conclut en indiquant la réponse ou la solution juste. Ce procédé d'institutionnalisation de la bonne réponse ou de la bonne solution est courant dans l'enseignement (Rouchier, 1991; Mercier, 1995; Salin, sous presse). Dans notre façon de gérer cette situation de révision, contrairement à ce qu'on observe couramment dans les classes, le recours à ce procédé n'est utilisé que lorsque les tentatives des élèves de statuer sur la bonne réponse ou sur la bonne solution aient échoué. Ce dernier recours nous semble justifié par le contexte particulier de révision qui est celui dans lequel est construite cette situation.

Ce travail complété, l'enseignante distribue aux élèves les graphiques suivants et demande aux élèves de préciser la relation entre les variables dans chacun des graphiques et d'écrire cette relation sous une forme mathématique générale (ex: équation de la droite). Comme on le voit, ces graphiques montrent d'une façon visuelle, perceptive, les relations entre des variables; on ne peut toutefois calculer la pente des droites, ne connaissant pas l'échelle de mesures et les valeurs des variables. Notre but en présentant ces graphiques est de voir si les élèves sont en mesure de caractériser les diverses relations, en recourant à une formulation du type «inversement proportionnel, directement proportionnel» et de montrer comment se traduisent ces relations dans

une écriture mathématique générale. La correction en groupe de ce travail est menée de la même façon que la correction du premier travail.





2. Deuxième situation: l'expérience initiale en laboratoire

L'expérience initiale réalisée en laboratoire a pour but d'amener les élèves à construire un premier modèle du comportement d'un gaz, sous l'effet d'une variation de la température. En tenant compte du matériel disponible à l'école, nous avons choisi une expérience familière aux élèves: l'augmentation du volume de l'air sous l'effet de l'élévation de la température nous est apparue une expérience de ce type. Notre connaissance acquise au cours de notre pratique d'enseignement, ainsi que les connaissances sur les conceptions des élèves dont nous avons fait état au premier chapitre, a milité en faveur de cette expérience. L'emprisonnement de l'air dans un ballon de baudruche est également apparu un bon choix, puisqu'il permet aux conceptions naïves des élèves d'être exprimées. Selon les études sur les conceptions naïves, les élèves pensent ainsi que l'air chaud monte et se dilate et exerce une pression sur une paroi souple, pouvant faire éclater cette paroi.

Pour que cette expérience permette aux élèves de formuler leurs conceptions et de prélever des données qui les amènent à proposer un premier modèle, il convenait que des mesures puissent être prises fréquemment, qu'elles diffèrent de façon appréciable, que la comparaison de ces mesures puissent amener le rejet d'un modèle additif au profit d'un modèle proportionnel, en un laps de temps suffisamment court pour pouvoir compléter cette expérience et discuter des modèles durant la période de 45 minutes allouée à une leçon, dans l'école. Enfin, pour que les élèves puissent effectuer les mesures, ils devaient disposer d'instruments qui leur étaient familiers; ils devaient

s'emparer de ces instruments, sans que l'enseignante ait à intervenir, autrement qu'en mettant à leur disposition ces instruments. Nous avons vu, dans notre analyse de l'enseignement actuel sur les gaz que la prise de mesures est sous le contrôle de l'enseignant, de même que la représentation des données sous une forme graphique; nous voulions que les élèves prennent en charge la cueillette et le traitement des observations, selon une pratique usuelle en sciences.

Le choix de l'expérience et l'identification des variables de commande de la situation sont donc guidés par des considérations épistémologiques et didactiques. Il importe par ailleurs de mentionner que nous avons dû nous contenter de la réalisation d'uniquement deux montages expérimentaux, ne disposant pas des matériaux pour pouvoir permettre à chacun des élèves ou à chaque équipe d'élèves de faire le montage de cette expérience. Toutefois, dans ces montages, l'air n'occupe pas un même volume initial et la température initiale n'est pas identique. Il s'agit d'une variable que nous jugeons pertinente; d'une part, il est presque impossible avec le matériel de faire deux montages identiques et de contrôler l'élévation de la température. Nous pensons que les élèves devront ainsi établir des correspondances qui leur permettront de retenir les données essentielles sur les phénomènes et de trouver des moyens d'organiser la prise de mesures pour effectuer une économie. Un des montages pourrait aussi servir à la vérification des hypothèses formulées à partir des observations faites sur l'autre montage. Nous décrivons plus précisément cette expérience initiale, ainsi que les consignes données aux élèves.

Montages expérimentaux

Aux extrémités du bureau de l'enseignante sont installés deux montages identiques composés d'une plaque chauffante en fonction (réglage maximum) sur laquelle est déposé un gros béccher rempli d'eau aux $\frac{2}{3}$; sur l'eau du béccher flotte un ballon de baudruche faiblement gonflé d'air. Pour chaque montage, quelques thermomètres et rubans à mesurer sont disponibles. La pression atmosphérique est inscrite au tableau.

Présentation de la tâche par l'enseignante

L'enseignante dit aux élèves que l'expérience qui se réalise devant eux (montrant les montages) va entraîner divers changements et qu'ils devront s'organiser pour trouver des explications de ces changements; il leur importe de formuler leurs explications et enfin, de trouver l'explication qui leur semble la "plus scientifique". Il leur dit qu'ils peuvent travailler en équipe de 2, prendre toutes les données qui leur semblent utiles et inscrire sur papier toutes les explications. A la suite de ce

travail, les diverses explications seront examinées et chacun des élèves ou chacune des équipes devra défendre ses explications.

Le choix de ne pas indiquer quelles mesures prendre, comment les prendre, à quelle fréquence, comment inscrire ces mesures sur papier, ce qui constitue des explications, ce qui constitue une explication scientifique est important. Nous avons vu que des indications sur ces aspects, dans l'enseignement usuel, enlèvent aux élèves la responsabilité de trouver une solution ou des solutions au problème. Par ailleurs, les élèves ont des habitudes en laboratoire; il y a de fortes chances qu'ils s'emparent des instruments de mesure et inscrivent ces mesures sous diverses formes et en particulier, sous la forme d'un tableau.

Echanges d'explications entre les équipes voisines

Après une période de 25 minutes de cueillettes de données, l'enseignante suggère que chacune des équipes partage avec une équipe voisine ses résultats, ses explications et trouve des moyens de mieux formuler ses explications et de vérifier la pertinence de ses explications, si ces explications diffèrent et même si ces explications sont semblables. Cet échange dure environ 15 minutes.

Examen des explications avec toute la classe

L'enseignante invite les élèves à présenter à la classe leurs explications. S'il n'y pas consensus, l'enseignante demande aux élèves de choisir et d'expliquer leur choix. Le rôle de l'enseignante est, à cette étape, crucial; il ne s'agit pas pour elle de corriger des explications, de les rejeter ou encore, de prendre prétexte d'une explication voisine de celle qu'elle attend pour institutionnaliser le savoir visé, pour expliquer la loi sur le comportement des gaz. L'enseignante termine cette période en demandant aux élèves de bien conserver ce qu'ils ont fait, trouvé ou ce que d'autres élèves ont fait (inscriptions au tableau) et de poursuivre leur travail à partir de ce qu'ils ont conservé, afin de trouver une explication encore plus satisfaisante ou encore, de trouver d'autres moyens de vérifier leurs explications ou d'autres façons de prendre ou d'organiser les données.

3. Troisième situation: la modélisation mathématique des relations entre la température et le volume d'un gaz, la pression étant constante

Lors de la seconde situation, les élèves ont formulé diverses explications des phénomènes observés à partir des expériences conduites. La troisième situation débute par un rappel des explications formulées. L'enseignante demande aux élèves de présenter à nouveau leurs explications et d'indiquer s'ils ont pu poursuivre leur travail, en particulier s'ils ont pu établir d'autres relations entre les données. L'enseignante se contente toujours de recueillir leurs réponses qu'elle inscrit à nouveau au tableau; en ne commentant pas les réponses des élèves ou en n'instituant pas les bonnes réponses, l'enseignante permet le travail ultérieur de validation des réponses par les élèves et ne ferme pas cette situation. L'enseignante entre aussi les données recueillies au cours de l'expérience initiale, privilégiant sans en expliquer les raisons, l'entrée de ces données sous la forme d'un tableau. Les expériences antérieures d'enseignement montrent que généralement la grande majorité des élèves sait réaliser une telle disposition des données, cette disposition étant usuelle dans les laboratoires en sciences.

L'enseignante demande ensuite aux élèves s'ils pensent qu'à partir de ces données, ils pourraient trouver une loi pour expliquer les changements que leurs tableaux montrent. Il est fort possible que les élèves avouent les difficultés à le faire, en raison des différences dans les entrées des données et même des mesures qui sont approximatives. Dans ce cas, l'enseignante leur demande comment il aurait fallu prendre les mesures pour pouvoir mieux voir ce qui se passe; il s'agit d'une gestion didactique de la situation qui contraint les élèves à trouver eux-mêmes les moyens de se tirer d'affaires. Des élèves peuvent alors suggérer de trouver des intervalles constants entre des mesures de température. Mais même si ces suggestions ne sont pas faites, l'enseignante poursuit la leçon en distribuant une feuille comportant un tableau formé de deux colonnes, la première indiquant les variations de la température d'un gaz en °C (le gaz est du CO₂) et la seconde, les variations du volume du même gaz en litre. Elle précise ensuite qu'il s'agit de données d'une expérience similaire à celle qui a été faite dans le cours précédent, mais cette fois-ci, le matériel utilisé étant plus adéquat (....) , il a été possible d'effectuer des mesures plus précises et ainsi, de pouvoir mieux rendre compte des variations de température et de volume. Elle ajoute que dans cette expérience, la pression atmosphérique est fixée à une atmosphère.

3.1. Première partie: une mesure étant connue (soit le volume ou la température), trouver la seconde mesure (soit la température ou le volume)

L'enseignante demande aux élèves de chacune des équipes d'identifier la (les) relation(s) mathématique(s) entre la température et le volume du gaz; elle ajoute que, pour ce faire, ils peuvent calculer en choisissant leurs données comme il leur semble le plus utile, ils peuvent aussi faire un graphique; ils peuvent donc utiliser tous les moyens qu'ils jugent utiles. Les élèves ont aussi accès à leur calculatrice. L'enseignante termine la présentation de la tâche en disant aux élèves que les relations qu'ils trouveront leur permettront ainsi de trouver d'autres mesures de température ou de volume.

La décision d'inclure dans la consigne une incitation à utiliser divers moyens, tels le calcul, le graphique, permet d'économiser un temps précieux à répondre aux questions des élèves concernant ces moyens. Elle permet aussi de ne pas trop privilégier un moyen, comme cela arrive souvent lorsque l'enseignant répond à des questions des élèves, cette réponse étant souvent reçue comme une incitation à utiliser absolument le moyen inclu dans la réponse. Elle est enfin un moyen pour dire aux élèves que les moyens qu'ils jugent utiles sont importants et que c'est à eux de les évaluer.

La feuille distribuée aux élèves est la suivante.

Tableau 1

Variations du volume et de la température d'un gaz

La pression atmosphérique est fixée à 1 atm.

Température °C	Volume L (bombe de gaz)
300	2,49
250	2,01
200	1,37
50	1,18
0	1,00
-50	0,87
-100	0,76
-150	0,64
-200	0,51

Les questions pour cette première partie sont:

- a) trouver les volumes correspondant aux températures suivantes: -35°C , 180°C , -57°C .
- b) trouver les températures correspondant aux volumes suivants: 1,50 L, 0,95 L, 0,55 L

La température en $^{\circ}\text{Celsius}$ devra être transformée en $^{\circ}\text{Kelvin}$. Seule une telle transformation, permet d'identifier les relations entre les mesures. Il est donc utile que les élèves puissent, dans un premier temps, se buter à des problèmes pour qu'ils pensent à effectuer une conversion des mesures de température et saisissent l'importance d'une telle conversion. Parmi ces problèmes, le changement de signe dans les rapports entre les mesures en est un qui a de fortes chances de survenir; il faut convenir que ce problème en est un en mathématiques, car en chimie, les élèves peuvent toujours y trouver des explications. Enfin, les élèves ont déjà eu dans des cours précédents à effectuer une telle conversion; cette action est donc connue et il est possible qu'elle soit réalisée par un certain nombre d'élèves, sans l'intervention de l'enseignante.

Les mesures de température sont formées uniquement de nombres entiers pour faciliter la transformation d'une échelle à l'autre. Elles ont un écart constant de 50°K , ce qui favorise la recherche de régularités dans les mesures de volume et l'abandon d'un modèle additif, puisque les écarts entre les volumes ne sont pas constants et ne peuvent toujours être expliqués par des erreurs dans la prise de mesures. Les volumes sont exprimés en litres, sous la forme de nombres décimaux arrondis aux centièmes, ce qui est en accord avec les instruments de mesure dont nous disposons pour effectuer des laboratoires sur les gaz.

Le graphique de la variation du volume en fonction de la température est une solution permettant de construire une droite affine, droite indiquant que la relation entre température et volume du gaz est directement proportionnelle. Le graphique permet de répondre aux questions sur les températures et les volumes; il s'agit de réponses dont la précision dépend de l'échelle utilisée pour faire le graphique. Par ailleurs, le calcul de la pente ou du taux de variation fournit la relation entre les mesures et l'équation de la droite soit $V = 0,004T$ (V: volume; T: température).

Le recours à un graphique n'est pas l'unique moyen de trouver la relation entre la température et le volume:

- a) si on divise le volume par la température en kelvin qui lui est associée sur la même ligne, par exemple, à la première ligne $2,49 \text{ L} / 673^{\circ}\text{K} = 3,6 \times 10^{-3}$, on obtient le taux de variation du volume selon la température;

b) si le même calcul est repris pour chaque ligne du tableau, on obtient une valeur sensiblement constante, permettant l'identification de la relation entre les deux variables; la moyenne des valeurs obtenues à chaque ligne (soit le rapport V/T) permet d'obtenir la constante à partir de laquelle l'équation régissant le comportement des deux variables impliquées dans cette situation peut être écrite ($V/T = 0,004$ ou $V = T \cdot 0,004$).

3.2. Seconde partie: inscription des réponses des élèves au tableau et poursuite du travail de modélisation

Dans cette seconde partie, l'enseignante se contente d'inscrire les réponses des élèves au tableau, sans faire d'évaluation de ces réponses. Elle se contente de demander aux élèves comment ils ont trouvé leurs réponses (Comment avez-vous trouvé vos réponses: en faisant des calculs, en faisant un graphique, ...) et s'ils sont sûrs des réponses trouvées (Quels sont ceux qui sont sûrs de leurs réponses) et comment ils le savent (Comment savez-vous que vos réponses sont bonnes?). Cette inscription permet aux élèves de comparer leurs réponses, de voir que plusieurs procédés ont été utilisés, de voir que certains sont plus sûrs que d'autres de leurs réponses, d'entendre également les raisons de cette assurance.

L'enseignante offre aux élèves quelques minutes supplémentaires pour réviser leurs solutions, leurs réponses. Puis, elle introduit les questions suivantes:

a) Pensez-vous que la relation entre les deux variables soit une relation de proportionnalité? Expliquez.

b) Pouvez-vous formuler une équation de la forme $A @ B = \text{constante}$ pour montrer la relation entre la température et le volume du gaz, à pression constante; le symbole @ désigne une opération. ($V/T = \text{constante}$; $V = T \times k$; k : constante) .

L'enseignante rappelle que la relation que les élèves ont trouvée doit pouvoir s'appliquer à chacune des lignes du tableau et produire les résultats qui y sont inscrits; dans le cas contraire, cela veut dire que leur solution n'est pas acceptable. Elle ajoute également qu'ils peuvent toujours recourir à un graphique et autres moyens qu'ils connaissent en mathématiques pour trouver les réponses aux questions posées.

3.3. Troisième partie: discussion sur l'ensemble des solutions trouvées au cours des parties précédentes

L'enseignante invite chacune des équipes à formuler ses solutions aux divers problèmes qui lui ont été posés au cours des parties précédentes. S'il n'y a pas consensus, elle invite les élèves à justifier leurs solutions, à choisir parmi les solutions celles qui leur semblent les plus pertinentes et à en donner les raisons. Les élèves peuvent questionner d'autres élèves, s'ils jugent que leurs explications ne sont pas claires. Il s'agit d'un travail de formulation et de validation. L'enseignante arrête le débat lorsqu'elle juge que les explications et formulations des élèves n'apportent rien de neuf. Elle demande alors aux élèves de faire un dernier choix sur les solutions, leur disant qu'elle leur présentera les solutions adéquates et qu'ainsi, ils pourront juger de la pertinence de leur choix. Le choix réalisé par les élèves, l'enseignante inscrit au tableau les solutions et la relation entre les variations de volume et de température d'un gaz, à pression constante; elle demande aux élèves d'étudier ces solutions et de juger eux-mêmes de leurs propres solutions.

4. Quatrième situation: la modélisation mathématique des relations entre le volume d'un gaz et la pression, la température étant constante

La quatrième situation débute par un retour sur la situation précédente. Ce retour, d'abord non guidé, permet aux élèves d'exprimer librement ce dont ils se souviennent du travail qu'ils ont effectué concernant les relations entre le volume et la température d'un gaz. L'enseignante leur demande ensuite d'exprimer sous une forme mathématique et sous une forme graphique ces relations et d'indiquer les informations que ces deux représentations apportent. Une attention spéciale est portée à l'interprétation du graphique en relation avec l'écriture mathématique $V/T = k$, car il ne nous apparaît pas évident que les élèves sachent facilement indiquer comment il est possible de calculer la constante de proportionnalité, à partir du graphique. L'enseignante doit toutefois s'abstenir de montrer comment procéder et de commenter le graphique.

L'enseignante distribue ensuite aux élèves un tableau formé de deux colonnes, l'une indiquant le volume d'un gaz en litres et l'autre, la pression en kiloPascals. Dans ce cas-ci, contrairement à ce qui a été fait à la situation précédente, l'élève n'a pas de conversion d'unités de mesure à faire. L'utilisation de nombres rationnels sert à donner une représentation réelle ou correspondante aux lectures qu'on pourrait obtenir sur les appareils utilisés en laboratoire. Les kiloPascals sont les unités qu'on retrouve sur l'appareil avec lequel on mesure la pression atmosphérique en classe. La

température est fixée à 250 °C. Le premier couple de nombres est formé d'une valeur de pression d'une atmosphère et d'une valeur de volume qui est fréquemment utilisé dans la vie courante, soit 2,49 litres. Mais, cette fois, les écarts entre chacune des mesures ne sont pas constants. Travaillant en équipes de 2, les élèves doivent effectuer les tâches suivantes:

1. Expliquer la relation entre les mesures de volume et de pression inscrites au tableau;
2. Trouver la pression lorsque le volume est de
 - a) 2,32 litres
 - b) 0,80 litre.
3. Trouver le volume lorsque la pression est de
 - a) 225 kPa
 - b) 153 kPa

Tableau 2

Variations du volume et de la pression d'un gaz

La température est fixée à 250 °Celsius

Volume (bombe de gaz) L	Pression en kPa
2,49	101,3
2,01	125,6
1,37	184,3
1,18	213,9
1,00	252,5
0,87	290,2
0,76	332,2
0,64	394,5
0,51	495,1

Les élèves peuvent facilement constater que plus la pression augmente, plus le volume diminue. L'idée d'une relation inverse entre les variations dans les mesures de pression et de volume est donc simple à produire; cette relation va aussi dans le sens des conceptions des élèves, comme nous l'avons écrit au chapitre premier.

La représentation sous la forme d'un graphique des relations entre volume et pression montre aussi cette idée de relation inversement proportionnelle entre les deux variables. Le calcul de la pente donne aussi une valeur négative. La relation entre le signe de la pente, l'allure de la droite et la proportionnalité est connue des élèves, à travers les cours de mathématiques qu'ils ont suivis et à

travers le travail fait lors de la situation précédente. Il est possible ainsi que plusieurs élèves utilisent un graphique pour répondre aux questions. Il est possible également que plusieurs élèves trouvent à partir de la pente de la droite, l'équation qui permette de calculer les valeurs demandées. Il est possible que les élèves procèdent aussi par des calculs arithmétiques sur quelques mesures, qu'ils pourront vérifier sur d'autres mesures. À ce stade, les élèves peuvent disposer de divers moyens de répondre aux questions posées.

Lorsque les élèves ont répondu aux questions, l'enseignante leur demande d'indiquer leurs solutions, de les justifier, de montrer comment ils savent qu'elles sont justes. Si aucun élève n'a eu recours à une solution graphique, l'enseignant leur demande de produire une telle solution, sans indiquer toutefois comment définir les axes du graphique. La comparaison des graphiques de la troisième situation et de cette situation sera une occasion de discuter de l'allure des graphiques, du sens des axes en relation avec les connaissances sur les conduites des gaz (de montrer que l'identification des axes revêt un sens) et de créer une possibilité de «lire» sur un graphique des relations mathématiques, en particulier des relations de proportionnalité directe et inverse.

5. Cinquième situation: la modélisation mathématique des relations entre la pression, le volume et la température des gaz parfaits

Dans la cinquième situation, un tableau est distribué aux élèves. Il est formé de trois colonnes, chacune représente un paramètre de la loi des gaz parfaits soit la pression, le volume, la température. Dans chacune des lignes du tableau, on remarque que deux sur trois des paramètres sont identifiés par une valeur chiffrée, la troisième est absente. Cette valeur manquante diffère d'une ligne à l'autre; le travail de l'élève est de réussir à identifier la valeur numérique absente associée aux deux autres.

L'élève devra trouver une façon de réunir les trois paramètres. L'enseignant introduit ainsi la situation: «Si la température augmente, on a vu que le volume augmente également. Comment cela est-il possible? Pour trouver les valeurs absentes dans le tableau, vous devez répondre à ces questions à partir de ce que nous avons fait jusqu'à présent et de ce que vous savez aussi.»

Nous avons vu que les conceptions substantialistes et mécanistes relevées chez les élèves dans des études sur les conceptions scientifiques peuvent constituer des connaissances utiles pour orienter le travail de modélisation nécessaire pour réussir les tâches qui sont proposées dans cette

situation. Ainsi, nous savons que les particules de gaz à l'intérieur du ballon (à paroi flexible), sous l'effet d'une élévation de température, exercent plus de pression sur la paroi qui se dilate. Les élèves ont de fortes chances d'avoir développé des connaissances assez voisines de celles-ci qui leur permettent de soutenir leur travail de coordination des relations entre la pression atmosphérique et la température et entre le volume et la température construites lors des situations précédentes.

Il s'agit donc dans cette situation de réunir les trois équivalences suivantes en une seule.

Équivalences:

Relation 1 $V/T = k_1$

Relation 2 $P \times V = k_2$

Relation 3 $P/T = k_3$

Équivalence nouvelle construite des précédentes

$$P \cdot V/T = k$$

Le tableau suivant est distribué aux élèves qui ont donc pour tâche de le compléter et de trouver une équation (une loi) qui montre les relations entre les 3 variables.

Tableau 3

Variations de la température, du volume et de la pression d'un gaz

Température °C	Volume en L	Pression kPa
250	2,49	101,3
78	3,25	
112		83,2
	5,10	125,5
432	0,55	
223		200,0
	2,56	251,0

La première ligne du tableau est complète. Ce choix permet aux élèves d'y réaliser les calculs connus sur les relations entre la température (température exprimée en °Kelvin) et le volume, entre le volume et la pression atmosphérique et possiblement, entre la température et la pression atmosphérique. Mais ces calculs ne sont pas suffisants pour trouver les données manquantes dans les autres lignes, puisque toutes les données sont transformées d'une ligne à l'autre. Les calculs

peuvent être interprétés, orientés par des connaissances plus générales, formulées en langage naturel, sur les relations entre les paramètres de la situation, ce qui peut amener à faire l'hypothèse d'une compensation entre les transformations et à rechercher la constante reliant les trois paramètres. Une fois cette constante trouvée, l'élève est en mesure de trouver la valeur manquante et ainsi de suite pour les autres lignes. Les relations suivantes sont alors calculées et utilisées:

$$\begin{array}{l} P_1 V_1 / T_1 = k_1 \\ \text{et} \quad P_2 V_2 / T_2 = k_2 \end{array}$$

La deuxième possibilité pour trouver les valeurs manquantes est d'établir une correspondance entre les données de deux lignes du tableau sans calculer la valeur de la constante. L'équation suivante est alors utilisée:

$$P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2$$

Nous avons longuement hésité à propos de l'intérêt de donner ou non des indications sur les rapports entre les valeurs d'une ligne à l'autre. Nous avons choisi de ne pas intervenir immédiatement. Ainsi, lorsque les élèves ont terminé cette tâche, l'enseignant les invite à donner leurs réponses et à présenter leurs solutions. Il ne corrige pas les réponses erronées, mais demande aux élèves s'ils connaissent un moyen de savoir si toutes les réponses sont justes. Si les élèves n'ont aucune idée sur la manière de le faire, l'enseignant leur rappelle que les mesures dans chacune des lignes de ce tableau peuvent être considérées comme des conditions différentes ou des situations différentes à propos d'un gaz formé toujours d'un même nombre de moles. Il peut ajouter au besoin qu'il importe de maintenir l'équilibre du système d'une ligne à l'autre.

Pour terminer la présentation de cette situation, il faut évoquer les confusions possibles chez les élèves entre la pression atmosphérique et la pression interne du ballon; il est possible que l'enseignant ait à discuter avec les élèves de cette différence pour que les élèves soient en mesure d'identifier la relation directement proportionnelle entre les variables pression atmosphérique et température et puissent saisir l'idée que la pression interne est une mesure composée.

6. Sixième situation: les volumes occupés par 16g de gaz différents soumis aux mêmes conditions de température et de pression.

La quantité (nombre de moles) de gaz influe sur les valeurs des trois paramètres étudiés: la pression, la température et le volume. Deux quantités de gaz ayant une même masse n'ont pas nécessairement le même volume ni n'exercent la même pression interne, puisque qu'elles ne sont pas formées du même nombre de moles. Ces notions ont été enseignées à nos élèves pour la première fois en quatrième secondaire dans le cours sciences physiques 436. Ils devraient avoir appris qu'une mole de n'importe quel gaz, à température et pression normales (0°C et une atmosphère) occupe un volume de 22,4 litres; il s'agit d'une propriété physique des gaz. La relation entre la quantité de gaz et les mesures des paramètres pression, température et volume, relation associée à l'hypothèse d'Avogadro, est maintenant, dans cette sixième situation, objet d'enseignement.

6.1. Première partie: rappel des connaissances acquises lors de la cinquième situation

Pour bien s'assurer que les élèves se souviennent de la loi générale sur les conduites des gaz, loi enseignée lors du cours précédent, il leur est demandé de résoudre un problème impliquant cette loi. C'est une autre occasion de permettre à des élèves qui ne seraient pas parvenus à établir les relations constitutives de cette loi de le faire. Le problème présenté se formule ainsi:

Un ballon aéronautique contient 30 litres d'hélium, la température au sol est de 24°C , la pression est de 101 kPa; à 35 milles mètres d'altitude, la température sera de 5°C et la pression de 92 kPa. Quel sera le volume de l'air à 35 milles mètres d'altitude.

Dans ce problème, les mesures sont réelles. De plus, dans le cours de météorologie donné en deuxième secondaire, les élèves ont eu l'occasion de se familiariser avec les principes de fonctionnement de ballons aéronautiques. Les élèves doivent résoudre ce problème seuls. Les solutions des élèves sont ensuite exposées au tableau et validées par les élèves.

6.2. Seconde partie: explication des différences dans les volumes de masses identiques de gaz différents soumis aux mêmes conditions de température et de pression.

Dans cette seconde partie, les élèves doivent expliquer les différences entre les volumes de masses identiques de gaz différents soumis aux mêmes conditions de température et de pression. Ils reçoivent les trois tableaux suivants. Ces tableaux sont formés de la même façon. Le titre de chacun est identique: "Mesures obtenues sous certaines conditions affectant 16g d'un gaz." La première colonne représente la température, la seconde le volume et la troisième, la pression. Dans les différents tableaux, seuls les volumes ne sont pas identiques. La consigne demande donc aux élèves d'expliquer les différences entre les volumes des trois tableaux.

Tableau 4.1

Variations du volume d'un gaz dont la masse est de 16g
16g du gaz donnent les résultats suivants

Température °C	Volume (L)	Pression (kPa)
25	12,25	101,3
672	4,5	881,7
-155,1	3,3	150,0

Tableau 4.2

Variations du volume d'un gaz dont la masse est de 16g
16g du gaz donnent les résultats suivants

Température °C	Volume (L)	Pression (kPa)
25	6,125	101,3
672	2,250	881,7
-155,1	1,6	150,0

Tableau 4.3

Variations du volume d'un gaz dont la masse est de 16g
16g du gaz donnent les résultats suivants

Température °C	Volume (L)	Pression (kPa)
25	24,5	101,3
672	9,009	881,7
-155,1	6,62	150,0

Dans ces tableaux, des relations simples peuvent être établies entre les mesures des volumes; le but de cette situation étant de comprendre comment une même masse de gaz différents peut occuper des volumes différents, lorsque les gaz sont soumis aux mêmes conditions, il est apparu nécessaire de ne pas accaparer les élèves avec des calculs plus complexes des relations entre les volumes.

La construction d'une explication pertinente oblige à une dissociation entre la quantité de gaz et la masse d'un gaz; la quantité dépend du nombre de moles du gaz. Sachant que: «à 25 °C, avec une pression de une atmosphère (101,3 kPa), une mole de n'importe quel gaz occupe un volume de 24,5 litres», ou qu'à 0 °C, avec une pression de une atmosphère, une mole de n'importe quel gaz occupe un volume de 22,4 litres", les élèves devront donc conclure que le nombre de moles dans les diverses situations n'est pas le même, qu'il s'agit donc de gaz différents. En comparant les entrées dans la première ligne de chaque tableau, les déductions suivantes sont alors possibles:

a) dans le tableau 4.3, nous avons un volume de 24,5 litres inscrit à la première ligne, ce qui signifie que nous avons une mole d'un gaz (Température et Pression Ambiantes (TPA);

b) dans le tableau 4.1, nous avons un volume de 12,25 litres inscrit à la première ligne, ce qui signifie que nous avons alors une demi mole (0,5) d'un gaz (TPA);

c) dans le tableau 4.2, nous avons un volume de 6,125 litres inscrit à la première ligne, ce qui signifie que nous avons un quart (0,25) de mole d'un gaz (TPA);

Les autres lignes du tableau ne sont présentes qu'à titre informatif; elles montrent que les déductions faites à partir des données de la première ligne des tableaux valent aussi pour les données des autres lignes. Si l'élève sait bien utiliser la consigne qui lui est donnée, il lui sera facile d'y voir des applications découlant de l'hypothèse d'Avogadro. Il pourra évidemment affirmer que les trois gaz sont différents. Pour ce qui est de leur identification, cela est possible, s'il peut avoir accès aux formules des gaz qui sont à l'état gazeux à la température de 25 °C. Il pourrait ainsi consulter des ouvrages de chimie. Nous avons choisi de mettre à la disposition des élèves un tableau périodique et de leur donner l'occasion d'interpréter les données de ce tableau, en effectuant des calculs appropriés. Dans le cas présent, ils pourront facilement trouver le gaz du premier tableau. En effet, au tableau 4.1, 16 g du gaz considéré représentent 0,5 mole, si on considère les paramètres de température et de pression, car une mole devrait occuper 24,5 litres pour une

température de 25 °C et une pression d'une atmosphère; une mole du gaz a donc une masse de 32 g. L'oxygène étant un gaz familier aux élèves, ils peuvent l'identifier. L'identification des gaz dans les autres tableaux peut procéder d'un même raisonnement, mais dans ces cas les gaz SO₂ (tableau 4.2) et CH₄ (tableau 4.3) sont moins familiers que le précédent. Mais l'identification des gaz ne revêt qu'un intérêt secondaire dans cette situation.

Dans cette situation, certaines connaissances sont nécessaires pour effectuer les tâches et il n'est pas évident, bien que les élèves aient en principe construit de telles connaissances dans les cours de sciences enseignés en quatrième secondaire et aient eu l'occasion de les rappeler dans la première situation de révision de cette séquence, que ces élèves puissent avoir recours ou se rappeler de telles connaissances. Il est possible que l'enseignant doivent intervenir pour faciliter le rappel de ces connaissances; mais, il ne devrait pas le faire avant que les élèves aient eux-mêmes fait l'hypothèse de gaz différents et aient demandé l'assistance de l'enseignant pour effectuer les calculs requis. L'enseignant doit donc être prêt à rappeler les connaissances suivante; il peut les inscrire au tableau sans les commenter et laisser le soin aux élèves de s'en emparer et d'en examiner l'utilité dans la situation présentée.

- a) Une mole de n'importe quel gaz à température (0 °C) et pression normales (101,3 kPa) occupe un volume de 22,4 litres.
- b) Une mole de n'importe quel gaz à température (25 °C) et pression ambiantes (101,3 kPa), occupe un volume de 24,5 litres.

Enfin, de la même manière que dans les autres situations, l'enseignant examine avec les élèves leurs solutions aux problèmes, leurs réponses aux questions.

7.Septième situation: consolidation des connaissances sur les gaz parfaits

Au terme de la sixième situation, l'enseignement proprement dit sur les gaz parfaits est terminé. Il est toutefois important que les élèves puissent utiliser leurs connaissances dans la résolution de problèmes variés et qu'ils puissent également répondre correctement à certaines questions impliquant diverses notions liées à la chimie des gaz.

Les problèmes et les questions présentés sont similaires à ceux qui sont généralement donnés dans les classes de chimie; ils sont puisés du cahier d'exercices rédigé par Farran (1992). Ce choix est guidé par des considérations didactiques importantes. Les élèves doivent avoir les moyens de

reconnaître, en se référant aux pratiques usuelles d'évaluation de leur institution, les connaissances et les savoirs qu'ils ont construits. Comme le souligne à plusieurs reprises Brousseau (1986, 1996), le chercheur qui construit et expérimente en classe des situations d'enseignement a l'obligation de rendre des comptes à l'institution dans laquelle il intervient; il doit montrer qu'il produit au moins des résultats comparables à ceux produits dans cette institution par d'autres pratiques d'enseignement. C'est également par de telles évaluations que la gestion du temps didactique est réalisée dans l'institution (Mercier, 1992); en mettant un terme à l'enseignement, les évaluations permettent l'avancé du temps didactique, le passage à l'enseignement d'un autre objet du savoir.

Les élèves doivent faire seuls cette tâche d'évaluation; l'enseignant effectue ensuite une correction en classe, se contentant de présenter les solutions ou les réponses et de répondre aux questions des élèves. Dans ses réponses aux questions des élèves, l'enseignant peut par ailleurs être amené à prendre position sur des solutions variées; nous savons par expérience que les élèves vont lors de la correction en groupe essayer de faire approuver par l'enseignant une solution différente de celle donnée par le maître.

Items

1. Un cylindre de verre contient une certaine quantité de gaz. Si on laisse échapper la moitié du gaz et que l'on referme le cylindre, parmi les événements suivants, lequel ou lesquels se produit ?

- a) La masse du gaz ne change pas
- b) La pression diminue de moitié
- c) Le volume du gaz diminue de moitié
- d) Le nombre de collisions augmente.
- e) Aucun changement n'aura lieu.

2. Un gaz occupe un volume de 6,80 litres à la pression de 1000 kPa. Si ce gaz occupe maintenant un volume de 40,80 litres. Comment expliques-tu ce changement ? Plus d'une solution est possible.

3. Un gaz occupe un volume de 1000 ml sous une pression de 24 kPa à une température de -45°C . Quel volume cette quantité de gaz occuperait-elle sous une pression de 40 kPa et à une température de 59°C

4. Lequel des énoncés suivants est VRAI?

- (A) Le volume molaire de l'oxygène gazeux ne varie pas selon la température, à pression constante.
- (B) Le volume molaire de l'oxygène liquide est inférieur à celui de l'oxygène solide.
- (C) Le volume molaire de l'oxygène solide est plus grand que celui de l'oxygène liquide.
- (D) Le volume molaire de l'oxygène gazeux est plus petit que celui de l'oxygène liquide.

- (E) À température constante, le volume molaire de l'oxygène gazeux est inversement proportionnel à la pression.

5. La pression exercée par des particules gazeuses sur les parois d'un contenant s'explique par :

- (A) le mouvement des molécules gazeuses;
- (B) la température du gaz;
- (C) la masse volumique du gaz;
- (D) l'espace entre les molécules gazeuses.

6. À la température de 25 °C, sous une pression de 100,0 kPa, 32 g d'un gaz A occupent un volume de 24,5 litres.

À la température de 25 °C, sous une pression de 100,0 kPa, 16 g de ce même gaz occupent un volume de 12,25 litres.

À la température de 25 °C, sous une pression de 100,0 kPa, 16 g de ce même gaz occupent un volume de 6,12 litres.

Le volume de 16 g du mélange du gaz A et du gaz B en des proportions identiques à la température de 25 °C et sous une pression de 100,0 kPa occupent un volume de 9,18 litres.

Comment expliquez-vous la différence?

Quels sont ces gaz ?

Le premier item porte sur la pression exercée par un gaz. Nous avons indiqué, lors de la sixième situation, qu'une dissociation entre cette pression et la pression atmosphérique devait être faite. Nous avons émis des doutes concernant les possibilités de la faire. Pour répondre correctement (choix B), l'élève pourra utiliser le fait qu'un volume de gaz possède lui-même sa propre pression qu'il exerce sur les parois par le mouvement de ses particules à une température donnée. Alors si on laisse échapper la moitié du volume d'un gaz, la pression sera moindre car il y aura moins de particules qui frapperont les parois du contenant.

Le second item est un problème ouvert. Pour y répondre, l'élève peut utiliser la formule qu'il a apprise sur la loi des gaz parfaits $P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2$; il peut choisir de maintenir constante la température et trouver la valeur de la pression P_2 (soit 277,4 kPa); dans ce cas, il peut lui être utile de considérer le rapport de proportion suivant: $P_1 / P_2 = V_2 / V_1$. L'élève pourrait aussi, partant de la même formule, choisir de faire varier la température; dans ce cas, la réponse sera donnée par une relation entre les températures T_1 et T_2 . Connaissant les rapports des élèves aux mathématiques et à la résolution de problèmes, rapports les amenant à privilégier presque uniquement les solutions numériques, cette seconde solution a peu de chances d'être utilisée par les élèves.

Le troisième item implique des transformations des trois paramètres. La solution suppose le recours à la loi générale sur les conduites des gaz, soit $P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2$ (réponse: 876,3 mL). L'élève devra penser à transformer les températures en Kelvin, sinon il obtiendra une valeur négative pour le deuxième volume.

Le quatrième item met en cause la notion de pression ambiante, et non celle à l'intérieur du ballon de gaz, comme c'était le cas pour le premier problème. La solution E est sûrement à la portée de la très grande majorité des élèves (voir la quatrième situation). Ce n'est pas un item qui nous plaît beaucoup, car il comporte un jeu sur les états liquide, solide et gazeux qui nous semble n'avoir d'autre fonction que celle de produire des effets bien connus de contrat. Nous l'avons choisi, malgré ces réserves, parce qu'il est similaire à plusieurs des items que l'on retrouve dans les examens usuels.

Le mouvement des particules est responsable de la pression qui s'exerce sur les parois internes d'un contenant; ce mouvement porte le nom d'énergie cinétique. En interrogeant les élèves à propos de la pression interne à l'item 5 et en suggérant diverses réponses, il nous est possible de mieux connaître leurs conceptions à ce sujet, en relation avec l'enseignement réalisé. Nous avons également offert des choix erronés, voisins des conceptions naïves mises en évidence dans les recherches que nous avons présentées au premier chapitre.

Enfin, le sixième item comporte un problème qui est en relation avec les problèmes réalisés lors de la sixième situation. Il est cependant original car il s'agit de la première fois qu'un mélange de gaz est concerné. Ce problème oblige à une généralisation des connaissances acquises lors de la sixième situation.

8. Huitième situation: examen sur la chimie des gaz parfaits

Dans les écoles secondaires, à la fin d'un enseignement spécifique, il est d'usage que les élèves subissent un examen. Cet examen s'adresse à tous les élèves d'une même année scolaire, bien que ces élèves n'aient pas tous partagé un même enseignement. Pour cette raison, nous croyons nécessaire de donner aux élèves qui participent à notre expérience d'enseignement le même examen que celui qui est prévu pour les autres élèves; nous nous sommes d'ailleurs expliquée à propos de cette décision dans notre présentation de la septième situation. Cet examen comporte des questions et des problèmes relativement comparables à ceux donnés aux élèves lors de la

situation précédente. Voici cet examen, que nous commenterons au moment de l'analyse des résultats.

1. Le volume molaire de n'importe quel gaz est le volume occupé par :

- (A) un échantillon de gaz mesuré à 0 °C et à 101,3 kPa;
- (B) un échantillon de 32 g de gaz;
- (C) un échantillon de $6,023 \times 10^{23}$ atomes de gaz;
- (D) une mole de molécules de gaz.

2. La pression de 0,200 mole d'hydrogène gazeux dans un cylindre est de 300 mm de Hg. Dans ce cylindre, à température constante, on ajoute 0,100 mole d'azote gazeux et 0,300 mole de méthane gazeux. Quelle sera la pression partielle de l'azote gazeux?

- | | |
|------------------|------------------|
| (A) 50 mm de Hg | (C) 450 mm de Hg |
| (B) 150 mm de Hg | (D) 900 mm de Hg |

3. Un cylindre d'acier relié à un manomètre est soumis aux conditions atmosphériques.

Par une très froide journée d'hiver, à -35 °C, le manomètre indique une pression de $4,0 \times 10^3$ kPa. Quelle pression le manomètre indiquera-t-il si la température atteint +25 °C?

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| (A) $2,9 \times 10^3$ kPa | (C) $5,0 \times 10^3$ kPa |
| (B) $3,9 \times 10^3$ kPa | (D) $5,6 \times 10^3$ kPa |

4. Lesquels des énoncés suivants sont EN ACCORD avec la théorie cinétique moléculaire des gaz?

1. Les gaz sont constitués de particules extrêmement petites appelées molécules.
2. Les distances entre les molécules d'un gaz sont très grandes par rapport aux dimensions des molécules.
3. Les molécules d'un gaz se déplacent toujours à la même vitesse, quelle que soit la température de ce gaz.
4. Les molécules d'un gaz sont toujours en mouvement et se déplacent en ligne droite dans toutes les directions.
5. Les molécules d'un gaz se frappent entre elles et frappent les parois du récipient.

- | | |
|---------------|---------------------|
| (A) 1, 2 et 3 | (C) 1, 2, 4 et 5 |
| (B) 3, 4 et 5 | (D) 1, 2, 3, 4 et 5 |

5. Quelle est la masse molaire de 5,4 g d'un gaz occupant un volume de 4,8 litres à 30 °C et soumis à une pression de 50 kPa?

6. Quelles sortes de mouvements moléculaires trouve-t-on :

(A) à l'état gazeux ? décrivez et faites un dessin

(B) à l'état liquide ? décrivez et faites un dessin

7. La pression du gaz à l'intérieur d'une bombe aérosol est égale à 300 kPa à la température de 293 °K. Quelle sera la pression exercée par le gaz à la température de l'eau bouillante, soit 100 °C? (Le volume de la bombe est constant.)

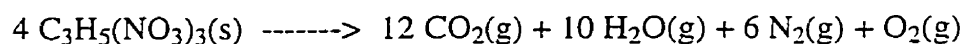
8. Énumérez les facteurs qui influencent le comportement d'un gaz.

9. Un ballon contient un mélange formé de 4 moles de dioxyde de carbone, CO₂, et de 1 mole de krypton, Kr, gazeux. Si la pression totale du mélange est de 76 kPa, quelle est la pression partielle exercée par le krypton?

10. Combien de moles de gaz méthane, CH₄, occuperont un volume de 500 ml à la température de 25 °C et à la pression de référence (101 kPa)?

11. Si 10 ml de dioxygène prennent 30 minutes pour diffuser par une petite ouverture, quel temps prendrait le même volume de dihydrogène pour passer par cette ouverture?

12. La nitroglycérine, un explosif, se décompose selon l'équation :



A) Calcule le volume total des gaz produits à 120 kPa et à 25 °C à partir de 2,2 x 10² g de nitroglycérine.

B) Quelle est la pression partielle de chacun des gaz produits à ces conditions?

13. Classe les gaz suivants par ordre décroissant de la vitesse de diffusion :
CH₄, HCl, NO, PH₃, et Ne.

14. Un échantillon de 4,6 moles de difluor gazeux est présent dans un contenant de 27,4 litres. Quelle est la pression du gaz si la température est de 104 °C?

15. Trois moles d'un gaz X à 20 °C occupent un volume V₁ tout en exerçant une pression P₁. À quelle température doit-on amener le gaz si la pression triple, que le volume diminue de moitié et que l'on ajoute quatre autres moles de gaz?

16. À une pression de 150 kPa et à une température de 30 °C, une certaine quantité de dihydrogène gazeux occupe un volume de 85,0 mL. Quel sera le volume de la même quantité de dihydrogène mesurée à 250 kPa et à -10 °C?

DÉROULEMENT DE L'EXPÉRIMENTATION ET MÉTHODES D'ANALYSE DES DONNÉES

L'expérimentation de la séquence d'enseignement est effectuée à l'intérieur de la grille horaire de l'école. On doit compter sur 8 périodes d'enseignement de 75 minutes chacune. En tenant compte de la grille horaire, l'expérimentation s'étale sur une période de 3 semaines environ.

Dès le début de l'enseignement de la chimie des gaz, nous annonçons aux élèves que l'enseignement qui leur sera donné sera l'objet d'une recherche ayant pour but de mieux comprendre comment les notions de chimie peuvent être enseignées. Nous les informons aussi que, avec leur approbation, les diverses leçons données seront enregistrées sur ruban magnétoscopique afin de pouvoir par la suite mieux analyser l'enseignement. Nous leur disons enfin que les résultats de ce travail, s'ils sont publiés, préserveront l'anonymat de chacun des élèves. Enfin, nous les rassurons sur les retombées scolaires de cet enseignement, en leur disant que le contenu de cet enseignement sera celui donné aux autres classes et qu'ils auront les mêmes examens que les élèves de ces autres classes.

Les données recueillies au moment de l'expérimentation sont constituées des transcriptions des enregistrements vidéo, de l'ensemble des calculs, des graphiques et des commentaires effectués par les élèves lors de la réalisation des tâches que comportent les situations et des observations consignées par la chercheure après chacune des périodes d'enseignement.

L'analyse des données est réalisée selon la méthodologie usuelle d'analyse a posteriori définie par Artigue (1988). La confrontation des analyses a priori et a posteriori permet d'évaluer la pertinence des situations d'enseignement et en particulier, des situations de modélisation mathématique qui ont été construites, en regard des hypothèses et des objectifs de notre recherche. L'analyse des interactions didactiques, enseignante-élèves-situations, constitue l'outil privilégié pour effectuer l'analyse a posteriori (Brun et Conne, 1990).

Dans la première section de ce chapitre, nous avons identifié certains avantages mais également certains risques liés à notre position duale dans l'expérimentation et l'analyse des données de notre recherche, étant à la fois la chercheure et l'enseignante. Pour minimiser ces risques et pour accroître notre compréhension des données de la recherche, en relation avec les objectifs poursuivis, nous avons convenu que l'auteure de cette thèse et la directrice de recherche

effectueront indépendamment une analyse de l'ensemble des données et mettront ensuite en commun les résultats de cette analyse.

CHAPITRE IV
ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Au chapitre précédent sur la méthodologie, nous avons présenté et analysé les situations d'enseignement de la chimie des gaz parfaits que nous avons construites et expérimentées en classe. Ces situations devaient engager les élèves dans un processus de modélisation mathématique des conduites des gaz et plus précisément, des relations entre la pression, le volume et la température des gaz (lois de Boyle-Mariotte et de Gay-Lussac). L'engagement des élèves dans un tel processus, selon les hypothèses de notre recherche, devait entraîner une évolution des conceptions naïves et des connaissances mathématiques des élèves leur permettant de construire des connaissances plus adéquates en relation aux objets du savoir sur les lois des gaz parfaits et d'entrer dans une pratique scientifique.

L'analyse a posteriori de ces situations et la confrontation de cette analyse avec l'analyse a priori de ces situations que nous réalisons dans ce chapitre permettent d'éprouver la pertinence des analyses a priori et de caractériser, selon les objectifs spécifiques de notre recherche, les situations qui concourent à l'évolution chez les élèves des connaissances scientifiques et mathématiques impliquées dans la chimie des gaz parfaits et qui leur permettent une entrée dans une pratique scientifique.

Dans la conduite de cette analyse, nous procédons en deux temps. Dans un premier temps, nous examinons les interactions didactiques (enseignante-élèves-situation) dans le déroulement de chacune des situations; cet examen nous permet d'éprouver la pertinence des analyses a priori et de mettre en évidence certaines caractéristiques clés ou au contraire, discutables de ces situations. Dans un second temps, nous effectuons une synthèse et une interprétation des résultats de notre recherche.

ANALYSE DES INTERACTIONS DIDACTIQUES DANS LE DÉROULEMENT DE CHACUNE DES SITUATIONS

Pour pouvoir nous prononcer sur la pertinence des analyses a priori des situations de notre séquence réalisées en regard des hypothèses et des objectifs de notre recherche, nous procédons à l'analyse des interactions didactiques dans le déroulement de chacune des situations. Dans cette

analyse, nous serons amenée à discuter des choix que nous avons faits dans la construction de ces situations, à identifier les choix heureux et aussi, les choix discutables, voire néfastes.

La première situation: révision des connaissances en chimie

Selon les pratiques usuelles à l'école, une période de révision est toujours effectuée afin de mettre en évidence certaines des connaissances qui seront utilisées au cours de l'enseignement visé. L'analyse des données recueillies lors de la première situation, étant donné la nature de cette situation, permet surtout de dresser un portrait des connaissances des élèves. Les interactions didactiques dans cette situation sont peu nombreuses.

Nous reproduisons le questionnaire qui a été distribué aux élèves. Le travail de révision a été effectué selon l'organisation décrite dans le chapitre précédent: travail individuel sur chacune des questions pendant 15 minutes, retour en équipe de deux élèves sur les premières réponses données par chacun, correction en groupe de l'ensemble des réponses.

Questions:

1. Selon l'hypothèse d'Avogadro, des volumes égaux de gaz différents contiennent, dans les mêmes conditions de température et de pression, le même nombre de molécules.

a) Quelle est la différence entre mole et molécule?

b) Quelle est la différence entre mole de molécules et mole d'atomes?

c) Combien y a-t-il de moles d'atomes dans

1. 24 g de C?
2. 27 g de Al?
3. 100 g de Al?
4. 100 g de Ag?

d) Dans 117 g de NaCl, il y a

1. _____ moles de molécules de NaCl
2. _____ moles d'atomes de Na
3. _____ moles d'atomes de Cl

e) Dans 684 g de $C_{12}H_{22}O_{11}$ il y a:

1. _____ moles de molécules $C_{12}H_{22}O_{11}$
2. _____ moles d'atomes de C
3. _____ moles d'atomes de H
4. _____ moles d'atomes de O

f) Combien de molécules y a-t-il dans :

1. 16 g de O_2 _____
2. 68 g de NH_3 _____
3. 100 g de $C_{12}H_{22}O_{11}$ _____

g) Quelle est la masse molaire des molécules suivantes:

1. Gaz carbonique CO_2 _____

2. Méthane CH_4 _____

3. Octane C_8H_{18} _____

2. Calcul du volume molaire

a) Une mole de molécules de n'importe quel gaz occupe donc à T.P.N. le même volume. Quel est ce volume ?

b) Un litre d'oxygène à T.P.N. a une masse de 1,43 g. La masse molaire moléculaire de O_2 est de 32,0 g/mol

1. Quel est son volume _____

2. Qu'entend-on par pression normale _____

3. Quelle est la masse de 44,8 L de CO_2 à T.P.N. _____

4. Température normale _____

5. Pression normale _____

6. Température ambiante _____

Le tableau 5 présente les performances des élèves à chacune des questions du questionnaire de révision. Pour chacun des items de chacune des questions, les nombres d'élèves qui réussissent et qui échouent sont indiqués.

Comme le montre le tableau 5, la grande majorité des élèves réussit à répondre correctement aux questions. A la question 1a, près de la moitié des élèves ne sait toutefois établir la distinction entre mole et molécule; lors du travail en équipe ou encore, lors de la correction de l'épreuve, la plupart de ces élèves disent qu'ils savaient que le nombre d'Avogadro était un élément impliqué dans la réponse, mais ne pouvaient le rappeler ou encore, ne savaient comment l'utiliser.

Tableau 5

**Performances des élèves à l'épreuve de révision
des connaissances en chimie**

Questions	Réussies	Non réussies
1 a	14	10
1b	19	5
1c	18	6
1d	21	3
1e	24	0
1f	21	3
1g	20	4
2a	0	24
2b 1	19	6
2b 2	24	0
2b 3	24	0
2b 4	24	0
2b 5	23	1
2b 6	22	2

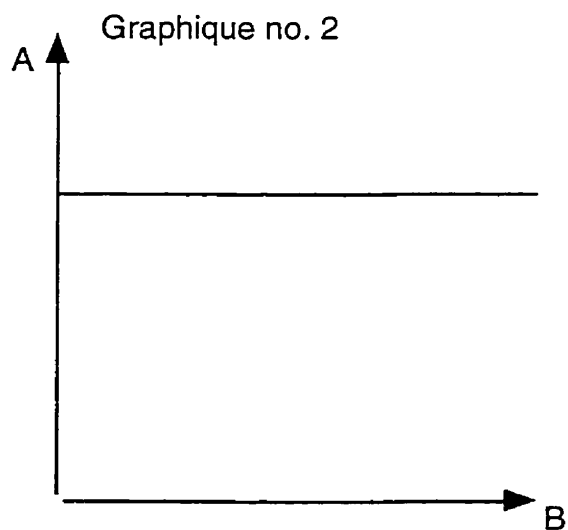
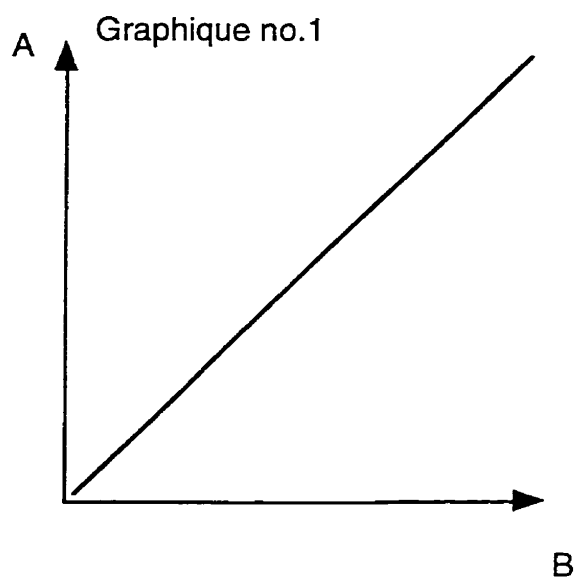
Aux numéros 1c, 1d et 1f, les réponses erronées sont attribuables soit à une confusion entre la masse et le numéro atomique dans la lecture du tableau périodique, soit à l'application incorrecte de la règle de trois (ex: 1d et 1f), soit pour la question 1f, à une non considération de la nature diatomique de la molécule d'oxygène.

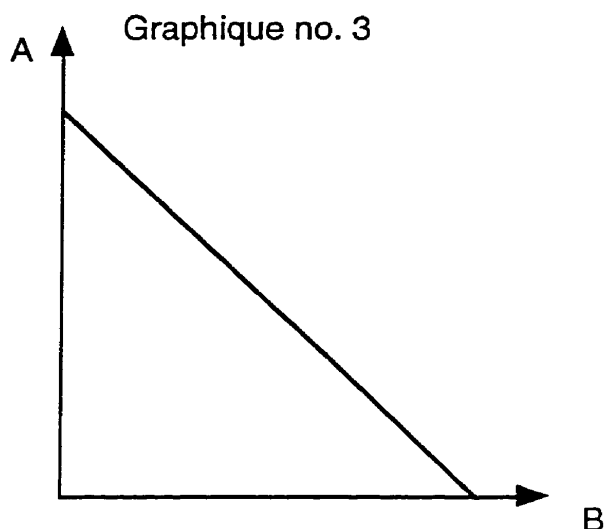
Aucun élève n'a pu répondre correctement à la question 2a et ainsi effectuer les calculs requis pour les questions suivantes. Face à un tel événement, l'enseignante leur a fourni la réponse à cette question, ce qui leur a permis de répondre correctement aux autres questions.

Lors de la correction en groupe de l'ensemble de l'épreuve, l'enseignante a invité les élèves à reformuler certaines définitions (ex: définitions de mole, de molécule, de température et de pression normale) et au besoin, a rappelé les définitions du manuel. Elle a demandé à chacun de prendre en

note ces définitions. Cette période a été aussi l'occasion de réexaminer avec le groupe les notions de masse molaire, de numéro atomique, de nombre d'Avogadro et ainsi, d'effectuer une lecture instruite du tableau périodique.

Dans la seconde partie de cette situation de révision, les élèves devaient préciser la relation entre les variables dans chacun des graphiques suivants:





Tous les élèves ont identifié correctement la relation entre les variables dans chacun des graphiques, en utilisant un vocabulaire approprié: relation directement proportionnelle, relation inversement proportionnelle, relation constante. Aucun n'a été cependant en mesure de produire l'écriture mathématique de ces relations. Ce résultat est pour le moins inattendu. En effet, ces élèves ont eu l'occasion, à maintes reprises, dans les cours de mathématiques précédents, de décrire des relations, de définir l'équation de la droite ou la fonction affine. Devant cet événement, l'enseignante a produit des graphiques similaires avec des valeurs numériques, a repris les questions et a demandé de produire une écriture mathématique ou une équation de la droite pour chacun des graphiques. Quelques élèves seulement y sont parvenus. L'enseignante leur a demandé de présenter au groupe leurs écritures, de les expliquer; elle a décidé de ne pas enseigner davantage comptant sur les situations ultérieures pour examiner à nouveau ces relations. Il est enfin intéressant de noter qu'au cours de l'examen de ces graphiques, plusieurs élèves ont témoigné de leur réticence à faire des mathématiques en sciences.

La deuxième situation: l'expérience initiale en laboratoire

Comme nous l'avons décrit au chapitre précédent, la situation 2 inclut deux montages expérimentaux montrant la transformation du volume d'un gaz en regard de la transformation de la température, la pression étant constante. Lors de l'analyse de cette situation, les choix effectués ont été précisés et justifiés. Il s'agit maintenant d'examiner la pertinence de ces choix et, à la lumière de cet examen, d'indiquer s'il y a lieu les modifications souhaitables de cette situation.

1. L'entrée des élèves dans la situation: les mesures expérimentales prises

L'enseignante a inscrit au tableau la pression atmosphérique, soit 101,3 kPa, et a démarré les plaques chauffantes pour chacun des montages. Elle a informé les élèves qu'ils devaient recueillir des informations sur l'expérience, afin d'expliquer les phénomènes qui surviennent au cours de cette expérience; elle leur a dit également qu'il leur était possible de trouver des explications et qu'ils pouvaient même trouver une formule ou une loi mathématique qui explique les phénomènes. Sur le bureau où sont placés les montages se trouvaient les instruments suivants: des thermomètres, des rubans à mesurer, de la ficelle, des chronomètres.

Après une courte période d'attente et d'observation des montages, comme nous l'avions prévu dans notre analyse initiale, les élèves sortent papiers et crayons, effectuent des mesures à l'aide des instruments mis à leur disposition et inscrivent ces informations. Les élèves sont familiers avec les manipulations de laboratoire. En effet, dans le cours de sciences physiques 436 qu'ils ont suivi l'année précédente, ils ont eu plusieurs séances en laboratoire. De plus, dans le cours sur la technologie et la méthodologie scientifique qu'ils suivent au moment où se déroule cette expérience (T.M.S. 532), les élèves ont eu à faire au cours de la semaine précédant cette leçon, un laboratoire où ils ont identifié le point d'ébullition de trois substances différentes, en prenant des mesures de la température à toutes les 30 secondes. La décision de ne pas intervenir en spécifiant comment prendre les informations a donc été sage. Nous verrons par la suite comment l'organisation de la prise des mesures, leur inscription sur papier et enfin leur représentation agissent sur la modélisation mathématique qu'ils produisent durant cette situation.

2. Les conceptions spontanées et naïves des phénomènes chez les élèves, les interactions didactiques qu'elles suscitent et leur pertinence dans la recherche des facteurs à considérer pour trouver une formule expliquant les conduites du gaz

Lors des chapitres précédents, nous avons à plusieurs reprises indiqué comment il nous semblait important de concevoir des situations d'enseignement en sciences qui permettent l'émergence de conceptions spontanées et naïves des phénomènes étudiés. Ces conceptions sont souvent durables et ont peu de chance d'être vérifiées ou infirmées dans les dispositifs usuels d'enseignement. En nous abstenant de fournir des indications sur les informations à prendre durant l'expérience et en invitant les élèves à trouver des explications des phénomènes, nous espérons que les élèves puissent formuler diverses explications, empreintes de conceptions naïves; nous espérons également que la situation leur permettrait de vérifier certaines de ces explications. Contentons-

nous de relever pour le moment les explications relevant de conceptions naïves formulées par les élèves.

Plusieurs des explications fournies par les élèves sont imprégnées de conceptions naïves rappelant celles qui sont relevées dans les études sur les conceptions des gaz chez les élèves (Serré et Moppert; 1989; Thouin, 1996; Stavy, 1988, 1991, 1995) et dans celles sur l'évolution historique des conceptions sur les gaz et la chaleur (Astolfi et Develay, 1989; Bauer, 1907; Koyré, 1973; Lockemann, 1959; Serres, 1989). L'augmentation du volume du ballon est expliquée de diverses manières par les élèves; nous reproduisons certaines de ces explications et montrons comment ces explications sont examinées et reprises par les élèves, d'abord, puis par l'enseignante, ensuite. Nous commentons également ces explications (dans la reproduction d'extraits d'interactions, les élèves sont identifiés par la lettre E suivi d'un nombre; l'enseignante est identifiée par le terme Ens).

E1 et E2: les molécules dans le ballon bougent plus vite; donc elles ont besoin de plus de place.

E4: le ballon se gonfle parce que le gaz qui est dans le ballon prend plus de place; les atomes se tassent.

E5: c'est la dilatation du caoutchouc qui fait éclater le ballon; c'est aussi le gaz mais pas les chocs un autre agent, j pense pas que les chocs entre les molécules feraient exploser ce ballon; ce ballon n'a pas assez de gaz pour exploser.

Il est important de souligner que les élèves n'ont reçu aucune notion sur les différents mouvements des molécules associés aux différents états de la matière. Ils ne peuvent identifier ni le mouvement, ni même affirmer qu'il est variable; cependant ils ont la certitude qu'il y a un mouvement et que les molécules qui constituent le gaz prennent plus d'espace lorsque la température augmente. Les idées qu'ils émettent spontanément ne sont pas ainsi sans relation avec l'énergie cinétique des molécules associée à la température ou encore, au mouvement des particules associé à la température. A ce propos, les élèves E2 et E7 croient qu'une fois atteint le point d'ébullition de l'eau, la température de l'eau n'augmente plus, comme si l'état énergétique des particules se limitait à celui qu'on retrouve au point d'ébullition. Le point d'ébullition représente pour eux un état énergétique maximal, un état à atteindre suivi d'une certaine stabilité.

Ces diverses conceptions montrent bien comment les visions substantialistes et mécanistes de la matière orientent tour à tour les explications. Ainsi, pour bouger plus vite, les molécules ont besoin de plus d'espace (E1 et E2); cet espace peut être aussi obtenu par le fait que les atomes se tassent (E4) .

L'enseignant reprend certaines des explications des élèves en formulant quelques questions; nous reproduisons un extrait du dialogue enseignant-élèves.

Ens: Et si le ballon continue à se réchauffer, pensez-vous que les molécules continuent à bouger plus vite?

Plusieurs élèves: Oui... Non ...

E2: Nous avons découvert quelque chose de nouveau, nous posons une question fondamentale, la température a atteint 100 °C, elle n'augmentera probablement pas.

E7: nous autres on pense que le ballon augmente de volume, la température de l'eau a atteint 100 °C, le montage n'est pas isolé, le ballon va pas gonfler, le volume n'augmente pas.

L'intervention de l'élève E7 amène certains élèves à se pencher sur les causes d'erreur du montage; certains élèves citent même les correctifs nécessaires à l'amélioration du rendement. Cette façon de faire leur est habituelle car à chaque rapport de laboratoire qu'ils ont à rédiger, ils doivent mentionner quelles sont les causes d'erreur et indiquer comment corriger la situation. Ce travail vise, selon le plan de cours, à vérifier la compréhension de l'élève face aux objectifs du cours. Ce relevé des améliorations à apporter est fait en relation avec les questions précédentes, comme le montrent les propos suivants:

E6: La chaleur (de l'eau) fait augmenter la température du ballon et le volume augmente... un peu.

E8: Il faut changer le montage; un chapeau sur le ballon, sans eau juste l'air qui se réchauffe.

E13: Si on isole le bécher, la température augmente encore et toute la chaleur ira au ballon.

E7: Le ballon ne va pas chauffer plus comme c'est pas isolé la chaleur s'en va tout le temps.

E10: s'il n'y a pas de perte plus c'est chaud plus le ballon monte.

Cet examen amène des élèves à faire la distinction entre la pression externe et la pression interne du ballon et à s'interroger sur l'effet de la variation de la pression interne. L'enseignante précise à ce moment que la pression utilisée dans notre expérience est la pression extérieure au ballon, en mentionnant qu'il est plus facile de mesurer la pression des gaz à l'extérieur du montage et en leur disant également qu'il faut bien garder en tête qu'il existe une pression interne au ballon.

Les élèves se consultent et discutent des variables impliquées dans le montage. L'élève E14 verbalise alors la relation entre la pression interne dans le ballon et la pression atmosphérique et décrit, sous quelles conditions, on peut les faire varier. Cet élève est aussi en mesure d'évaluer le poids d'une variable par rapport aux deux autres et d'en prédire les conséquences à court et moyen termes. Voici un extrait des interactions de l'enseignante avec cet élève:

Ens: tu dis qu'il y a deux pressions, une extérieure, une intérieure selon toi, laquelle est la plus forte?

E14: c'est comme s'il y avait équilibre entre les deux.

E14: le volume augmente parce qu'il y a un déséquilibre entre les deux pressions.

Ens: qu'est-ce qui ferait rompre l'équilibre?

E14: la température est constante, le volume est constant.

Ens: le volume et la température sont reliés, c'est ce que tu as trouvé avant? Que vient faire la pression là-dedans?

E14: tu laisses les deux facteurs stables; seulement la pression dans ces conditions peut faire varier le volume du ballon.

La conduite de cet élève est assez exceptionnelle. L'enseignante invite cet élève à informer les autres de son raisonnement. Cette information n'entraînant pas de réaction des autres élèves, l'enseignante décide de ne pas y donner suite.

Plusieurs élèves ont exprimé l'idée d'un éclatement du ballon, si la pression monte trop. L'enseignante formule cette idée et en débat avec le groupe d'élèves. Voici un court extrait de ce débat:

Ens: tout à l'heure, des élèves m'ont dit que le ballon pourrait éclater. Quelle serait selon vous la cause du bris de la paroi du ballon?

E1: trop d'expansion des molécules de gaz dans le ballon.

E18: c'est la dilatation thermique.

E3, E4, E7, E8: oui c'est ça.

La notion de dilatation thermique a été enseignée en quatrième secondaire dans un cours de sciences physiques 436; elle a surtout été appliquée à l'étude des propriétés des métaux. Les élèves utilisent les notions qu'ils ont acquises à ce sujet, en les décontextualisant -pourrions-nous dire d'une façon opportuniste- pour rendre compte d'un phénomène. Plusieurs de ces idées peuvent supporter le travail de construction de la loi sur les gaz. Le problème pour l'enseignement est alors de trouver des situations qui peuvent amener un rejet ou encore, une transformation de ces idées. La situation 2 ne peut seule permettre de régler ce problème. La relation de proportionnalité entre la température et le volume du gaz, objet de savoir dans cette situation, s'accommode de plusieurs de ces idées.

3. Le passage d'une explication verbale des relations entre la température et le volume à une modélisation mathématique de ces relations

A l'analyse de la situation, nous avons pensé que les interactions à propos des conceptions des phénomènes observés serviraient de tremplin pour l'identification des facteurs impliqués dans ces phénomènes. Nous avons vu précédemment que les explications des élèves se concentrent rapidement sur l'effet de l'augmentation de la température sur le volume du ballon, du gaz dans le ballon; notre analyse apparaît ainsi pertinente. L'examen de ces explications effectué, l'enseignante oriente les élèves vers la construction d'une modélisation mathématique des relations entre ces paramètres. Les questions suivantes sont alors posées par l'enseignante: Y a-t-il une relation mathématique entre la température, le volume et la pression du gaz? Pouvez-vous avec les données que vous avez inscrites sur vos feuilles écrire cette relation? Pouvez-vous trouver une loi ou une formule mathématique qui montre cette relation et qui permette de calculer le volume ou la température du gaz, connaissant la valeur de l'une de ces variables?

Pour mieux apprécier les réponses des élèves, nous présentons au tableau suivant les divers types de données enregistrées par chacune des équipes, ainsi que les écritures produites en réponse aux questions précédentes. Les rubriques de ce tableau sont les suivantes: a) équipes: identification des élèves ; b) nombre de mesures prises durant l'expérience; c) intervalles temporels entre les prises de mesures, soit réguliers (Reg), soit non réguliers (Non-Reg); d) organisation des données en tableau ou en graphique; e) explication du phénomène: explication discursive adéquate (Ad) ou inadéquate (Inad); explications à l'aide d'écritures mathématiques (Ec. Math) adéquates (Ad) ou inadéquates (Inad).

Tableau 6

Les données expérimentales consignées par chacune des équipes et les explications du phénomène

Équipes	Nombre d e mesures prises	Intervalles temporels		Organisation des données		Explications du phénomène			
		Reg	Non-Reg	Tableau	Graphique	Discours		Ec. Math	
						Ad	Inad	Ad	Inad
E7-E21	2		X			X			X
E8,E9	3	X				X			X
E22,E23	6	X				X			X
E16,E24	9	X		X		X		X	
E1,E2	3	X				X			X
E5,E6	6	X				X			X
E12,E19	6	X				X		X	
E14,E20	2		X			X			X
E13,E25	2		X			X			X
E10,E11	2		X			X			X
E3,E4	4	X				X		X	
E15,E17	2		X		X	X			X

A l'examen des données qu'ils ont consignées sur leurs feuilles, tous les élèves en viennent rapidement à dire que la température et le volume varient proportionnellement, comme en fait état le

tableau 6 (Explications du phénomène: discours adéquat); cependant, comme nous le verrons plus loin, l'expression de cette proportionnalité dans un discours n'implique pas nécessairement une expression de cette relation dans une écriture mathématique adéquate.

Quant au rôle de la pression dans l'explication des phénomènes, il est sans doute plus difficile à cerner, comme nous l'avons vu antérieurement. Les élèves disposent de la pression atmosphérique qui est stable et évidemment, on ne peut mesurer la pression interne du ballon de baudruche; la seule manifestation de la variation de cette pression est le gonflement du ballon qui, comme l'a souligné l'élève E14, représente un déséquilibre entre la pression atmosphérique et la pression interne du ballon. Les élèves peuvent alors mesurer l'augmentation de la circonférence du ballon; cette information nourrit la variable volume, mais en aucun temps les élèves ne disposent de valeurs numériques concernant la pression avec lesquelles ils pourraient vérifier l'évolution de la situation et faire des liens avec les autres variables, ce qui complique quelque peu l'évolution de la pensée des élèves ou de leurs explications et conceptions des phénomènes.

Les difficultés concernant l'identification du rôle de la pression dans l'explication des phénomènes étudiés ne sont toutefois pas les seules que rencontrent les élèves. Ainsi, 7 équipes d'élèves ne partagent pas le même point de vue vis-à-vis de la pertinence de considérer le temps comme une variable importante (voir dans le tableau 6, les entrées sous la rubrique "Intervalles temporels Rég"); il convient de dire que la variable temps est une variable généralement considérée dans d'autres situations expérimentales. Rejeter le temps comme facteur leur apparaît ainsi contraire à des habitudes de classes en sciences. Mais, pour décider de conserver les mesures de temps, il faut savoir quoi en faire, trouver une interprétation valable dans la situation. Après une courte discussion entre les élèves, l'enseignante leur demande de faire appel au groupe pour avancer. Les élèves exposent ainsi leur problème. Après échange avec le groupe, seulement un élève (E15) insiste pour conserver le temps, proposant d'exprimer le gain de volume du ballon en fonction du temps. Nous donnons un aperçu de la discussion concernant le facteur temps, mais aussi les autres facteurs:

E2: le volume, la température et la pression sont les facteurs qui comptent.

E12: le rapport température et volume, plus la température augmente plus le volume augmente à l'infini, ici l'eau est limitée.

E7: Je dirais le temps, la température, le volume, le ballon.

E2: le temps sert à rien.

E4: qu'est-ce qu'on garde.

E1: Le volume est important donc le temps n'a pas d'importance; il faut prendre le volume, la pression, la température.

E15: pour regarder le grossissement du ballon par rapport au temps (Il est nécessaire d'ajouter que l'élève E15 a tracé un graphique représentant le grossissement du ballon en fonction du temps; il obtient une droite affine qui atteint après un certain temps un plateau).

E16 et E17: si la température monte, le ballon se gonfle, le ballon plus il y a de l'énergie plus il gonfle.

Tous les élèves, sauf E15 qui ajoute en plus le temps, s'entendent donc sur les facteurs à considérer, soit le volume, la température et la pression. Puisque la pression externe est maintenue constante, il leur faut exprimer la relation entre la température et la pression par une écriture mathématique. Si la majorité des élèves parle de relation proportionnelle entre les variations de la température et du volume, cela ne suppose pas nécessairement qu'ils peuvent écrire mathématiquement cette relation, ni qu'ils disposent de données suffisantes pour justifier une telle relation. Dans l'analyse de notre situation, nous avons décidé de ne pas intervenir ni dans l'organisation de la prise des données, ni dans l'inscription et la représentation de ces données, toute intervention nous apparaissant transformer la situation que nous souhaitons voir fonctionner sur un mode a-didactique, impliquant un engagement cognitif des élèves dans un processus d'adaptation et de coordination des connaissances et une responsabilité des élèves face aux décisions qu'ils prennent et qui ne dépendent pas des interventions de l'enseignante (Berthelot et Salin, 1992). Cette décision a possiblement privé les élèves de plusieurs mesures utiles pour établir les relations entre les variations de température et de volume. Toutefois, il faut admettre qu'il n'était pas simple d'intervenir sans donner simultanément des indications sur les conduites attendues, sans modifier le contrat didactique (Brousseau, 1996).

L'ensemble des 12 équipes verbalise clairement la relation entre le volume et la température; ce ne sont cependant pas toutes les équipes qui parviennent à une écriture mathématique adéquate de cette relation. Seulement trois équipes sur douze produisent une écriture mathématique adéquate, comme le montre le tableau 6 ($V/T = k$). Quatre autres équipes proposent l'égalité $V = T$ (E13-E25; E8-E9; E7-E21); il est possible que pour ces élèves une relation proportionnelle se représente par une

droite bissectrice du premier quadrant du plan cartésien (la pente étant 1). L'équipe formée des élèves E1 et E2 produit l'équation $V = T/P$; ces élèves ne se situent pas pour autant dans un modèle de proportionnalité, le coefficient de proportionnalité n'étant pas calculé. L'écriture de cette équipe renvoie aux conceptions qu'ils ont exprimées antérieurement: le volume augmente avec la température et augmente aussi si la pression diminue. L'écriture nous semble donc montrer autrement les conceptions sur les phénomènes. Dans une autre équipe, l'élève E5 écrit deux équations: $V = T$ et $P = V$, voulant possiblement par cette écriture montrer que deux facteurs peuvent intervenir sur le volume; il s'agit d'une idée comparable à celle exprimée par les élèves E1 et E2.

La majorité des élèves accorde enfin peu d'importance à l'organisation des données. Seulement deux équipes ont semblé préoccupées par la présentation de leurs données; une équipe les a présentées sous la forme de tableau et une autre, sous la forme d'un graphique dans lequel les axes étaient bien identifiés. Aucune de ces équipes n'a toutefois réussi à exprimer par une écriture mathématique convenable la relation entre les variables, comme le montre le tableau 6.

Comment interpréter l'échec des élèves à produire une formule mathématique qui rend compte adéquatement de la relation de proportionnalité entre les variations des mesures? S'agit-il de connaissances ou de savoirs insatisfaisants sur la proportionnalité permettant d'organiser l'analyse des mesures? S'agit-il d'insuffisances de la situation?

4. Analyse critique de cette situation

Lors des chapitres précédents, nous avons à plusieurs reprises indiqué comment il nous semblait important de concevoir des situations d'enseignement en sciences qui permettent l'émergence de conceptions spontanées et naïves des phénomènes étudiés. Ces conceptions sont souvent durables et ont peu de chance d'être vérifiées ou infirmées dans les dispositifs usuels d'enseignement. En nous abstenant de fournir des indications sur les informations à prendre durant l'expérience et en invitant les élèves à trouver des explications des phénomènes, nous espérons que les élèves formuleraient diverses explications, empreintes de conceptions naïves; nous espérons également que la situation leur permettrait de mettre à l'épreuve certaines de ces conceptions, de construire d'autres explications de ces phénomènes, de retenir l'idée majeure de rapport de proportionnalité entre les variations de température, de volume et de pression et enfin d'effectuer une modélisation mathématique de ce rapport.

Si la situation, comme nous l'avons vu, a satisfait aux premières attentes concernant les conceptions, elle a échoué dans sa tentative d'amener les élèves à une première modélisation mathématique du rapport de proportionnalité. Bien sûr, on peut invoquer un défaut des connaissances et savoirs mathématiques sur la proportionnalité; mais cela n'est pas satisfaisant ni suffisant. En effet, demander aux élèves de formuler mathématiquement la relation entre les mesures n'était pas suffisant; les élèves ont répondu à cette demande en produisant des écritures mathématiques remplissant davantage une fonction de traduction d'idées sur les relations qu'une fonction de modélisation des conduites des gaz. On aurait pu demander aux élèves de trouver un calcul qui permette d'identifier, pour une température donnée, la valeur de la mesure du volume du ballon. Ainsi, on aurait pu arrêter l'expérience et demander aux élèves de faire une prévision; les élèves auraient pu par la suite valider eux-mêmes leurs solutions ou encore, reprendre leurs prévisions, leurs calculs.

Selon la théorie des situations didactiques définie par Brousseau (1986), une situation peut fonctionner sur un mode a-didactique si elle permet à l'élève de s'engager dans une solution au problème posé, de savoir qu'il peut trouver une solution par lui-même et pouvoir aussi lui-même évaluer la pertinence de sa solution. Dans notre situation, l'élève peut avoir le sentiment qu'il a répondu aux attentes du maître, mais il n'a pas de problème à résoudre, aucune mesure à calculer.

L'enseignante a bien saisi le défaut de la situation, puisqu'elle a résisté à la tentation de donner la solution. Dans ce sens, elle n'a pas brûlé la possibilité de faire jouer une autre situation; la situation 3 est cette autre situation.

Pour conclure, on peut dire que la situation a permis aux élèves de construire des explications premières des phénomènes, d'identifier les paramètres impliqués et d'établir grossièrement une relation entre ces paramètres.

La troisième situation: la modélisation mathématique des relations entre la température et le volume d'un gaz, la pression étant constante

La troisième situation débute par un rappel et une discussion des explications des phénomènes observés lors de la seconde situation. L'enseignante inscrit les explications des élèves au tableau et les invite à se prononcer sur la pertinence de ces explications. Après quelques minutes, les élèves s'entendent pour rejeter certains des énoncés; ainsi, l'écriture $V = T$ et l'affirmation «le volume augmente comme la température» sont éliminées. Les élèves E1 et E2 soutiennent l'idée suivante: «le volume dépend de la température uniquement parce que la pression ne change pas»; pour

exprimer cette idée, ils écrivent « $V = T/P$ ». L'enseignante demande aux élèves s'ils peuvent vérifier cette proposition en utilisant leurs données, mais aucun élève n'effectue de calculs à partir de cette formule. Certains élèves veulent reprendre l'expérience de la situation 2 pour vérifier. L'enseignante introduit alors le tableau suivant montrant les variations de la température d'un gaz en °C et du volume de ce gaz exprimé en litres; elle rappelle que ces données ont été prises lors d'une expérience similaire à celle qui a été faite lors de la seconde situation, en spécifiant qu'il s'agit de données plus précises qu'ils pourront plus facilement traiter pour vérifier leurs formules et leurs explications. Comme le montre ce tableau, les écarts entre les mesures de température sont constants, ce qui devrait faciliter l'identification des relations de proportionnalité.

Tableau 7

Variations du volume et de la température d'un gaz

La pression atmosphérique est fixée à 1 atm.

Température °C	Volume L (bombe de gaz)
300	2,49
250	2,01
200	1,37
50	1,18
0	1,00
-50	0,87
-100	0,76
-150	0,64
-200	0,51

L'enseignante les invite à identifier la relation entre les mesures des volumes et des températures; elle leur rappelle que pour trouver cette relation, ils disposent de plusieurs moyens et qu'il leur appartient de les choisir. Elle inscrit ensuite au tableau les questions suivantes:

1. Trouver les volumes correspondant aux températures suivantes:

- a) -35 °C
- b) 180 °C
- c) -57 °C

2. Trouver la température à partir des volumes suivants:

- a) 1,5 L
- b) 0,95 L
- c) 0,55 L

3. Pouvez-vous formuler une équation de la forme $A @ B = k$ pour montrer la relation entre la température et le volume du gaz (le symbole @ désigne une opération).

Le tableau 8 résume les conduites des élèves dans la modélisation de la relation entre la température et le volume. Nous distinguons ainsi divers procédés: a) calculs numériques (ex: le produit de mesures de volume et de température : $V \times T$); b) graphiques (ex: V p T : V en ordonnée et T en abscisse (la lettre p remplace le symbole de proportionnalité que nous n'avons pu produire avec le logiciel à notre disposition); P_t à P_t : chacun des points est relié); c) identification de la relation entre les paramètres: calcul du coefficient de proportionnalité ($V/T = k$); équation de la droite (une seule équation a été calculée; elle est indiquée dans le tableau).

Tableau 8

Procédés utilisés par les élèves dans l'identification de la relation entre le volume et la pression

Équipes	Calculs numériques $V + T$, $V - T$, $V \times T$, V/T	Graphiques V p T , T p V , P_t à P_t , droite	Identification de la relation $V/T = k$ Équation d'une droite $V = 0,004T + 0,092$
E7,E21		X X	
E8,E9	X	X X	X
E22,E23	X		X
E16,E24	X		X
E1,E2	X X X	X X	X
E5,E6	X		X
E12,E19	X		X
E14,E20	X X	X X	X
E13,E25	X		X
E10,E11	X	X X	X
E3,E4	X	X X	X
E15,E17	X	X X	X X

1. Le couplage calcul-graphique dans la construction du rapport de proportionnalité

Il avait été prévu que l'enseignante, dans sa consigne initiale, indique aux élèves qu'ils peuvent faire des calculs et des graphiques. Au moment de l'enseignement, l'enseignante décide de ne pas préciser de moyens, faisant l'hypothèse que la culture scolaire des élèves en sciences serait suffisante pour que l'un et l'autre de ces moyens soient utilisés par le groupe d'élèves. Cette décision s'est avérée opportune. En effet, dans l'examen des rapports entre les mesures de volume et de température, certaines équipes d'élèves procèdent d'abord à des calculs numériques tandis que d'autres construisent un graphique.

Par ailleurs, l'enseignante a aussi pris la décision, selon une pratique usuelle, de demander aux équipes d'élèves, après quelques minutes de travail, de partager avec tout le groupe leurs questions. Cette décision a également été pertinente. En effet, plusieurs élèves demandent alors s'ils doivent convertir les températures en °Kelvin. L'enseignante précise alors que les températures doivent être positives, sans justifier sa réponse. Cette information est une information clé dans l'identification du coefficient de proportionnalité, dans l'identification de la constante. La décision de l'enseignante nous apparaît sage; en effet, on voit mal comment les élèves auraient pu dissocier les modèles additifs et multiplicatifs ou encore, identifier la pente dans leur graphique, sans que l'enseignante leur procure à un moment cette information. En outre, il faut admettre que cette conversion n'était pas objet d'enseignement, ni objet de la situation.

Nous poursuivons notre analyse de la situation en examinant tour à tour les conduites des élèves qui procèdent à des calculs et celles des élèves qui procèdent à des graphiques.

2. Les calculs numériques réalisés

Nous avons prévu, dans l'analyse initiale de notre situation, que plusieurs élèves profiteraient de l'écart constant entre les températures pour vérifier si de tels écarts étaient aussi rencontrés entre les volumes. Cette prévision s'est avérée fautive. En effet, seuls les élèves E1 et E2 procèdent à des soustractions entre les mesures des volumes; il semble que les autres élèves fassent immédiatement l'hypothèse d'une relation proportionnelle, utilisant les explications construites lors de la situation précédente. Ne trouvant pas d'écart constant entre ces volumes, les élèves E1 et E2 déclarent ne pas pouvoir réaliser la tâche demandée. L'enseignante leur rappelle alors qu'il leur faut continuer, essayer d'autres moyens et ne pas oublier qu'ils avaient trouvé, lors de la situation précédente et

également lors de l'examen des explications des conduites des gaz, quelques instants plus tôt, plusieurs idées sur les relations entre les températures et les volumes. L'enseignante, selon un procédé usuel, fait ainsi appel à la mémoire de la classe. Ces élèves effectuent alors une division, mais éprouvent des difficultés à identifier dividende et diviseur. Ainsi, l'élève E2 demande à l'enseignante s'il faut diviser le volume par la température ou la température par le volume. L'enseignante lui répond par une question: «Quelle est la mesure qui varie en fonction de l'autre? Est-ce la variation de la température qui fait varier le volume ou la variation du volume qui fait varier la température du gaz?» Cette question exprimant une dépendance fonctionnelle ne peut être interprétée mathématiquement par cet élève et par plusieurs des élèves qui ont entendu cette question. En effet, l'élève E2 et d'autres élèves effectuent alors deux divisions et déclarent ensuite qu'ils obtiennent deux constantes: $V/T = k_1$ et $T/V = k_2$; ils demandent alors quelle est la bonne constante. L'enseignante reprend la question précédente et ajoute: «A vous de trouver un moyen pour décider». L'élève E2 voyant que d'autres élèves avaient fait un graphique s'empare de ce moyen; la production du graphique l'oblige à identifier la relation fonctionnelle et il déclare alors que c'est la première division qui est juste.

Une équipe d'élèves (E14-E20) multiplie les volumes par les températures; ces élèves obtiennent alors de grands nombres avec lesquels ils ne peuvent effectuer une correspondance graphique ce qui les conduit à des résultats qu'ils ne peuvent analyser. Toutes les équipes d'élèves, sauf les équipes E1-E2 et E7-E21, soutiennent enfin avoir trouvé à partir des divisions des mesures de volume par celles des températures correspondantes, une valeur de constante pour chaque ligne du tableau et ensuite avoir calculé une valeur moyenne de cette constante, soit 0,004.

L'équipe E15-E17 ne termine pas ses calculs par l'identification de la constante de proportionnalité. L'élève E15 effectue les calculs suivants, calculs qui semblent amenés par ses connaissances sur l'équation de la droite et en particulier, par la contrainte qu'il se donne de trouver une ordonnée à l'origine: $273 \times 0,004 = 1,092$ (T en °Kelvin); $1,092 - 1 = 0,092$. Dans ces calculs, c'est la valeur du volume pour une température de 0 °Celsius qui est considérée. Ce résultat sera, au moment du tracé du graphique, associé à l'équation de la droite: $y = mx + b \rightarrow V = 0,004T + 0,092$.

3. Les graphiques produits

Sept équipes tracent un graphique; à l'exception de l'équipe E7-E21, ce tracé succède à des calculs. De plus, seule l'équipe E7-E21 ne transforme pas les températures en °Kelvin. Chez les autres équipes, lors des calculs numériques effectués, la conversion des températures en °Kelvin a été

réalisée, comme nous l'avons précisé antérieurement. Trois équipes (E8-E9; E1-E2; E3-E4) effectuent une représentation inadéquate de la relation entre les variables (T p V). Ces équipes sont toutefois en mesure de profiter de la question de l'élève E2 concernant la division et peuvent ainsi correctement identifier la dépendance fonctionnelle entre les volumes et les températures.

Le tracé d'un graphique, étant donné les imprécisions des mesures, ne permet pas à tous les élèves de trouver une constante de proportionnalité. Cinq équipes, invoquant les imprécisions des mesures, se débrouillent en ne reliant pas les points un à un mais en traçant une ligne droite passant très près d'un plus grand nombre de points et également par le point (0,0). Ces élèves disent qu'une relation proportionnelle forme une droite inclinée passant par le point (0,0); ce savoir a été construit dans un cours précédent de mathématiques (Mathématiques 436).

Deux autres équipes d'élèves reliant un à un les points produisent des graphiques en forme d'escalier; ces élèves affirment n'avoir jamais vu un tel type de graphique en mathématiques. Face à cette situation, l'enseignante leur rappelle qu'il s'agit de résultats expérimentaux. Ce rappel n'ayant visiblement aucun effet, l'enseignante décide de leur indiquer comment faire, disant : «Vous tracez une droite couvrant le plus de points possibles.» L'enseignante tue ainsi le problème. Elle aurait pu tout au moins leur demander quel graphique ils s'attendaient à obtenir et s'ils voyaient des explications de l'écart entre leur attente et leur résultat. Elle aurait pu leur rappeler qu'ils peuvent trouver aussi d'autres moyens de trouver une solution au problème.

4. Les réponses aux questions posées

Les réponses aux deux questions posées sont obtenues facilement par les élèves qui ont trouvé par des calculs numériques un coefficient moyen de proportionnalité; il s'agit de 10 équipes. L'équipe composée des élèves E7 et E21, ayant tracé une droite passant le plus près possible des points obtenus, prolonge cette droite de façon à trouver les valeurs de température ou de volume cherchées. L'équipe composée des élèves E15 et E17 est la seule équipe qui peut utiliser le coefficient de proportionnalité calculé numériquement, associer ce coefficient à l'équation de la droite et ainsi, être en mesure de montrer deux façons permettant de trouver les mesures demandées.

L'équipe E15-E17 est la seule à être parvenue à formuler l'équation de la droite $V = 0,004T + 0,092$; comme nous l'avons fait remarquer précédemment, les calculs conduisant à l'ordonnée à l'origine sont inadéquats. Cette équipe associe la constante reliant les deux variables à la pente du graphique "V p T" et le nombre 0,092 au volume lorsque la température est de 0 °Kelvin. Les

conduites de cette équipe, dans cette situation, montrent une coordination entre les données expérimentales, les connaissances sur la relation entre le volume et la température des gaz et enfin, les connaissances mathématiques sur les fonctions et sur les rapports de proportionnalité.

Finalement, sauf l'équipe E7-E21, toutes les équipes peuvent formuler la relation de proportionnalité entre les deux variables. Les élèves disent lors des échanges entre eux qu'une fois qu'ils ont identifié la relation entre les variables, il suffisait d'appliquer une règle de trois, un produit croisé pour trouver les mesures demandées.

5. Analyse critique de cette situation

Lors de l'analyse des conduites à la situation précédente, nous avons vu que peu d'élèves savaient organiser les données expérimentales et formuler une écriture mathématique adéquate montrant la relation entre le volume et la température d'un gaz. Nous avons aussi noté que l'enseignante a résisté à la tentation de leur montrer comment organiser les données et à celle de corriger les écritures inadéquates des élèves. Cette décision s'est avérée fort pertinente. En effet, comme nous l'avons montré dans cette troisième situation, la très grande majorité des élèves sait profiter de ses connaissances sur la relation entre le volume et la température (connaissances discursives) pour effectuer des calculs appropriés sur les mesures organisées en tableau et trouver une écriture mathématique adéquate de la relation.

Cette troisième situation comporte toutefois des lacunes. Lors de l'analyse de cette situation, nous avons vu qu'une seule équipe a construit l'équation de la droite et montré qu'elle pouvait calculer les mesures demandées en utilisant soit la relation $V/T = k$ ou l'équation de la droite. Il aurait été important que l'enseignante demande aux élèves de trouver plus d'une façon de calculer les mesures demandées, de construire l'équation de la droite et enfin, d'expliquer les relations entre les écritures $V/T = k$ et $V = 0,0004T + 0,092$. Ce travail aurait été également une occasion de donner grâce au graphique un sens ou une autre interprétation au calcul numérique de la moyenne des constantes de proportionnalité réalisé par la majorité des élèves.

L'enseignante aurait pu aussi demander aux élèves qui ont obtenu un tracé sous forme d'escalier de trouver eux-mêmes des explications à leur tracé, d'indiquer clairement leur attente face au tracé et enfin, de réaliser eux-mêmes d'autres tracés, en utilisant leurs connaissances sur la relation entre le volume et la température (connaissances discursives mais aussi numériques). En indiquant comment faire un tracé convenable, comme nous l'avons dit antérieurement, l'enseignante a perdu

une occasion de traiter un problème important de connaissances qui aurait bénéficié aux élèves qui avaient fait de tels tracés, mais aussi à l'ensemble des élèves de la classe.

La quatrième situation: la modélisation mathématique des relations entre le volume d'un gaz et la pression, la température étant fixée à 250 °C

La quatrième situation débute par un retour sur la situation précédente. Les élèves qui ont identifié la constante de proportionnalité par des calculs numériques peuvent facilement identifier la relation entre les variables température et volume et interpréter justement la formule qu'ils ont trouvée, soit $V/T = k$. Ainsi, E2 dit spontanément que la constante représente le taux d'augmentation du volume par degré d'augmentation de la température.

Se souvenant des problèmes de plusieurs élèves, soit dans le tracé des graphiques, soit dans l'interprétation de ces graphiques, l'enseignante reproduit côte à côte deux graphiques montrant dans la situation précédente la relation entre le volume et la température: un graphique dans lequel les points sont reliés un à un (en escalier) et un graphique dans lequel une droite est tracée. Elle demande aux élèves d'utiliser leur formule $V/T = 0,004$ et ce qu'ils savent aussi de la relation entre le volume et la température pour d'une part choisir entre les deux graphiques, interpréter le graphique et essayer de trouver l'équation de la fonction associée au graphique choisi. Cette demande s'avère fructueuse car les élèves rejettent d'emblée le graphique en escalier disant que ce graphique ne va pas avec la formule, ne montre pas la relation de proportionnalité. Quelques équipes d'élèves (E14-E20; E1-E2; E5-E6) se montrent alors capables de trouver l'équation de la droite à partir de leur formule. Ils expliquent aux autres ce qu'ils pensent, mais cela ne semble pas convaincre tous les élèves. L'enseignante décide de ne pas insister, déclarant alors que ceux qui ne sont pas convaincus auront l'occasion d'y réfléchir.

L'enseignante présente le travail à accomplir dans cette quatrième situation. La feuille suivante est alors distribuée. Les élèves sont alors informés qu'ils doivent :

1. Expliquer la relation entre les mesures de volume et de pression inscrites au tableau.
2. Trouver la pression lorsque le volume est de
 - a) 2,32 litres
 - b) 0,80 litre
3. Trouver le volume lorsque la pression est de
 - a) 225 kPa
 - b) 153 kPa

Tableau 9**Variations du volume et de la pression d'un gaz**

La température est fixée à 250 °Celsius

Volume (bombonne de gaz) L	Pression en kPa
2,49	101,3
2,01	125,6
1,37	184,3
1,18	213,9
1,00	252,5
0,87	290,2
0,76	332,2
0,64	394,5
0,51	495,1

Les élèves travaillent seuls pour les dix premières minutes; ils peuvent ensuite discuter de leurs interprétations et de leurs calculs avec leurs camarades immédiats. Les trente dernières minutes sont consacrées à la discussion sur la relation entre le volume et la pression.

Le tableau 10 présente pour chacune des équipes les calculs et les graphiques réalisés ainsi que l'identification de la relation entre le volume et la pression. Les rubriques de ce tableau sont les suivantes: a) équipes: les élèves de chacune des équipes sont identifiés; b) calculs numériques réalisés: un seul calcul est effectué par les équipes, soit le produit du volume par la pression ($V \times P$); c) identification de la constante: la constante de proportionnalité (k); la constante est associée à la température en °Celsius; d) identification de la relation inversement proportionnelle (inv. prop.) entre les mesures de volume et de pression: par le discours ou par l'écriture mathématique; e) réalisation d'un graphique.

Tableau 10

**Les calculs et graphiques effectués par chacune des équipes et les interprétations
de la relation entre le volume et la pression**

Équipes	Calculs numériques V x P	Constante k T	Identification de la relation inv. prop.		Graphique
			Discours	Écriture	
E7, E21	X	X	X	$V = k/P$	
E8, E9	X	X	X		X
E22, E23	X	X	X	$V \times P = T$	X
E16, E24	X	X	X		
E1, E2	X	X	X	$V \times P = T$	
E5, E6	X	X	X	$V \times P = k$ si $k = 1$ $P = k/V$	X
E12, E19	X	X	X	$V \times P = k$	
E14, E20	X	X	X	si $k = 1$ $P = k/V$ $P = 1/V$	X
E13, E25	X	X	X	$V = k/P$	
E10, E11	X	X	X		X
E3, E4	X	X	X	$V = k/P$	
E15, E17	X	X	X	$V = k/P$	

1. Les calculs numériques produits rapidement par les élèves

La situation semble évoluer rapidement; les élèves perdent moins de temps qu'à la situation précédente à chercher une façon de faire. En moins de cinq minutes, plusieurs affirment avoir identifié la relation entre les deux variables.

Les élèves E1 et E2 affirment que $V \times P = 252$, ce qui leur donne une valeur près de 250 qui est la valeur fixée pour la température. Ils se demandent s'il est important de toujours obtenir la valeur de la température lorsque l'on multiplie les mesures de volume et de pression. Comme nous avons des résultats expérimentaux «disent-ils», il est alors possible d'obtenir une valeur légèrement différente de la valeur théorique qui est 250 °Celsius. Les équipes E22-E23, E10-E11 associent également la constante à la valeur de la température. L'enseignante leur rappelle qu'il faudra vérifier cela ultérieurement; elle leur demande, pour le moment, d'identifier la relation entre les variables.

Lorsque tous les élèves déclarent avoir terminé leur travail, l'enseignante appelle tour à tour des élèves différents pour présenter au tableau chacune des solutions. La formule $V \times P = k$ est trouvée par toutes les équipes; les mesures utilisées varient d'une équipe à l'autre, mais c'est la seule différence. À l'exception des équipes précédentes, toutes les équipes identifient clairement chacune des variables, ne faisant pas de confusion entre la constante et la température. L'enseignante n'intervient pas pour clarifier la relation entre les variables et, en particulier, pour traiter la confusion entre la température et la constante effectuée par les premières équipes.

Mais la réussite procédurale de la tâche ne constitue qu'une étape de cette situation. Qu'en est-il de l'interprétation de la relation entre les variables, de l'interprétation du rapport de proportionnalité? Pour amener les élèves à donner du sens aux calculs réalisés et, encore davantage, aux observations consignées dans le tableau, l'enseignante entame une discussion à ce propos et contraint les élèves à produire et à interpréter un graphique.

2. L'interprétation de la relation entre le volume et la pression d'un gaz

L'enseignante déclenche cette seconde partie de la situation en demandant aux élèves de prévoir ce qui se passerait si on exerçait une pression sur un ballon avec nos mains? Elle prend ensuite une boîte de métal fermée et par une petite ouverture, elle introduit un petit tube de caoutchouc et actionne la pompe à vide. La boîte s'écrase.

L'élève E19 dit que l'effet avec la pompe est plus fort que celui qu'on peut produire en prenant un ballon entre nos mains, mais que c'est la même chose, c'est le même phénomène. La pression est plus forte à l'extérieur du ballon.

L'enseignante demande ensuite à tous les élèves de produire un graphique montrant la relation entre le volume et la pression. Cinq équipes seulement effectuent le graphique, mais l'allure du graphique vient embrouiller la relation inversement proportionnelle qu'ils avaient bien identifiée auparavant et qui les avait amenés à faire le produit des mesures de volume et de pression. Le graphique a davantage l'allure d'une courbe que d'une droite. Devant l'embarras des élèves, l'enseignante poursuit en disant «Puisque vous affirmez que la relation est inversement proportionnelle, écrivez au tableau l'équation mathématique qui relierait ces deux variables? Puis, examinez à nouveau votre graphique et essayez de le comprendre.» Les élèves hésitent. L'élève E1 suggère à nouveau $P \times V = k$, mais dit que ça n'a pas de rapport avec le phénomène de l'inversion proportionnelle du graphique. L'élève E17 ajoute: «c'est l'allure du graphique qui est trompeuse; si on avait une ligne droite O.K., nous on a appris avec une droite seulement et ici on a plutôt une courbe.»

L'enseignante soutient qu'ils ne sont pas en présence d'une parabole, aucune variable n'est munie d'un exposant différent de un. Supposons que $k = 1$, ajoute-t-elle, et que je veuille isoler V par rapport à P qu'est-ce que j'obtiens? L'élève E5 répond $1/V = P$, réponse convenable que plusieurs élèves admettent. Mais lorsqu'on retourne au graphique, les élèves demeurent tout de même dans l'ambiguïté par rapport à son aspect curviligne. Ils sont bien prêts à concevoir que la relation est inversement proportionnelle, mais cette conception est ébranlée par l'aspect visuel du graphique.

Si les interventions de l'enseignante permettent à certains élèves de montrer plus clairement ce qu'ils entendent par inversement proportionnel, ce qui n'est pas inutile, elles n'amènent pas les élèves à construire une explication du résultat graphique obtenu. L'enseignante aurait pu poursuivre davantage en demandant aux élèves d'indiquer si des portions du graphique pourraient mieux que d'autres indiquer une relation inversement proportionnelle. Elle aurait pu aussi, à ce moment, dire aux élèves que pour certains gaz la relation entre le volume et la pression n'est pas aussi simple. C'est entre autres le cas pour le CO_2 où la représentation graphique de la relation entre la pression et le volume n'est pas tout à fait rectiligne; les auteurs de manuels scolaires gardent tout de même cet exemple pour indiquer que certains gaz ne se comportent pas tout le temps comme le modèle des gaz parfaits, mais qu'en général ils obéissent aux mêmes lois. Il faut ajouter que les autres gaz dont le comportement correspond exactement au modèle mathématique, ne peuvent être utilisés en raison des contraintes budgétaires de l'institution scolaire.

3. La construction d'une formule reliant les variables pression, volume et température

Dans l'interprétation de la relation entre la pression et le volume, certains élèves montrent une préoccupation pour relier l'ensemble des variables. L'enseignante profite de cette occasion et demande aux élèves d'essayer de trouver une formule qui pourrait intégrer les connaissances qu'ils ont construites au cours des situations 3 et 4.

Il y a seulement deux équipes sur douze qui sont arrivées à identifier la formule générale reliant les trois variables. Plusieurs équipes ont toutefois utilisé les trois variables, mais sans intégrer les données des situations 3 et 4. Ainsi, l'élève E7 dit: «moi j'obtiens $T/P = V$ et ça fonctionne avec tous les chiffres». L'enseignante demande à l'élève E21, partenaire de l'élève E7, d'aller au tableau et d'expliquer son raisonnement; il écrit $T/P = V$ et montre avec des nombres que cela fonctionne (ex: $250/101,3 = 2,48$; $250/125,6 = 1,99$). Cette conduite est tout à fait prévisible car ces élèves sont ceux qui ont associé la température à la constante dans la présente situation; les calculs montrent bien qu'ils ne transforment pas la température en °Kelvin. Ce raisonnement semble entraîner l'adhésion de certains élèves qui pourtant n'avaient pas commis une telle erreur d'interprétation. L'élève E19 approuve ainsi le calcul des élèves E7 et E21; il ajoute: «je n'ai pas pris les mêmes valeurs que lui mais j'obtiens la même équation». Ces élèves parviennent bien à écrire une formule contenant les trois variables, mais en utilisant uniquement les données de la quatrième situation.

L'élève E2 soutient qu'il est en mesure d'affirmer que la formule générale que l'on veut identifier doit être de la forme $P \times V = V \times T$. Les calculs des élèves E1 et E2 pour identifier la formule sont intéressants, parce qu'ils intègrent les résultats de la troisième situation, dans une recherche d'une formule générale. Ainsi, ces élèves utilisent la constante provenant des calculs effectués au cours de la troisième situation, soit $V/T = 0,004$, et la constante calculée au cours de cette situation, soit $V \times P = 252,5$; ils multiplient ces deux constantes. Obtenant la valeur de 1,01 qui est la même que celle obtenue en faisant $P \times V/T = k$, l'élève E2 ajoute qu'il ne faut pas oublier de faire la transformation de la température en °Kelvin, sinon cela ne fonctionnera pas dans la formule. L'élève E15 appuie ces propos, se souvenant qu'il n'avait pas pu trouver une constante dans la situation 3 parce qu'il n'avait pas transformé les températures en °Kelvin. L'enseignante intervient alors et guide fortement les actions des élèves E1 et E2 dans la vérification de leur formule; elle indique même comment valider cette formule. Nous reproduisons les interactions suivantes, qui illustrent bien ce qu'on entend par effet Topaze (Brousseau, 1986).

Ens: on est en train de découvrir la formule reliant les paramètres impliqués dans la conduite des gaz parfaits. Aujourd'hui nous avons affirmé que $P \times V = k$. Au cours précédent, on avait identifié la relation impliquant les paramètres volume et température. Vous rappelez-vous de cette relation?

E2: c'est directement proportionnel.

Ens: comment ça fonctionnait entre ces deux variables.

E19: on avait $V/T = k$.

Ens: êtes vous d'accord avec ce que dit E19 ou bien est-ce $V \times T = k$? Laquelle des deux formules est bonne?

E2: moi je pense que la formule des gaz parfaits est $P \times V = V/T$.

Ens: est-ce vrai ? Avez-vous vérifié si les valeurs des constantes sont les mêmes. Si oui, vous avez probablement identifié la formule, sinon il faut changer celle que vous proposez.

Les élèves font des calculs.

Ens: vous êtes sur le bord de trouver la vérité, j'aimerais savoir qui va trouver la relation entre ces variables. E7 peux-tu te servir de la première ligne du tableau; as-tu vérifié si $V/T = P \times V$ et si ces identités ont la même constante.

E7: moi j'arrive à $T/P = V$.

E1: est-ce qu'il y a une raison à cela ?

Ens: pourquoi ça marche?

E7: ça correspond aux valeurs, ça marche avec les chiffres.

Ens: est-ce qu'il y a quelqu'un qui peut nous prouver comment il a fait son calcul, au tableau, E21?

E21: se dirige vers le tableau.

Ens: on va le laisser inscrire son équation au tableau puis après on vérifiera ensemble.

E21: écrit $T/P = V \quad 250/101,3 = 2,48 \text{ L}$.

Ens: il faut compléter une autre ligne; E19, ta formule est différente de celle-ci.

E19: c'est la même chose que lui.

Ens: viens la placer, on va les confronter et je vous demande ensuite de faire des commentaires.

E19: $T = V \times P$ c'est la même affaire.

Ens: pour ce qui est du calcul, mais il reste à vérifier la formule, vérifiez la position des variables est-ce que ces deux formules s'équivalent ? $T = V \times P$ et $T/P = V$.

Ens: E2 tu as d'autre chose à rajouter, ça rapport avec les deux variables, viens au tableau nous les placer.

E2: se dirige vers le tableau.

E2: tu as les deux constantes celles provenant du cours précédent où t'as $V/T = 0,004$ et $P \times V = 252,5$ on a pris les deux constantes et on les a multipliées, on obtient la valeur 1,01 qui est la même valeur que celle obtenue en faisant $P \times V/T = k$.

E19: on a pris des températures et avec une des températures ça donne trop haut. On les met en Kelvin et là ça fonctionne.

E15: je dis que la formule $T/P = V$ ça ne marche pas quand on transforme pas en °Kelvin.

Une autre équipe formée des élèves E19 et E12 parvient par un trajet différent de celui de l'équipe E1 et E2 à trouver une formule générale. Les formules $V/T = k_1$ (trouvée dans la situation 3) et $V \times P = k_2$ (trouvée dans la situation 4) sont réunies en une seule formule, soit $V \times P/T = k$. Les élèves appuient leur raisonnement sur le fait que la relation entre la pression et la température a été identifiée dans la situation 2. Ensuite, ils vérifient leur formule en utilisant les nombres de la première ligne du tableau de la situation 4.

Ces deux dernières équipes sont invitées à la fin de la situation à exposer au groupe leur raisonnement. Cette exposition n'est pas commentée par l'enseignante qui encourage toutefois les élèves à prendre des notes et à y réfléchir, à voir si ces formules leur semblent justes.

4. Analyse critique de cette situation

Comme nous l'avons montré, à quelques reprises, cette situation pose plusieurs problèmes. Le choix du gaz, comme nous l'avons vu dans l'analyse des réactions des élèves face au graphique montrant la relation entre le volume et la pression, est discutable. Les élèves ne disposaient d'aucune connaissance pour interpréter ce graphique. De plus, dans les premières situations, les graphiques produits sont toujours «lisibles» avec les écritures mathématiques découlant de calculs sur les mesures.

Si on souhaitait faire intervenir le même gaz que dans la situation précédente, on aurait pu également ajouter un autre tableau montrant le comportement d'un gaz parfait, sous les mêmes conditions, ce qui aurait pu provoquer un débat et des précisions sur les conduites des gaz. Au moment de l'analyse, nous avons aussi indiqué quelques pistes d'interventions que l'enseignante aurait pu suivre pour s'en tirer face à cet événement.

Un second problème que pose cette situation concerne le choix de l'unité de mesure de la température. La température en degré °Celsius est un nombre très proche de la valeur de la constante, ce qui entraîne une confusion entre température et constante. On aurait pu donner la température en °Kelvin. On aurait pu, constatant la confusion entre température et constante, amener les élèves à voir le problème de signification de l'écriture; en effet, selon l'écriture $P \times V = T$, la température semble une mesure composée du volume et de la pression, ce qui est assez surprenant. Cette proposition d'intervention, il faut en convenir, survient après coup; dans le vif de l'action, tout enseignant ne parvient que très rarement à concilier l'avancé et l'analyse de sa leçon. C'est bien le but poursuivi par les ingénieries didactiques d'essayer de concevoir des situations qui organisent les interventions. Il apparaît aussi important de mentionner que ce choix non calculé a été un révélateur du poids du contrat didactique; en effet, le fait de trouver par le calcul un nombre voisin de la température a fait écran à d'autres connaissances sur les gaz et a possiblement rassuré les élèves sur la pertinence de leurs calculs.

La dernière partie de cette situation soulève aussi certaines questions. Si l'enseignante profite bien de l'occasion offerte par certains élèves de poursuivre le travail sur les relations entre le volume, la

pression et la température d'un gaz, il pilote trop les élèves vers les connaissances visées. Les questions qui ouvrent cette dernière partie sont certes intéressantes, même si l'enseignante résiste peu au désir d'enseigner la formule.

La cinquième situation: la modélisation mathématique des relations entre la pression, le volume et la température des gaz parfaits

Comme il l'a fait dans les situations précédentes, l'enseignante débute en demandant aux élèves s'ils peuvent formuler les relations entre les variables volume, pression et température, prises deux à deux, qu'ils ont trouvées jusqu'à maintenant. Les élèves identifient sans difficulté ces relations, soit $V/T = k_1$, $P * V = k_2$. L'élève E17 ajoute que «la pression et la température sont proportionnelles entre eux, soit $P/T = k_3$; on l'a vu lors de la démo» (situation 2).

L'enseignante ne juge pas opportun de revenir sur la dernière partie de la quatrième situation. Cette décision apparaît sage car, comme nous l'avons vu, une telle tentative échoue, à défaut d'une situation pour construire ces relations. La cinquième situation a justement pour but la construction de ces relations.

L'enseignante présente alors le tableau suivant; il demande aux élèves de compléter ce tableau et d'essayer de trouver une formule montrant les relations entre le volume, la température et la pression d'un gaz. L'enseignante leur distribue les feuilles et demande aux élèves de travailler seuls pour les dix premières minutes; elle ajoute qu'ensuite ils pourront discuter de leurs solutions avec leurs coéquipiers. Elle insiste également pour qu'ils écrivent sur leur feuille tous les calculs et les formules qu'ils utilisent. Elle complète la présentation du travail en leur disant qu'ensuite ils vont devoir venir expliquer leurs solutions au tableau et justifier leur raisonnement.

Tableau 11

Variations de la température, du volume et de la pression d'un gaz

Température °C	Volume en L	Pression kPa
250	2,49	101,3
78	3,25	
112		83,2
	5,10	125,5
432	0,55	
223		200,0
	2,56	251,0

Nous donnons un aperçu de ces procédés en indiquant les commentaires qu'ils ont suscités chez les élèves, au moment de leur présentation. Le tableau 12 indique les écritures des relations construites par les diverses équipes.

Les élèves sont arrivés à remplir le tableau sans utiliser la démarche que nous avons anticipée dans l'élaboration de cette situation. Nous avons envisagé qu'ils utiliseraient les relations connues pour construire la relation intégrant les trois variables, soit $P_1 V_1 / T_1$, et qu'ensuite, ils pourraient utiliser cette formule pour construire une relation d'identité entre les mesures de chacune des lignes du tableau, soit $P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2$ et ainsi de suite. Cette façon de faire n'a pas été rencontrée. Les élèves ont eu recours à divers procédés.

Sauf les élèves E16 et E24 qui ont recours à des températures en Kelvin, tous les élèves trouvent des mesures incorrectes. Il est clair que pour la plupart des élèves, le problème est simple et est de même niveau de difficulté que le problème de la quatrième situation; ces élèves partent ainsi de la relation $P \times V = T$ pour trouver les mesures manquantes. Ainsi, l'élève E7 utilise l'équation dérivée de la précédente, soit $T/P = V$, qu'il applique aux mesures de la troisième ligne du tableau; le calcul suivant est alors réalisé: $T/P = V$; $T = 112 \text{ }^\circ\text{K}$; $V = ?$; $P = 83,2 \text{ kPa}$; $112/83,2 = 1,35 \text{ L}$. L'élève E15 réagit en s'opposant à cette démarche soutenant le fait que "si l'on retire la constante en établissant l'équation $T/P = V$, cela fausse alors nos calculs. La relation entre les variables n'est pas changée mais l'absence de la constante ne nous permet pas d'avoir les bonnes valeurs. L'élève E7 dit: «tu n'as plus la constante k dans l'écriture de l'équation; si on fait juste varier 2 variables sur trois, c'est comme s'il y avait une constante par exemple: la pression et le volume changent et la température est stable. T'as $P \times V = T$ où T est stable et devient une constante.» L'élève E7 explique ainsi la situation à son collègue d'une façon tout à fait cohérente et réussit à le faire changer d'idée.

Tableau 12

**Les écritures des relations entre la température, le volume et la pression produites
par les diverses équipes d'élèves**

	Écritures de type 1 $P \times V / T = k$ où T en °C	Écritures de type 2 $P \times V = T$ où T en °C	Écritures de type 3 $P \times V / T = k$ où T en Kelvin	Réponses Adéq. Inad.
E7, E21		X		X
E8, E9		X		X
E22, E23		X		X
E16, E24		X	X	X
E1, E2	X			X
E5, E6		X		X
E12, E19		X		X
E14, E20		X		X
E13, E25		X		X
E10, E11		X		X
E3, E4		X		X
E15, E17		X		X

L'élève E20 se dirige vers le tableau et fait le calcul suivant à partir des mesures de la ligne 2 du tableau:

$$T/P = V; P = ?; T = 78$$

$$78/P = 3,25$$

$$78 = 3,25 \times P$$

$$78/3,25 = P$$

$$P = 24$$

D'autres élèves réagissent à son calcul, notamment l'élève E19 qui soutient avoir inversé l'équation et avoir obtenu le même résultat $1/V = P/T$. Les élèves constatent qu'ils utilisent diverses écritures des relations, mais que les relations ne sont pas affectées par ces écritures; ces écritures sont reconnues algébriquement valables.

Le raisonnement algébrique permet aux élèves de s'entendre rapidement sur la formule $T = V \times P$, étant donné que cette formule peut être écrite autrement. Seulement deux équipes sur douze passent par le calcul de la constante pour trouver la variable manquante d'une ligne du tableau. Voici les écritures produites par l'élève E14:

$$1. P \times V/T = k$$

$$2. T = P \times V/k$$

$$3. P = k \times T/V$$

$$4. V = k \times T/P$$

Les élèves acceptent ces écritures en disant qu'on peut oublier la constante puisqu'elle est la même d'une ligne à l'autre. Un élève ne paraît pas convaincu. Ne sachant pas comment intervenir autrement qu'en reformulant les interventions des autres élèves, l'enseignante se contente de demander aux élèves de réfléchir à ce problème, ajoutant qu'il n'est pas si simple. L'élève E7 maintient qu'il peut mettre une lettre pour montrer la constante et que cela est important parce que cette constante existe. De toute évidence, les arguments de l'élève E7 et des autres élèves ne sont pas de même nature; l'élève E7 fait référence à des connaissances sur les relations et la constante de proportionnalité qu'il a construites dans les situations tandis que les autres élèves appuient leur raisonnement sur des connaissances algébriques.

Il avait été prévu que l'enseignante présente le tableau en ajoutant un commentaire sur l'équilibre. Cette action est apparue peu pertinente, l'enseignante doutant avec raison que cette information ne puisse être interprétée adéquatement par les élèves ou ne puisse encore s'avérer précieuse.

L'enseignante avait aussi envisagé de confronter davantage les solutions des élèves. Ainsi, les réponses des élèves E16 et E24 auraient pu être confrontées à celles des autres élèves. Ce travail n'a pu être mené, faute de temps.

La sixième situation: les volumes occupés par 16g de gaz différents soumis aux mêmes conditions de température et de pression

Des événements inattendus (prise de photographies dans la classe) ont obligé l'enseignante à laisser tomber le travail de révision qui avait été prévu. La situation débute donc par la présentation de tableaux montrant des variations différentes de volumes de gaz soumis à des conditions identiques de température et de pression. Elle se termine par une application des relations sur le volume, la pression et la température d'un gaz. Dans l'analyse, nous distinguons ces deux parties.

1. Les démarches des élèves dans l'interprétation des différences entre les mesures de volume de gaz, à température et pression constantes

L'enseignante distribue les feuilles reproduisant les tableaux suivants et demande aux élèves d'expliquer les différences entre les 3 tableaux. Elle indique également que les températures doivent être transformées en Kelvin, se rappelant des problèmes posés dans les situations antérieures par la non conversion des températures.

Tableau 13.1

Variations du volume d'un gaz dont la masse est de 16g
16g du gaz donnent les résultats suivants

Température °C	Volume (L)	Pression (kPa)
25	12,25	101,3
672	4,5	881,7
-155,1	3,3	150,0

Tableau 13.2

Variations du volume d'un gaz dont la masse est de 16g
16g du gaz donnent les résultats suivants

Température °C	Volume (L)	Pression (kPa)
25	6,125	101,3
672	2,250	881,7
-155,1	1,6	150,0

Tableau 13.3

Variations du volume d'un gaz dont la masse est de 16g
16g du gaz donnent les résultats suivants

Température °C	Volume (L)	Pression (kPa)
25	24,5	101,3
672	9,009	881,7
-155,1	6,62	150,0

Le tableau 14 offre un aperçu des calculs réalisés par les élèves et des interprétations des différences entre les tableaux. Comme le montre ce tableau, toutes les équipes attribuent à la présence de gaz différents, les différences de mesures de volume dans les tableaux. L'équipe E7-E21 identifie correctement deux des gaz (soufre et oxygène). Cette équipe utilise la relation d'identité, soit $P_1V_1/T_1 = P_2V_2/T_2$ pour examiner les données dans chacun des tableaux; les autres équipes effectuent cet examen en calculant la constante de proportionnalité et en vérifiant l'invariance de cette constante d'une ligne à l'autre. Cette vérification n'est pas nécessaire. Il semble que les élèves aient, peut-être par un effet de contrat didactique, utilisé les mesures dans chacun des tableaux. On peut aussi faire l'hypothèse que la remarque de l'enseignante sur la transformation des températures les a incités à faire de tels calculs.

Lors de l'analyse préliminaire de cette situation, nous pensions que les élèves mentionneraient ce qu'ils avaient appris dans le cadre du cours de sciences physiques 436 de la quatrième secondaire, à savoir qu'une mole de n'importe quel gaz à T.P.A. (température et pression ambiantes (25 °Celsius)) occupe un volume de 24,5 litres; cette prévision nous apparaissait d'autant plus plausible que nous avions au cours de la situation de révision (situation 1) fait appel à cette connaissance. Nous pensions donc que cette connaissance leur aurait permis d'analyser les trois tableaux. Mais cela n'a pas été vérifié.

Certains élèves expliquent les différences d'un tableau à l'autre par l'arrangement des molécules et/ou des atomes qui constituent le gaz. Cela leur donne leurs caractéristiques particulières. L'élève E8 soutient que ce sont des gaz différents car leurs structures agissent différemment: «ça dépend de comment les atomes sont placés, ça change tout.»

D'autres élèves (E19 et E20) établissent les rapports multiplicatifs entre les mesures de volume dans les tableaux et disent qu'il doit y avoir une raison mais ne voient pas comment poursuivre.

L'enseignante revient à la charge en écrivant au tableau une des formules identifiées dans la situation précédente, soit $P \times V / T = k$, et leur demande si cette formule peut être d'une certaine utilité dans la vérification du lien plausible entre les trois tableaux. L'élève E8 réagit en disant «qu'un gaz à 25 °C ne peut avoir trois volumes différents si la pression est la même»; l'élève E19 appuie ces propos en affirmant que «cela fait partie des propriétés caractéristiques des gaz au même titre que la masse volumique».

Tableau 14
Démarches des élèves dans l'interprétation des différences
entre les tableaux 4.1, 4.2, 4.3

Équipes	Calculs numériques		Interprétation des résultats	
	Formule d'identité	Par la constante		
	$P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2$	$P_1 V_1 / T_1 = k$ et ensuite $k = P_2 V_2 / T_2$	Hypothèses sur: Gaz différents:	Nature des gaz
E7, E21	X		X	X
E8, E9		X	X	
E22, E23		X	X	
E16, E24		X	X	
E1, E2		X	X	
E5, E6		X	X	
E12, E19		X	X	
E14, E20		X	X	
E13, E25		X	X	
E10, E11		X	X	
E3, E4		X	X	
E15, E17		X	X	

«Quel est le rôle de la constante dans le cas présent?» demande l'enseignante. L'élève E8 répond: «elle nous sert à établir un lien entre les trois tableaux. Pour un tableau, il y a une constante à la fois.» L'élève E16 dit de son côté: «la constante sert à faire des liens entre les trois variables pour un tableau.» L'élève E2 précise en disant: «on change une variable à la fois, pas deux, sinon la situation n'est plus la même. Si on change la constante on n'a plus le même gaz.»

Après ces premiers échanges, prenant surtout en compte les propos de l'élève E2, les élèves sont moins assurés qu'ils ne l'étaient sur la présence de différents gaz. Leur justification provient du

fait qu'il y a trop de paramètres impliqués dans l'identification des propriétés déterminantes de la matière dont ils disposent pour affirmer avec certitude que ce n'est pas le même gaz dans les trois tableaux. L'élève E2 réplique en disant que: «les nombres associés à la pression, au volume, à la température peuvent être mis dans la formule et on peut déterminer la valeur de la constante».

Selon les élèves, l'élément autour duquel doit se greffer l'identification du gaz est la valeur de la constante, ce qui n'a rien d'étonnant si on tient compte des situations précédentes. L'élève E2 dit que l'utilisation de la formule ne donne pas le même résultat dans les trois tableaux. L'élève E7 justifie ce résultat en affirmant que ce n'est pas le même gaz. Plusieurs élèves se rallient enfin à la conclusion de l'élève E7 et reviennent à leur première interprétation des différences.

L'enseignante, suivant l'analyse effectuée initialement, tente de les amener à faire sur chacun des tableaux un travail similaire à celui conduit à la situation précédente. «Pouvez-vous faire des calculs sur chacun des tableaux pour vous aider?» L'élève E1 dit qu'on «pourrait faire un produit croisé si on avait deux variables, mais on en a trois». Alors l'enseignante demande: «Est-ce possible de faire un produit croisé avec trois variables?». L'élève E7 arrive rapidement avec une solution en disant: «tu mets $P_1 V_1 / T_1$ égal à la même constante que l'autre ligne; tu fais égal $P_2 V_2 / T_2$ ». L'élève E1 revient ensuite sur sa position concernant le produit croisé en indiquant qu'on peut multiplier les deux variables P et V. «Alors, on obtient un seul nombre (au numérateur) et c'est comme un produit croisé», ajoute-t-il.

Prenant appui sur le travail de l'élève E7, l'enseignante essaie par questionnement de faire avancer et/ou de provoquer la réflexion des élèves afin que tous puissent se saisir de la relation d'identité menant à la loi générale des gaz parfaits. Elle écrit au tableau les relations construites par les élèves sur les gaz, soit (nous utilisons la lettre p pour indiquer le rapport de proportionnalité):

1. $V \propto T$
2. $P \propto 1/V$
3. $P \propto T$
4. $P_1 \times V_1 / T_1 = k_1$
5. $P_2 \times V_2 / T_2 = k_2$

Elle demande aux élèves une interprétation de ces relations, en utilisant si possible, les mesures des tableaux pour montrer leur interprétation. Ce travail fait, elle écrit la relation $P_1 \times V_1 / T_1 = P_2 \times V_2 / T_2$ et demande aux élèves d'où vient cette relation. Elle termine en spécifiant qu'elle vient d'écrire la loi des gaz parfaits.

Ainsi, les élèves en viennent à formuler la relation $P_1 \times V_1 / T_1 = P_2 \times V_2 / T_2$, mais cette formulation est fortement orientée par l'enseignante. L'enseignante leur demande ainsi si cette relation pourrait être valable pour une troisième ligne et ainsi de suite. Les élèves E2 et E20 affirment que oui et l'enseignante leur demande si cela pourrait être encore valable pour la quinzième ligne du tableau. Plusieurs élèves affirment que oui.

2. Analyse des écritures des élèves dans la résolution du problème d'application des relations sur le volume, la température et la pression d'un gaz

L'enseignante demande aux élèves de résoudre le problème suivant:

Un ballon aéronautique contient 25000 litres d'hélium, la température au sol est de 25 °C, la pression atmosphérique est 101 kPa. À 1000 m d'altitude, la température est alors de 5 °C et la pression de 91 kPa. Quel est le volume du ballon à cette altitude?

En donnant ce problème, nous souhaitons que les élèves utilisent la loi générale pour résoudre le problème, soit $P_1 \times V_1 / T_1 = P_2 \times V_2 / T_2$. La majorité des élèves a réussi le problème. Deux élèves (E17 et E21) n'ont pas transformé les températures en °Kelvin; dans le cas de l'élève E21, cette erreur est résiduelle, cet élève n'ayant jamais réglé ses confusions entre constante et température dans les situations précédentes. Une seule élève, soit E3, a utilisé deux formules pour arriver à une bonne solution. Dans un premier temps, elle a identifié la constante par le calcul $V \times P / T = k$; elle a inscrit $25000 \times 101 / 298 = 8473,16$. Dans un second temps, elle a utilisé la formule $k \times T / P = V$ et effectué les calculs suivants: $8473,15 \times 278 / 91 = 25885$ litres. La solution numérique des élèves qui ont réussi le problème montre un bon contrôle sur les transformations des écritures; ils passent de la formule $P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2$ à la formule $P_1 V_1 T_2 / T_2 P_2 = V_2$ et utilisent les données appropriées.

3. Analyse critique de cette situation

Dans la première partie de cette situation, la majorité des élèves effectue des calculs adéquats et sait tirer profit de ces calculs dans la recherche d'explications aux différences dans les mesures de volume. S'ils font tous l'hypothèse de gaz différents, tous sauf un élève ne savent utiliser la masse donnée pour identifier la nature des gaz. Cette donnée ne peut toutefois être utile que jumelée à des connaissances sur les relations entre la masse molaire d'un gaz et le volume occupé par tout gaz dans des conditions de température et de pression ambiantes. Comme le montre l'analyse précédente, ces connaissances ne sont pas utilisées par les élèves. Elles ont été rappelées dans la

première situation de révision; il s'agit d'un contexte fort différent de celui dans lequel ces connaissances sont utilisées dans la sixième situation. L'enseignante aurait pu rappeler à nouveau ces connaissances, à la suite des premiers échanges sur les explications ou encore, utiliser la réponse de l'élève E7 pour demander aux autres comment on pourrait faire pour savoir quels gaz sont impliqués dans chacun des tableaux.

La septième situation: consolidation des connaissances sur les gaz parfaits

La septième situation comporte un ensemble de problèmes que les élèves doivent faire seuls. Un court échange est réalisé après chaque problème. Ces problèmes sont des occasions pour les élèves d'appliquer les connaissances développées au cours des situations précédentes.

La situation commence par des explications de l'enseignante sur les différents mouvements associés aux différents états de la matière: translation, rotation et vibration pour les gaz, rotation et vibration pour les liquides, vibration pour les solides. Depuis plusieurs années, ces explications sont données aux élèves à la fin d'une première partie du cours sur la chimie. L'enseignante a jugé pertinent de respecter cette pratique, bien que les savoirs ainsi exposés ne soient pas nécessaires pour répondre aux questions ou pour résoudre les problèmes.

Les conduites des élèves sont examinées pour chacun des problèmes. Puisque les élèves savaient qu'ils pouvaient partager avec leur camarade voisin, chacune des réponses aux problèmes, et ce, après chacun des problèmes, puisqu'ils savaient également qu'une correction de chacun des problèmes serait effectuée par l'enseignante, certains élèves ont attendu le moment de la correction et n'ont rien inscrit avant ce moment sur leurs feuilles. Notre analyse de cette situation est donc conduite uniquement en tenant compte des échanges lors de la correction des problèmes. Nous procédons donc à l'examen des réponses des élèves à chacun des problèmes.

Problème no.1

Énoncé:

Un cylindre de verre contient une certaine quantité de gaz. Si on laisse échapper la moitié du gaz et que l'on referme le cylindre, parmi les événements suivants, lequel ou lesquels se produit ?

- a) La masse du gaz ne change pas.
- b) La pression diminue de moitié.

- c) Le volume du gaz diminue de moitié.
- d) Le nombre de collisions augmente.
- e) Aucun changement n'aura lieu.

Pour effectuer un choix approprié, l'élève se doit de faire l'identification de la variable qui subit une modification, soit la pression, et de vérifier les conséquences de la modification de cette variable sur les autres facteurs impliqués dans la loi des gaz parfaits.

Sans avoir discuté au cours des situations précédentes du comportement d'un gaz parfait, selon un volume donné, les élèves rejettent d'emblée le choix c; ils appuient leur choix en disant qu'une fois qu'une quantité gaz est retirée, la portion qui reste occupe tout l'espace disponible. Le choix b est vite reconnu le bon choix par un grand nombre d'élèves; voici certaines des justifications de ce choix:

E1: la masse du gaz ne change pas, seule la pression change.

E14 : si tu as la moitié du gaz, le gaz prend le même volume, les molécules sont plus éloignées et il y a moins de pression.

E2: pour le nombre de collisions, c'est sûr qu'il diminue car il y a moins de particules.

Problème no.2

Énoncé:

Un gaz occupe un volume de 6,80 litres à la pression de 1000 kPa. Si ce gaz occupe maintenant un volume de 40,80 litres. Comment expliques-tu ce changement ? Plus d'une solution est possible.

Ce problème implique la variation d'une seule variable, le volume; l'élève doit être en mesure de prédire quelles sont les conséquences d'une variation du volume sur les autres variables. L'élève peut retourner aux différents rapports établis entre les variables, pour mieux identifier les variations que subit le système. Les valeurs numériques dont il dispose sont les volumes et une première pression; si l'élève identifie les relations entre les variables, il trouve alors rapidement une nouvelle valeur numérique pour la pression.

Certains élèves identifient mal la relation entre le volume et la pression. Lorsqu'ils obtiennent une pression supérieure à la première, ils remettent en question leur résultat. La valeur numérique de la réponse les fait retourner aux connaissances sur les gaz et leur permet de corriger leur réponse. La conduite de l'élève E12 montre une telle correction d'une première erreur:

E12: Ben moi, en premier j'ai fait le produit des extrêmes, ça l'avait pas de sens ça m'a donné 6000 kPa pis après j'ai fait $(P_1 \times V_1) / V_2$ pis là ben ...ça m'a donné 106,69.

Les élèves E2 et E7 ont pris toutes les variables impliquées dans la loi générale des gaz parfaits: $P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2$ et ont utilisé une valeur imaginaire pour la température. Cette valeur étant la même dans chaque membre de l'équation, ils ont alors obtenu une valeur nouvelle pour la pression qui est inférieure à la première.

L'élève E1 a fonctionné en gardant la pression fixe des deux côtés de l'équation et a cherché la nouvelle température. L'élève E7 a produit une deuxième solution en faisant varier la température et la pression à la fois et il affirme par la suite que la nouvelle valeur de la température peut varier selon la valeur originale qu'on lui donne. Tandis que la valeur de la pression sera toujours la même.

L'élève E15 fait une division de la deuxième valeur de la pression par la première. C'est à partir de ce facteur qu'il trouve les variations impliquant les autres variables: température et pression. Il affirme que «la température augmente alors d'un facteur de six et que la pression diminue d'un facteur de six aussi».

Ce problème se révèle fort intéressant. Il offre aux élèves la possibilité d'intégrer les connaissances acquises depuis le début de l'enseignement et d'utiliser ces connaissances dans la recherche de solutions à un problème nouveau.

Problème no.3

Énoncé

Un gaz occupe un volume de 1000 ml sous une pression de 24 kPa et à une température de -45°C . Quel volume cette quantité de gaz occuperait-elle sous une pression de 40 kPa et à une température de 59°C ?

Ce problème implique l'utilisation de la formule sur la loi des gaz parfaits. Dans la correction de la solution, deux élèves sont invités à inscrire au tableau les calculs qu'ils ont réalisés. Ces élèves transforment les températures en °Kelvin et les volumes en litres, cette dernière transformation n'étant pas nécessaire. La seule question des élèves concerne les unités de mesure du volume. Tous les élèves parviennent sans difficulté à trouver le volume du gaz.

Problème no.4

Énoncé

Lequel des énoncés suivants est vrai:

- (a) Le volume molaire de l'oxygène gazeux ne varie pas selon la température, à pression constante.
- (b) Le volume molaire de l'oxygène liquide est inférieur à celui de l'oxygène solide.
- (c) Le volume molaire de l'oxygène solide est plus grand que celui de l'oxygène liquide.
- (d) Le volume molaire de l'oxygène gazeux est plus petit que celui de l'oxygène liquide.
- (e) À température constante, le volume molaire de l'oxygène gazeux est inversement proportionnel à la pression.

Ce problème à choix multiples porte sur des connaissances en principe acquises, soit lors des situations, soit au cours de l'année antérieure. Nous avons indiqué dans l'analyse initiale que le jumelage de la variation d'un des facteurs régissant la loi des gaz parfaits avec les états de la matière pouvait poser problème, mais permettait par ailleurs de lier les connaissances acquises récemment à celles acquises antérieurement.

Le premier choix est refusé à l'unanimité. Dans l'examen du second choix, l'enseignante demande s'il y a un lien entre l'état de la matière et la température. Une discussion concerne alors l'espace entre les molécules pour un état donné de la matière. L'élève E1 propose l'explication suivante: «C'est ça, c'est plus compact quand c'est solide que quand c'est liquide. Donc l'espace entre les molécules est plus petit.» Le second choix est alors rejeté. Cette analyse permet aux élèves de rejeter aussi rapidement le troisième choix. Le quatrième choix est aussi rejeté par les élèves. Enfin, le cinquième choix est retenu rapidement par les élèves et les justifications sont appropriées.

Problème no.5

Énoncé

La pression exercée par des particules gazeuses sur les parois d'un contenant s'explique par:

- a) le mouvement des molécules gazeuses.
- b) la température du gaz.
- c) la masse volumique du gaz.
- d) l'espace entre les molécules gazeuses.

Ce problème nous apparaissait une occasion de mettre à jour et de discuter des conceptions des élèves au sujet de l'énergie cinétique des molécules. Ce ne fut pas le cas; nous pensons que les choix de réponses ne favorisaient pas la remise en question des conceptions naïves des élèves. Ils étaient trop simples pour jeter un quelconque doute ou encore, susciter la discussion quant à la manifestation de l'énergie cinétique. Il aurait fallu laisser la question ouverte, c'est-à-dire sans choix de réponse.

Nous pensions également qu'il y aurait une discussion entre les élèves et que les conceptions naïves seraient apparues, ce qui n'a pas été tout à fait le cas. Une élève E1 a émis son opinion qui représentait la bonne réponse et tous les autres se sont ralliés à ce choix.

Problème no. 6

Énoncé

À la température de 25 °C, sous une pression de 100,0 kPa, 32 g d'un gaz A occupent un volume de 24,5 L

À la température de 25 °C., sous une pression de 100,0 kPa, 16 g de ce même gaz occupent un volume de 12,25 L

À la température de 25 °C, sous une pression de 200,0 kPa, 16 g de ce même gaz occupent un volume de 6,12 L

Le volume de 16 g d'un mélange du gaz A et d'un gaz B en des proportions identiques à la température de 25 °C et sous une pression de 100,0 kPa occupent un volume de 9,18 litres.

Comment expliquez-vous ce dernier résultat?

Quels sont ces gaz?

Ce problème prend appui sur les connaissances construites lors de la sixième situation; il est toutefois plus complexe que les problèmes posés à cette situation. En effet, l'élève doit trouver une façon de calculer la masse molaire d'un gaz inconnu B pour lequel il ne dispose pas d'informations

sur la relation entre la masse, le volume et la température. Cependant, l'élève a appris qu'une mole de n'importe quel gaz à T.P.A. (température et pression ambiantes) occupe un volume de 24,5 L. Il peut utiliser cette information. Il ne s'agit pas d'un problème trivial. Il est intéressant d'examiner les réponses des élèves.

Les élèves E8 et E9 disent qu'on a affaire au même gaz dans les lignes 1, 2, 3. Ensuite, l'élève E12 dit: «moi je crois que ces gaz sont de l'oxygène et du soufre». Un autre élève, E3, dit qu'il pense qu'il s'agit du néon. Aucun de ces élèves ne peut prouver ce qu'il affirme.

Les élèves ne savent identifier la masse molaire des gaz. L'enseignante leur suggère d'utiliser une des trois lignes comme référence pour pouvoir identifier le gaz A. L'élève E7 affirme que «dans les trois lignes au début du problème le gaz dont on fait mention est l'oxygène. La masse d'une mole d'oxygène est 32 g et cela correspond aux données de trois lignes.» Cet élève ne peut par ailleurs, pas plus que les autres, poursuivre la résolution du problème. L'enseignante décide donc d'intervenir. Elle demande aux élèves d'identifier le volume du gaz A, en disant: «si on a un volume de 12,25 L pour 16 g à une pression de 100,0 KPa, quel sera le volume pour 8 g?». Les élèves trouvent facilement 6,125 L. L'enseignante leur demande ensuite de calculer le volume du gaz B, en regardant si les informations peuvent leur être utiles. L'élève E7 suggère alors 3,06 L pour le volume du gaz B.

Ce travail fait, les élèves ne savent toujours pas comment identifier le gaz B. L'enseignante rappelle que les masses des gaz A et B sont identiques (8 g) et que le volume du gaz B est de 3,06 L. Elle ajoute: «une mole de n'importe quel gaz à température et pression ambiantes occupe un volume de» L'élève E7 ne lui laisse pas le temps de terminer sa phrase et dit: «je l'ai, tu fais une règle de trois et j'obtiens 64 g»; une autre équipe formée des élèves E1 et E1 trouve également la masse molaire du gaz.

Concernant l'identification du gaz B, l'enseignante leur suggère de penser que le gaz en question pourrait être diatomique. Les élèves E7, E8, E2, E3 disent rapidement que c'est du soufre, en utilisant le tableau périodique à leur disposition.

Notre examen des démarches des élèves dans la résolution de ce problème et des interventions nombreuses de l'enseignante semble indiquer que les élèves n'ont pas construit les connaissances qui leur permettraient de trouver seuls la solution de ce problème. Cela ne signifie pas pour autant

qu'il fallait s'abstenir de proposer un tel problème. On aurait pu toutefois mieux organiser l'énoncé de ce problème et être plus explicite dans la présentation des données contextuelles et numériques du problème et possiblement utiliser un libellé plus simple. A ce propos, le libellé du quatrième énoncé (Le volume de 16 g du mélange ...) n'est pas particulièrement simple. Même si ce problème faisait partie d'une banque de problèmes donnés à des élèves lors d'un examen (Farrand, 1992), rien ne nous empêchait d'en modifier la forme écrite, mais notre but était de donner les mêmes exercices aux deux groupes.

La huitième situation: examen sur la chimie des gaz parfaits

Au chapitre précédent, nous avons présenté l'examen sur la chimie des gaz parfaits qui a été subi non seulement par le groupe d'élèves concernés par notre recherche (groupe expérimental), mais aussi par un autre groupe d'élèves comparables (groupe contrôle). Les nombres d'élèves dans chacun des groupes était identique. Il nous apparaissait important de montrer, au moins, que notre groupe expérimental d'élèves pouvait obtenir des résultats comparables à ceux d'autres groupes d'élèves. Nous avons donc opté pour un examen unique; cet examen est similaire à ceux qui sont habituellement donnés aux élèves dans les classes de chimie. Nous reproduisons cet examen et examinons brièvement les performances des deux groupes d'élèves.

1. Le volume molaire de n'importe quel gaz est le volume occupé par :

- (A) un échantillon de gaz mesuré à 0 °C et à 101,3 kPa;
- (B) un échantillon de 32 g de gaz;
- (C) un échantillon de $6,023 \times 10^{23}$ atomes de gaz;
- (D) une mole de molécules de gaz..

2. La pression de 0,200 mole d'hydrogène gazeux dans un cylindre est de 300 mm de Hg. Dans ce cylindre, à température constante, on ajoute 0,100 mole d'azote gazeux et 0,300 mole de méthane gazeux. Quelle sera la pression partielle de l'azote gazeux?

- | | |
|------------------|------------------|
| (A) 50 mm de Hg | (C) 450 mm de Hg |
| (B) 150 mm de Hg | (D) 900 mm de Hg |

3. Un cylindre d'acier relié à un manomètre est soumis aux conditions atmosphériques. Par une très froide journée d'hiver, à -35 C, le manomètre indique une pression de $4,0 \times 10^3$ kPa. Quelle pression le manomètre indiquera-t-il si la température atteint +25 C?

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| (A) $2,9 \times 10^3$ kPa | (C) $5,0 \times 10^3$ kPa |
| (B) $3,9 \times 10^3$ kPa | (D) $5,6 \times 10^3$ kPa |

4. Lesquels des énoncés suivants sont EN ACCORD avec la théorie cinétique moléculaire des gaz?

1. Les gaz sont constitués de particules extrêmement petites appelées molécules.

2. Les distances entre les molécules d'un gaz sont très grandes par rapport aux dimensions des molécules.

3. Les molécules d'un gaz se déplacent toujours à la même vitesse, quelle que soit la température de ce gaz.

4. Les molécules d'un gaz sont toujours en mouvement et se déplacent en ligne droite dans toutes les directions.

5. Les molécules d'un gaz se frappent entre elles et frappent les parois du récipient.

(A) 1, 2 et 3

(B) 3, 4 et 5

(C) 1, 2, 4 et 5

(D) 1, 2, 3, 4 et 5

5. Quelle est la masse molaire de 5,4 g d'un gaz occupant un volume de 4,8 litres à 30 °C et soumis à une pression de 50 kPa?

6. Quelles sortes de mouvements moléculaires trouve-t-on :

(A) à l'état gazeux ? décrivez et faites un dessin

(B) à l'état liquide ? décrivez et faites un dessin

7. La pression du gaz à l'intérieur d'une bombe aérosol est égale à 300 kPa à la température de 293 °K. Quelle sera la pression exercée par le gaz à la température de l'eau bouillante, soit 100 °C? (Le volume de la bombe est constant.)

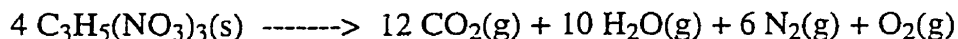
8. Énumérez les facteurs qui influencent le comportement d'un gaz.

9. Un ballon contient un mélange formé de 4 moles de dioxyde de carbone, CO₂, et de 1 mole de krypton, Kr, gazeux. Si la pression totale du mélange est de 76 kPa, quelle est la pression partielle exercée par le krypton?

10. Combien de moles de gaz méthane, CH₄, occuperont un volume de 500 ml à la température de 25 °C et à la pression de référence (101 kPa)?

11. Si 10 ml de dioxygène prennent 30 minutes pour diffuser par une petite ouverture, quel temps prendrait le même volume de dihydrogène pour passer par cette ouverture?

12. La nitroglycérine, un explosif, se décompose selon l'équation :



A) Calcule le volume total des gaz produits à 120 kPa et à 25 °C à partir de 2,2 x 10² g de nitroglycérine.

B) Quelle est la pression partielle de chacun des gaz produits à ces conditions?

13. Classe les gaz suivants par ordre décroissant de la vitesse de diffusion :

CH₄, HCl, NO, PH₃, et Ne.

14. Un échantillon de 4,6 moles de difluor gazeux est présent dans un contenant de 27,4 litres. Quelle est la pression du gaz si la température est de 104 °C?

15. Trois moles d'un gaz X à 20 °C occupent un volume V_1 tout en exerçant une pression P_1 . À quelle température doit-on amener le gaz si la pression triple, que le volume diminue de moitié et que l'on ajoute quatre autres moles du gaz?

16. À une pression de 150 kPa et à une température de 30 °C, une certaine quantité de dihydrogène gazeux occupe un volume de 85,0 mL. Quel sera le volume de la même quantité de dihydrogène mesuré à 250 kPa et à -10 °C?

Le tableau 15 montre les performances de chacun des deux groupes d'élèves à l'examen précédent.

Tableau 15

Performances de chacun des deux groupes d'élèves à l'examen de chimie

Questions	Groupe contrôle			Groupe expérimental		
	Réussites	Réussites partielles	Échecs	Réussites	Réussites partielles	Échecs
1 choix mult	20		4	21		3
2 choix mult	19		5	14		10
3 choix mult	22		2	21		3
4 choix mult	22		2	22		2
5 développ.	20	3	1	19	4	1
6 développ.	8	15	1	8	11	5
7 développ.	22	2	0	23	0	1
8 développ.	1	22	1	3	20	1
9 développ.	8	15	1	20	0	4
10 développ.	14	5	5	14	7	3
11 développ.	1	18	5	0	13	11
12 développ.	8	10	6	1	17	6
13 développ.	21	2	1	17	1	6
14 développ.	22	1	1	23	0	1
15 développ.	4	13	7	8	12	4
16 développ.	20	3	1	20	4	0

Nous avons établi ainsi les performances. Pour les 4 premiers problèmes à choix multiple (choix mult), les réponses sont jugées correctes ou incorrectes; les rubriques «réussites et échecs» traduisent cette correction. Pour les autres problèmes à développement (dévelop.), nous avons distingué les réussites, des réussites partielles et des échecs. Pour les problèmes 6 et 12, une réponse juste à une seule des questions était considérée «réussite partielle». Pour les autres problèmes, les réussites partielles sont attribuées soit à des solutions incomplètes, soit à des erreurs dans l'application des formules (ex: oubli de transformer les températures en Kelvin, traitement erroné des rapports dans une formule).

Comme le montre le tableau, les performances du groupe expérimental sont inférieures à celles du groupe contrôle pour les problèmes 2, 12 et 13; l'écart le plus marqué se situe au problème 12. Les élèves du groupe expérimental auraient dû en principe réussir aussi bien ce problème; toutefois, les élèves de ce groupe n'ont pas eu en classe autant d'exercices leur permettant d'appliquer dans diverses situations leurs connaissances ou plus spécifiquement, les formules sur les gaz. Cette interprétation de l'écart observé au problème 12 nous semble aussi pertinente pour expliquer les autres écarts.

Par ailleurs, les élèves du groupe expérimental réussissent mieux que les élèves du groupe contrôle les problèmes 9 et 15. L'écart entre ces réussites est particulièrement important pour le problème 9. Ce problème porte sur les pressions partielles des gaz en fonction du nombre de moles. Il s'agit d'un contenu similaire à celui traité au problème 2, qui pourtant est moins bien réussi par les élèves du groupe expérimental que par les élèves du groupe contrôle. Nous ne pouvons formuler aucune interprétation de ce résultat.

Dans l'ensemble, nous pouvons dire que les performances des groupes expérimental et contrôle sont comparables. Il s'agit d'un résultat important. En effet, s'ils ont pu profiter des situations de la séquence pour construire des connaissances sur les gaz plutôt que de recevoir un enseignement des savoirs visés, ils ont eu moins d'occasions qu'ont eu les élèves du groupe contrôle d'appliquer leurs connaissances et en particulier, les formules. Que les élèves du groupe expérimental aient obtenu des performances comparables à celles du groupe contrôle montre qu'il est possible, sans allonger indûment l'enseignement, de construire des situations amenant les élèves à effectuer un travail de modélisation scientifique, tout en reconnaissant que ces situations, nous l'avons à maintes reprises souligné- comportent des lacunes importantes.

SYNTHÈSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DE NOTRE RECHERCHE

L'analyse a posteriori des situations d'enseignement que nous avons effectuée en examinant les interactions didactiques dans le déroulement de chacune de ces situations et la confrontation de cette analyse et de l'analyse a priori des situations menée au chapitre méthodologique nous ont permis de montrer les effets positifs et négatifs des situations de modélisation mathématique que nous avons construites et de la gestion didactique de ces situations sur l'évolution des connaissances scientifiques et mathématiques des élèves. Il importe maintenant de dégager les principaux résultats de notre recherche, en regard des hypothèses et des objectifs de notre recherche et de les interpréter en nous appuyant sur les études épistémologiques et didactiques qui ont guidé notre travail de recherche.

Notre séquence d'enseignement incarne une genèse didactique spécifique des connaissances et des savoirs sur les gaz parfaits. Les analyses sur les conceptions naïves des élèves sur les gaz et sur les problèmes mathématiques qu'ils rencontrent dans l'application et l'interprétation des lois sur les gaz, ainsi que les études sur l'évolution historique concomitante des conceptions sur les gaz et des pratiques scientifiques nous ont amenée à considérer que c'est par l'engagement dans des situations de modélisation mathématique des conduites des gaz parfaits, de formulation des modèles construits, de confrontation et de validation de ces modèles, que les élèves pourront construire des connaissances satisfaisantes sur les gaz. Les situations que nous avons construites reflètent donc cette position sur la genèse des connaissances. Mais avons-nous réussi à créer des situations de modélisation mathématique qui amènent le progrès attendu des connaissances? Quelles sont les caractéristiques des situations qui concourent au progrès des connaissances? Quelles sont les caractéristiques des situations qui, au contraire, ne concourent pas au progrès des connaissances? Pour répondre à ces questions, il ne s'agit pas de reprendre l'examen de chacune des situations; cet examen a déjà été fait. Il s'agit plutôt de dégager les caractéristiques importantes de ces situations.

L'évolution des conceptions naïves et l'acquisition de connaissances satisfaisantes sur les gaz, en regard des caractéristiques des situations d'enseignement

L'expérience initiale en laboratoire réalisant le gonflement d'un ballon sous l'effet d'une augmentation de la température s'avère fort précieuse pour entraîner les élèves dans des formulations d'explications variées et dans un débat autour de ses explications. Les premières explications données sont de ce type: «les molécules bougent plus vite et ont besoin de plus de place; pour faire de la place, les atomes se tassent; les chocs entre les molécules augmentent; le caoutchouc se dilate et le ballon éclate; le volume augmente avec la température; lorsque le point

d'ébullition est atteint, la température n'augmente plus; la température n'augmente pas parce qu'il y a une perte de chaleur; il y a une expansion des molécules de gaz dans le ballon; le volume augmente parce qu'il y a déséquilibre entre les deux pressions». Ces explications s'appuient sur des conceptions naïves dont plusieurs évoquent celles qui ont été mises en évidence dans plusieurs études (Séré et Moppert, 1989; Thouin, 1996; Stavy, 1988, 1991, 1995; Kesidou et Duit, 1993; Wiser et Carey, 1983). Certaines de ces explications surgissent lors des échanges entre les élèves, montrant bien un processus d'adaptation et de coordination des connaissances. La recherche d'autres explications pour certains élèves est une façon de régler les contradictions entre les explications; ainsi, en est-il de l'évocation des pressions interne et externe faite à la suite d'une mésentente entre les élèves concernant l'augmentation possible de la température lorsqu'elle atteint le point d'ébullition et son effet sur le mouvement des molécules.

Une des conditions de la production de ces explications et de leur prolifération dans les échanges entre les élèves nous semble être le retrait de l'enseignante dans le débat; ainsi, elle ne statue pas sur les conceptions exprimées et se contente de reprendre quelquefois certaines des propositions des élèves. Cette gestion de la situation est essentielle. Selon la théorie des situations didactiques (Brousseau, 1986, 1996), la tâche de trouver des explications des phénomènes observés est dévolue aux élèves. Ce sont aussi les élèves qui, ayant épuisé le débat sur des explications qualitatives des phénomènes pour lesquelles ils ne disposent pas d'outils pour en évaluer la pertinence, passent à un autre niveau d'explication des phénomènes se concentrant sur des aspects très limités de l'expérience, soit les variations de volume, de température. Les élèves se servent donc de caractéristiques macroscopiques. Cette transition vers une pratique scientifique (Dupin, 1995; Orange, 1977) n'est pas un fait mineur, bien que les élèves ne parviennent pas à construire une modélisation mathématique des phénomènes étudiés.

La prolifération d'explications et le débat entre les élèves sur ces explications sont alimentés par l'examen des montages expérimentaux. On peut à cet effet se demander si le caractère fort rudimentaire de ces montages n'est pas un atout didactique dans la mesure où il oblige les élèves à s'interroger sur la fiabilité des observations, à départager les expériences naturelles des expériences plus contrôlées. Nous aurons l'occasion de revenir sur cette question ultérieurement.

Si les situations de modélisation mathématique qui suivent cette expérience permettent de préciser les relations entre la pression, le volume et la température d'un gaz et notamment, de rejeter l'affirmation «le volume augmente avec la température», elles ont peu d'effet sur les conceptions des élèves sur les gaz. Il faut attendre la sixième situation pour que certaines des conceptions premières soient réexaminées et abandonnées au profit de connaissances plus adéquates. Dans la

conception de cette situation, nous avons pensé que les élèves pourraient se référer à une connaissance acquise dans le cadre d'un cours antérieur de sciences physiques, soit qu'une mole de n'importe quel gaz à T.P.A. (température et pression ambiantes (25 °Celsius)) occupe un volume de 24,5 litres; cette prévision nous apparaissait d'autant plus plausible que nous avions au cours de la situation de révision (situation 1) fait appel à cette connaissance. Nous pensions donc que cette connaissance leur aurait permis de conclure que c'est le nombre de mole du gaz et non la présence de gaz différents qui explique les différences de volume du gaz dans les trois tableaux, puisque les volumes du gaz sont mesurés à T.P.A. Que cette prévision ne se soit pas réalisée a constitué un événement important.

La majorité des élèves a ainsi invoqué la présence de gaz différents pour expliquer les différences de volume à T.P.A. Le choix des mesures de masse a constitué également une variable décisive dans cette tâche, car la comparaison de ces mesures a permis aux élèves de faire des hypothèses sur la nature des gaz impliqués, en utilisant la relation d'identité $P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2$ ou la constante de proportionnalité. Mais la possibilité d'effectuer ces calculs et d'identifier des gaz a rendu encore plus difficile la reprise de la situation par l'enseignante, car les élèves ne pouvaient mettre en doute leur réussite de la tâche. Pour dénouer cette impasse, l'enseignante aurait pu présenter d'autres données; mais trouver des données appropriées n'était pas facilement réalisable sur le champ. Elle a donc eu recours à une gestion didactique forte de la tâche en donnant aux élèves les clés et en pilotant pas à pas les actions des élèves par un questionnement visant la production de la réponse attendue, selon un effet de contrat didactique bien connu (effet Topaze dont nous avons antérieurement donné une définition). Par ailleurs, le fait que certains élèves aient pu répondre correctement aux questions formulées en invoquant d'autres connaissances sur les gaz («un gaz à 25 °C ne peut avoir trois volumes différents si la pression est la même»; «cela fait partie des propriétés caractéristiques des gaz au même titre que la masse volumique»; «on change une variable à la fois, pas deux, sinon la situation n'est plus la même. Si on change la constante on n'a plus le même gaz») a permis à plusieurs élèves de douter de leur première réponse sur la présence de gaz différents.

Si on substituait à la gestion didactique de l'impasse, une ou des tâches complémentaires construites dans le but d'amener les élèves à douter de leurs premières explications, cette situation ainsi transformée pourrait présenter plusieurs caractéristiques que nous pourrions mettre à profit dans un enseignement visant la transformation des conceptions et la construction de connaissances plus satisfaisantes. La réalisation de la première tâche permet aux conceptions naïves des élèves d'intervenir dans la résolution du problème et même de produire, sous certaines conditions, des résultats qui semblent probants et dont la production résulte bien d'une pratique scientifique. En

transformant ces conditions dans les tâches complémentaires, on pourrait susciter des conflits cognitifs ou socio-cognitifs (Mugny, 1985) par la confrontation d'explications différentes, voire contradictoires, et entraîner une transformation des conceptions et une construction de connaissances plus satisfaisantes.

La septième situation est une occasion de prendre le pouls des transformations des conceptions et de la construction de connaissances sur les gaz. Ces conceptions et ces connaissances concernent, entre autres, les relations entre les volumes molaires et les variations de pression et de température, les relations entre l'état de la matière et la température et enfin, l'énergie cinétique des molécules. Nous examinons les réponses à une des questions pour discuter de l'effet des situations de modélisation sur l'évolution des connaissances.

Comme nous en avons fait état lors de l'analyse a posteriori de cette situation, même si les élèves n'ont pas discuté dans les situations précédentes du comportement d'un gaz parfait, selon un volume donné, les élèves déclarent que le volume d'un gaz parfait contenu dans un cylindre de verre n'est pas affecté si on laisse échapper la moitié du gaz, justifiant leur réponse en disant que le gaz occupe le même volume qu'auparavant. Un élève explique cet énoncé en disant que «les molécules sont plus éloignées et il y a moins de pression». Un autre élève déclare que le nombre de collisions diminue car il y a moins de particules. Plusieurs des connaissances sur lesquelles se fondent les jugements des élèves ont été acquises lors d'enseignements antérieurs. Il semble que les situations de modélisation mathématique que nous avons réalisées dans notre enseignement aient permis à ces connaissances de devenir utiles, de fonctionner comme des savoirs (Conne, 1992) ou encore, de prendre place dans un champ conceptuel (Vergnaud, 1991).

L'évolution des connaissances mathématiques et la construction de connaissances sur les lois des gaz parfaits, en regard des caractéristiques des situations d'enseignement

Lors de la première situation de révision des connaissances en chimie, nous avons présenté quelques graphiques et demandé aux élèves d'identifier la relation entre les variables dans chacun des graphiques et de produire une écriture mathématique montrant ces relations. Comme nous en avons fait état lors de l'analyse a posteriori de cette situation, aucun élève n'a été en mesure de produire l'écriture mathématique et seulement un élève a pu le faire lorsque nous avons ajouté des valeurs numériques. Ce résultat montre que les connaissances des élèves sur les fonctions affines et la proportionnalité, à leur entrée dans l'enseignement, sont très élémentaires; ce résultat est similaire à ceux obtenus dans de nombreuses études en sciences et en mathématiques (Kieren,

1988, 1989; Noelting et Béland, 1988; Ricco, 1982; Rouchier, 1991; Viennot, 1989). Puisque la notion de proportionnalité intervient dans le travail de modélisation mathématique effectué dans les situations d'enseignement, il nous apparaît important d'examiner comment ces situations permettent une évolution des rapports des élèves à cette notion.

L'expérience initiale en laboratoire effectuée au cours de la seconde situation montre une utilisation de l'écriture mathématique particulière; en effet, les élèves utilisent l'écriture mathématique pour traduire leurs idées sur les relations entre la pression, le volume et la température du gaz et chez la majorité des élèves, cette traduction est erronée. Ainsi, l'écriture $V = T$ sert à montrer que les variations du volume sont proportionnelles aux variations de la température.

La troisième situation s'avère déterminante dans la construction de connaissances appropriées sur la proportionnalité et sur les relations entre la température et le volume d'un gaz. Les mesures de volume et de température utilisées ont permis, comme il avait prévu lors de l'analyse a priori de cette situation, d'écarter une représentation additive des relations entre ces mesures, au profit d'une construction d'une représentation multiplicative de ces relations. Cette construction a pu être réalisée par les calculs et les écritures mathématiques effectués dans un travail de modélisation mathématique de phénomènes sur les gaz. Les élèves pouvaient ainsi travailler à deux niveaux, au niveau du sens des relations dans le système étudié en sciences et au niveau du sens des calculs, des représentations graphiques et des écritures en mathématiques (Chevallard, 1989; Orange, 1997; Walliser, 1977).

Comme nous l'avons écrit lors de l'analyse a posteriori de cette situation, nous aurions pu demandé aux élèves de trouver plus d'une façon de calculer les mesures demandées, de construire l'équation de la droite et enfin, d'expliquer les relations entre les écritures $V/T = k$ et $V = 0,0004T$. Ces écritures parlent autrement des relations entre le volume et la température; comme l'ont bien expliqué Chevallard (1991) et Pascal (1980), ces écritures sont porteuses d'informations différentes. Dans le premier cas, l'écriture montre que la constante de proportionnalité est un quotient, tandis que dans le second cas, l'écriture montre que le volume est donné par le produit de la température par un nombre décimal inférieur à 1 (ce nombre étant la constante de proportionnalité). L'écriture dans le second est davantage porteuse d'information; elle nous dit également que si la température est supérieure à 0, la mesure du volume (le nombre associé à l'unité de volume) est toujours inférieure à la mesure de la température (le nombre associé à l'unité de température); elle nous dit enfin plus directement que si la température est 0, le volume est également 0. Cette dernière information aurait mérité d'être discutée, car elle pouvait entrer en résonance avec les conceptions des élèves concernant les relations entre le volume d'un gaz et la

température. Ce travail aurait été également une occasion de donner, grâce aux représentations graphiques, un sens ou une autre interprétation au calcul numérique de la moyenne des constantes de proportionnalité réalisé par la majorité des élèves.

Lors de l'analyse a posteriori de la quatrième situation, nous avons montré comment le choix des mesures est source de confusion entre température et constante. La gestion didactique de cette situation pose également des problèmes importants; ainsi, malgré une entrée malheureuse des élèves dans la tâche de modélisation mathématique, l'enseignante aurait pu, par une meilleure coordination de ses connaissances sur les sciences et les mathématiques et en prenant appui également sur ses connaissances de la pratique scientifique, profiter des erreurs des élèves et les amener à examiner le sens des écritures. Elle a réagi sur le vif, de la manière la plus courante en enseignement, en pilotant les actions des élèves vers la production de la réponse souhaitée. Cette façon de faire, liée à un choix discutable des mesures, a entraîné chez les élèves une modélisation inadéquate des relations entre la pression, le volume et la température d'un gaz; cette modélisation a été reprise dans la cinquième situation; elle a heureusement été écartée lors des échanges entre les élèves, au profit d'une modélisation adéquate des relations. Dans ces échanges, les élèves se sont appuyés sur les connaissances construites antérieurement et ont pu ainsi à modifier leurs écritures des relations.

L'échec relatif de la quatrième situation montre bien aussi qu'à défaut d'une analyse a priori qui examine les choix possibles des variables de tâche, en regard des connaissances visées, et qui effectue également des choix relativement à la gestion didactique de la situation, il est difficile pour une enseignante de trouver dans le vif de l'action des moyens de se sortir d'une situation, fusse-t-elle, comme c'est le cas dans cette recherche, mieux informée que la majorité des enseignants sur les conceptions des élève et leurs connaissances en mathématiques et enfin, sur les pratiques souhaitables d'enseignement.

Au moment de l'examen de l'évolution des conceptions et des connaissances sur les gaz, nous avons montré comment dans la sixième situation, le choix des mesures utilisées a permis aux élèves de recourir à certaines de leurs conceptions naïves sur les gaz pour formuler des hypothèses sur la nature des gaz et vérifier ces hypothèses. Nous avons aussi, à ce moment, montré comment le recours à des tâches complémentaires aurait pu amener les élèves à douter de leurs interprétations et ainsi, transformer leurs connaissances. Si cette situation comporte des lacunes évidentes et montre un pilotage discutable des actions des élèves par l'enseignante, elle montre par ailleurs comment les connaissances mathématiques et scientifiques construites dans les situations antérieures permettent aux élèves de trouver et de valider leurs connaissances sur les gaz. Comme nous l'avons écrit antérieurement, les conduites des élèves relèvent bien d'une pratique scientifique.

Les interactions didactiques dans le déroulement de la septième situation, malgré quelques problèmes relevant entre autres de la difficulté des élèves à considérer que le gaz puisse être diatomique (ex: problème 6), montrent bien que les élèves savent interpréter les écritures, aller au-delà des calculs pour considérer le sens des relations montrées par les écritures, pour construire des solutions appropriées aux problèmes posés.

CHAPITRE V
CONCLUSIONS

Dans ce chapitre, nous identifions d'abord les principales contributions de notre recherche; nous en montrons également les limites. Puis, nous esquissons certaines perspectives pour des recherches futures.

LES PRINCIPALES CONTRIBUTIONS DE NOTRE RECHERCHE

Depuis quelques années, un nombre important de chercheurs en didactique des sciences reconnaissent la nécessité de procéder à la fois à des études historiques, épistémologiques, cognitives et didactiques pour éclairer l'analyse des savoirs savants, des savoirs enseignés et des situations d'enseignement de ces derniers savoirs (Chevallard, 1992; Brousseau, 1996; Duschl et Gitomer; 1991; Johsua et Dupin, 1993).

Dans notre recherche, les études sur les conceptions naïves des élèves sur les gaz et sur les pratiques d'enseignement de la chimie des gaz, les études sur l'évolution au cours de l'histoire des connaissances sur les gaz et l'évolution des pratiques scientifiques et les études effectuées en didactique des mathématiques et des sciences, nous ont amenée à construire et analyser une séquence d'enseignement de la chimie des gaz parfaits incarnant une genèse spécifique des connaissances sur les gaz.

Si plusieurs études montrent la persistance des conceptions naïves des élèves à la suite d'un enseignement et les difficultés d'application et d'interprétation des lois sur les gaz parfaits des élèves (Kautz, Héron et McDermott, 1998; Confrey, 1990; Erickson et Driver, 1983; Pfundt et Duit, 1994), peu de recherches (à notre connaissance aucune, si l'on se fie aux publications dans les revues et les ouvrages en didactique des sciences) ont été consacrées à la conception, l'analyse et l'expérimentation de séquences didactiques permettant d'identifier et de caractériser certaines situations qui pourraient résulter en une construction satisfaisante des connaissances sur les gaz. En relevant le défi de construire et d'analyser des situations d'enseignement de la chimie des gaz, nous avons donc réalisé un travail pionnier qui doit être vue comme une première étape dans la compréhension des défis que pose l'enseignement de la chimie des gaz et des conditions qui peuvent permettre une construction satisfaisante des connaissances en ce domaine.

L'analyse et l'interprétation des principaux résultats de notre recherche montrent l'importance de prendre en compte les conceptions naïves des élèves dans l'enseignement de la chimie des gaz. Elles montrent par ailleurs la difficulté de construire des situations qui permettent une évolution de ces conceptions et une construction de connaissances plus satisfaisantes. En effet, si les situations

de modélisation mathématique peuvent contribuer à la transformation de ces conceptions et à la construction de connaissances plus satisfaisantes, de telles pratiques scientifiques ayant également contribué au fil de l'histoire à l'évolution des conceptions scientifiques (Astolfi et Develay, 1989; Bauer, 1907; Koyré, 1973; Lockemann, 1959; Serres, 1989; Kuhn, 1983), concevoir et faire en sorte que ces situations soient efficaces nous apparaît fort complexe et suppose des analyses préalables et a priori (Artigue, 1988; Brousseau, 1996) fort délicates.

Plusieurs des situations d'enseignement que nous avons construites se sont avérées efficaces, résultant en une transformation des conceptions naïves, une évolution des connaissances en mathématiques et en sciences et une entrée des élèves dans une pratique scientifique de modélisation mathématique des conduites des gaz. Plus encore, nous avons pu grâce à notre démarche de confrontation des analyses a priori et a posteriori caractériser ces situations et identifier les choix concernant les variables de commande (variables de tâches et variables didactiques) qui ont été déterminants.

LES LIMITES DE NOTRE RECHERCHE

L'analyse et l'interprétation des résultats de notre recherche nous a permis également d'identifier plusieurs limites de notre recherche.

Si dans plusieurs situations, les tâches de modélisation mathématique des conduites des gaz et des relations entre la pression, le volume et la température des gaz ont été l'occasion pour les élèves de formuler des explications relevant de conceptions naïves, elles n'ont pas que trop peu souvent entraîné une mise à l'épreuve de ces conceptions. Ce résultat doit être attribué à une difficulté de concevoir des situations qui permettent cette mise à l'épreuve; le débat que nous avons instauré dans la classe à propos de ces conceptions n'a pas suffi à déclencher chez les élèves un travail cognitif important sur ces conceptions. Il faut admettre que la gestion didactique des conceptions naïves ou erronées des élèves est complexe et que l'on dispose de peu d'indications sur les situations à mettre en place pour gérer ces conceptions.

Dans quelques situations également, les choix que nous avons effectués sur les mesures de volume, de température et de pression et sur la gestion didactique des situations se sont avérés discutables, privant les élèves de moyens pour évaluer eux-mêmes la pertinence de leurs actions. Comme nous l'avons montré lors de l'analyse de ces situations, l'enseignante a réalisé souvent dans le feu de l'action les conséquences de ces choix et a essayé de réparer ces situations en recourant très souvent à un pilotage pas à pas des actions et des réponses attendues.

Il nous apparaît important de souligner par ailleurs la pertinence de la méthodologie d'analyse a priori et a posteriori à laquelle nous nous sommes référée dans la construction des situations et dans l'analyse des données de notre recherche. Cette méthodologie permet d'identifier les lacunes des situations et, comme nous l'avons montré à plusieurs occasions, de proposer des façons d'y remédier.

Dans notre recherche, nous avons omis de recourir à des outils diagnostiques pour évaluer les conceptions des élèves à l'entrée et à la sortie de l'enseignement. Cette omission nous apparaît regrettable, d'autant que nous aurions pu recourir aux questionnaires utilisés dans plusieurs études portant sur les conceptions naïves des élèves sur les gaz. Nous nous sommes ainsi privée de moyens pouvant permettre de mieux connaître les conceptions des élèves; la révision que nous avons effectuée dans la première situation nous apparaît nettement insuffisante. Nous aurions pu utiliser cette évaluation diagnostique pour mieux identifier les effets des situations d'enseignement que nous avons réalisées.

PERSPECTIVES POUR DE FUTURES RECHERCHES

A plusieurs reprises, les limites et les faiblesses des situations ont été exposées. Des propositions de modification des situations ont également été présentées. Dans une recherche future, il serait important de proposer et d'expérimenter des situations qui tiennent compte des propositions et de prévoir aussi d'autres situations pour lier davantage les conceptions, les explications discursives et les symbolisations mathématiques.

Au moment de la construction de la séquence d'enseignement, nous avons pris la décision de ne pas démarrer l'enseignement par une discussion autour de phénomènes familiers aux élèves, tels le phénomène de réfrigération, le phénomène lié à l'effet de la température sur le volume d'air dans les pneus, l'utilisation des gaz dans les montgolfières. Il serait opportun de prévoir une situation initiale qui permettrait aux élèves déjà à l'entrée de discuter de leurs conceptions et d'entrevoir que les connaissances sur les gaz qu'ils construiront durant l'enseignement seront aussi des connaissances utiles pour interpréter plusieurs phénomènes familiers.

Dans la recherche de situations plus appropriées, il conviendrait aussi de monter des expériences en laboratoire qui ne comportent pas les limites de l'expérience que nous avons conçue. On pourrait aussi utiliser une simulation par ordinateur des phénomènes étudiés, comme le proposent plusieurs chercheurs en enseignement des sciences (di Sessa, 1983; Larochelle et Désautels, 1992).

Il conviendrait aussi de mieux documenter l'analyse et la gestion des situations d'enseignement, de manière à permettre à des enseignants de réaliser ces situations. Ces réalisations pourraient être analysées; ces analyses permettraient de mieux comprendre comment les positions épistémologiques et didactiques des enseignants influent sur la gestion des situations et la construction des connaissances des élèves. Les travaux réalisés par Brousseau (1996) et Salin (sous presse) montrent l'importance de réaliser de telles études didactiques.

D'autres prolongements de la recherche que nous avons menée sont possibles. Un recul plus important face aux résultats de notre recherche semble nécessaire avant d'envisager une reprise 'améliorée' de cet enseignement.

Bibliographie

- Anderson, B. (1990). Pupils' conceptions of matter and its transformations (age 12-16). *Studies in Science Education*, 18, 53-85.
- Artigue, M. (1988). Ingénierie didactique, Recherches en Didactique des Mathématiques. *La Pensée Sauvage*, 9(3), 281-308.
- Astolfi, J.P. et Develay, M. (1989). *La didactique des sciences*, Collection: Que sais-je? Paris: Presses Universitaires de France.
- Astolfi, J.P. et Drouin, A.M. (1992). La modélisation à l'école élémentaire. In INRP (éd.), *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences* (p. 115-128). Paris: Vrin.
- Audet, M. (1983). *Le procès social de la production scientifique des sociologues du Québec de 1940 à 1965*. Thèse de doctorat, Université de Montréal, Montréal, Québec.
- Bachand, L. (1992). *L'enjeu de la chimie 534 - Fascicule 1*. Montréal: Lidec.
- Bachand, L. et Petit, G. (1996). *Chimie 534*. Montréal: Lidec.
- Bachelard, G. (1967). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris: Vrin.
- Bauer, H. (1907). *A history of chemistry*. London: Edward Arnold.
- Bednarz, N. et Garnier, C. (1989). *Construction du savoir. Obstacles et Conflits*. Montréal: Agence d'Arc.
- Berg, T. et Brouwer, W. (1991). Teacher awareness of student alternate conceptions about rotational motion and gravity. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(1), 3-18.
- Berthelot, R. et Salin, M.H. (1992). *L'enseignement de l'espace et de la géométrie*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, Bordeaux, France.
- Blanché, R. (1969). *La méthode expérimentale et la philosophie de la physique*. Paris: Armand Colin.
- Briand, J. et Chevalier, M.C. (1995). *Les enjeux didactiques dans l'enseignement des mathématiques*. Paris: Hatier.
- Brousseau, G. (1986). *Théorisation des phénomènes d'enseignement des mathématiques*. Thèse de doctorat d'État, Université de Bordeaux 1, Bordeaux, France.
- Brousseau, G. (1996). Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. In J. Brun (éd.), *Didactique des mathématiques* (p. 43- 113). Lausanne: Delachaux et Niestlé.
- Brun, J. (1994). Évolution des rapports entre la psychologie du développement cognitif et la didactique des mathématiques. In M. Artigue, R. Gras, C. Laborde et P. Tavignot (éds.), *Vingt ans de didactique des mathématiques en France - Hommage à Guy Brousseau et Gérard Vergnaud* (p. 67-83), Grenoble: La Pensée Sauvage.

- Brun, J. et Conne, F. (1990). Analyses didactiques de protocoles d'observation du déroulement de situations. *Éducation et Recherche*, 3, 261-186.
- Camacho, M. et Good, R. (1989). Problem solving chemical equilibrium: successful versus unsuccessful performance. *Journal of Research in Science Teaching*, 26(3), 251-272.
- Carey, S. (1986). Cognitive science and science education. *American Psychologist*, 41(10), 1123-30.
- Chevallard, Y. (1989). Le passage de l'arithmétique à l'algèbre dans l'enseignement des mathématiques au collège. *Petit x*, 19, 43-72.
- Chevallard, Y. (1991). Dimension instrumentale, dimension sémiotique de l'activité mathématique. *Séminaire de didactique des mathématiques et de l'informatique, année 1990-1991*, 122, 103-117.
- Chevallard, Y. (1992). Concepts fondamentaux de la didactique: perspectives apportées par une approche anthropologique. *Recherches en didactique des mathématiques*, 12(1), 73-111.
- Chomat, A., Larcher, C., et Méheut, M. (1992). Modèle particulière et démarches de modélisation. In J.L. Martinand (éd.), *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences* (p. 119-169). Paris: INRP.
- Closset, J.L. (1983). D'où proviennent certaines erreurs rencontrées chez les élèves et les étudiants en électro-cinétique?. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 657, 81-102.
- Confrey, J. (1990). A Review of the Research on Student Conceptions in Mathematics, Science and Programming. In C.B. Cazden (éd.), *Review of research in education* (p. 3-56). Washington, D.C.: American Educational Reserach Association.
- Conne, F. (1992). Savoir et connaissance dans la perspective de la transposition didactique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 12(2.3), 221-270.
- Désautels, J., Anadon, M. et Larochelle, M. (1988). *Le culte de la sciences. Les programmes d'enseignement des sciences en question*. Québec: Université Laval, Laboratoire de recherches sociologiques.
- di Sessa, A. (1981). *Phenomenology and the evolution of intuition, Division for study and research in education*. Massachusetts Institute of Technology.
- Driver, R. (1985). *Children's ideas in science*. Milton, Keynes: Open Unversity Press.
- Duschl, R. et Gitomer, D. (1991). Epistemological perspectives on conceptual change: Implications for educational practice. *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 839-858.
- Duschl, R., Hamilton, R. et Grandy, R. (1990). Psychology and epistemology: Match or mismatch when applied to science education? *International Journal of Science Education*, 12, 220-243.
- Erickson, G. et Driver, R. (1983). Theories-in-action: some theoretical and empirical issues in the study of students' conceptual framework in science. *Studies in Science Education*, 10, 37-60.

- Farran, H. (1992). *Explorer la matière et l'énergie*. Montréal: Commission des écoles catholiques de Montréal.
- Fourez, G. (1988). *La construction des sciences. Introduction à la philosophie et à l'éthique des sciences*. Bruxelles: De Boeck.
- Gilbert, S.W. (1991). Model building and a definition of science. *Journal of Research in science teaching*, 28(1), 73-79.
- Giordan, A. et De Vecchi, G. (1987). *Les origines du savoir. Des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques*. Neuchâtel: Delachaux et Niestlé.
- Halbwachs, F. (1974). *La pensée physique chez l'enfant et le savant*. Neuchâtel: Delachaux et Niestlé.
- Heller, P.M., Ahlgren, A., Post, T., Behr, M. et Lesh, R. (1989). Proportional reasoning: the effect of two context variables, rate type, and problem setting. *Journal of Research in Science Teaching*, 26(3), 205-220.
- Johsua, S. et Dupin, J.J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Kesidou, S. et Duit, R. (1993). Students' conceptions of the second law of thermodynamics - An interpretative study. *Journal of Research in Science Teaching*, 30, 85-106.
- Kesidou, S., Duit, R. et Glynn, S.M. (1995). Conceptual Development in Physics: Student' Understanding of Heat. In S. Glynn et R. Duit (éds.), *Learning Science in the Schools: Research Reforming Praticice*, (179-198). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Kieren, T.E. (1988). Personal Knowledge of Rational Numbers: Its Intuitive and Formal Development. In J. Hiebert et M. Behr (éds.), *Number Concepts and Operations in Middle Grades*. Reston, Virginia: Lawrence Erlbaum.
- Kieren, T.E. (1989). *Rational and fractional Numbers as Mathematical and Personal Knowledge: Implications for Curriculum and Instruction*. Document de Travail, Université d'Alberta.
- Koyré, A. (1973). *Études d'histoire de la pensée scientifique*. Paris: Gallimard.
- Kuhn, T.S. (1983). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris: Flammarion.
- Kuhn, T. (1993). Science as argument: Implications for teaching and learning scientific thinking. *Science Education*, 77, 319-338.
- Lahaie, R., Papillon, L. et Valiquette, P. (1976). *Éléments de chimie expérimentale*. Montréal: HRW.
- Lakatos, I. et Musgrave, A. (1974). *Criticism and the Growth of Knowledge*. Cambridge: Cambridge University Press. (1er éd. 1970)
- Larkin, J., McDermott, J., Simon, D.P. et Simon, H.A. (1980). Expert and novice performance in solving physics problems. *Science*, 208-215.

- Larochelle, M. et Désautels, J. (1992). *Autour de l'idée de science, itinéraires cognitifs d'étudiants et d'étudiantes*. Laval: Les Presses de l'Université Laval.
- Latour, B. (1989). *La science en action*. Paris: La Découverte.
- Legendre, R. (1993). *Dictionnaire actuel de l'Éducation*. Paris-Montréal : Larousse
- Lemeignan, G. et Weil-Barais, A. (1998). Gestion d'activité de modélisation en classe. *Aster*, 7, 121-141.
- Lemoyne, G. et Gauthier, D. (1996). Les rapports d'élèves du secondaire à des écritures mathématiques. In A. Antib (éd.), *Actes de la Commission internationale pour l'enseignement des mathématiques*, (p. 85-93). Toulouse: Université Paul Sabatier.
- Lockemann, G. (1959). *The story of chemistry*. New York: Philosophical Library.
- McClellan, A.L., Pimentel, G.C. et MacNab, K. (1963). *Chemistry - An experimental science*. San Francisco: Freeman.
- Mercier, A. (1992). *L'élève et les contraintes temporelles de l'enseignement: un cas en calcul algébrique*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, Bordeaux, France.
- Mercier, A. (1995). Le traitement public d'éléments privés du rapport des élèves aux objets de savoir mathématiques. In G. Arsac, J. Gréa, D. Grenier et A. Tiberghien (éds.), *Différents types de savoirs et leur articulation*, (p.145-169). Grenoble: La Pensée Sauvage.
- Morf, A. (1985). L'enseignement fait-il avancer les sciences? *Conjonctures et politique*, 7, 131-140.
- Mugny, G. (1985). *Psychologie sociale du développement cognitif*. Berne: Peter Lang.
- Noelting, G. et Béland, A. (1988). *Échelle de développement cognitif portant sur la notion de rapport*. Rapport de recherche, Université Laval, Ste-Foy, Québec.
- Orange, C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie - quels apprentissages pour le lycée*. Paris: Presses Universitaires de France, coll. l'éducateur.
- Papert, S. (1981). *Jaillissement de l'esprit*. Paris: Flammarion.
- Pascal, D. (1980). *Le problème du zéro. L'économie de l'échec dans la classe et la production de l'erreur*. Mémoire de maîtrise, Université d'Aix-marseille II et Université de Bordeaux I, Bordeaux, France.
- Piaget, J. (1970). *L'épistémologie génétique*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Piaget, J. (1974a). *La prise de conscience*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Piaget, J. (1974b). *Réussir et comprendre*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Piaget, J. et Garcia, R. (1983). *Psychogénèse et histoire des sciences*. Paris: Flammarion.
- Piaget, J. et Inhelder, B. (1962). *Le développement des quantités physiques chez l'enfant*. Paris: Delachaux.

- Pfundt, H. et Duit, R. (1994). *Bibliography: Students' Alternative Frameworks and Science Education* (IPN Reports-in-Brief). Riel, Germany: Institute for Science Education, University of Keil (4e édition).
- Posner, G.J., Strike, K.A., Hewson, P.W. et Gertzog, W.A. (1982). Accomodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211-227.
- Régnier, A. (1974). *La crise du langage scientifique*. Paris: Anthropos.
- Ricco, G. (1982). Les premières acquisitions de la notion linéaire chez l'enfant de 7 à 11 ans. *Educational Studies in Mathematics*, 13, 289-327.
- Rissland, E. (1985). The structure of knowledge in complex domains. In S. Chipman, J. Segal et R. Glaser (éds.), *Thinking and learning skills*, 2, 107-125. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Robardet, G. (1989). Utiliser les notions-problèmes pour enseigner les sciences-physiques. *Petit x*, 23, 61-70.
- Rouchier, A. (1991). *Étude de la conceptualisation dans le système didactique en mathématiques et informatique élémentaire: proportionnalité, structures itérativo-récurrentes, institutionnalisation*. Thèse de doctorat d'État, Université d'Orléans, Orléans, France.
- Ruel, F. (1986). *Mise en évidence de quelques obstacles épistémologiques chez les élèves du secondaire V*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Ste-Foy, Québec.
- Salin, M.H. (à paraître). Pratiques ostensives des enseignants et contraintes de la relation didactique. In F. Conne et G. Lemoyne (éds.), *Regards sur le cognitif en didactique des mathématiques* (xxx pages). Actes du symposium du Réseau international de recherche en éducation et formation, Montréal (1996). Ouvrage soumis aux Presses de l'Université de Montréal.
- Schauble, L., Klopfer, L.E. et Raghavan, K. (1991). Students' Transition from an Engineering Model to a Science Model of Experimentation. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), 859-882.
- Séré, M.G. et Moppert, M. (1989). Présentation d'un modèle particulière cinétique des gaz a des élèves de 6ième. *Petit x*, 21, 31-42.
- Serres, M. (1989). *Éléments d'Histoire des sciences*. Paris: Bordas.
- Stavy, R. (1988). Children's Conception of gas. *International Journal of Science Education*, 10, 553-566.
- Stavy, R. (1991). Using analogy to overcome misconceptions about conservation of matter. *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 305-313.
- Stavy, R. (1994). States of Matter-Pedagogical Sequence and Teaching Strategies based on Cognitive Research. In P. Fenshan, R. Gunstone et R. White (éds.), *The Content of Science* (p. 221-236). London: Falmer Press.

- Stavy, R. (1995). Conceptual Development of Basic Ideas in Chemistry. In S.M. Glynn et R. Duit (éds.), *Learning Science in the Schools: Research Reforming practice* (131-154). Hillsdale: Lawrence Erlbaum.
- Steen, L.A. (1987). Mathematic education: A predictor of scientific competitiveness. *Science*, 237-251.
- Thagard, P. (1990). The conceptual structure of the chemical revolution. *Philosophy of Science*, 57, 183-209.
- Thouin, M. (1996). *Introduction aux sciences de la nature. Concepts de base, percées historiques et conceptions fréquentes*. Québec: Les Editions MultiMondes.
- Thuillier, P. (1971). Comment se constituent les théories scientifiques? *La Recherche*, 2(13), 537-554.
- Thuillier, P. (1972). *Jeux et enjeux de la science: essais d'épistémologie critique*. Paris: Laffont.
- Thuillier, P. (1980). *Le petit savant illustré*. Paris: Seuil.
- Tiberghien, A. (1980). Mode and conditions of learning: Learning some aspects of the concept of heat. In W.F. Archenhold, R.H. Driver, A. Orton et C. Wood-Robinson (éds.), *Cognitive Development Research in Science and Mathematics*, Leeds: University of Leeds Press.
- Treagust, D.F. (1995). Diagnostic assessment of students' science concepts. In S. Glynn et R. Duit (éds.), *Learning science in the schools: Research reforming practice*, (p. 327-346). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Vergnaud, G. (1991). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en didactique des Mathématiques*, 10(2-3), 133-170.
- Viennot, L. (1989). Tendance à la réduction fonctionnelle; obstacle au savoir scientifique et objet de consensus. In N. Bednarz et C. Garnier, (éds.), *Construction du savoir. Obstacles & Conflits* (p. 84-92). Montréal: Agence d'Arc.
- Vosniadou, S., Brewer, W.F. (1987). Theories of knowledge restructuring in development. *Review of Educational Research*, 57, 51-67.
- Walliser, B. (1977). *Systèmes et modèles*. Paris: Seuil.
- Weil-Barais, A. (1994). Les apprentissages en sciences physiques. In G. Vergnaud (coord.), *Apprentissages en didactiques, où en est-on?*, (243-271). Paris: Hachette.
- Wiser, M. et Carey, S. (1983). When heat and temperature were one. In D. Gentner et A. Stevens (éds.), *Mental models*, (267-297). Hillsdale, NJ: Erlbaum.