

L'algorithmisation-refuge, obstacle à la conceptualisation L'exemple de la thermochimie en 1^{er} cycle universitaire

**To take refuge in algorithms an obstacle
to conceptualization
The example of thermochemistry in
freshman chemistry course**

Roger BARLET, Géraldine MASTROT

LIDSE
Université Joseph Fourier, Grenoble 1
BP 53
38041 Grenoble cedex, France.

Résumé

Dans le cadre des exercices quantitatifs en chimie et de leur modelage par le type d'évaluation dominant à l'Université, ce texte étudie les rapports entre l'algorithmisation et la thermochimie en premier cycle universitaire. L'étude a été menée à partir des manuels et de l'analyse des réponses à un questionnaire enseignant et un questionnaire étudiant. Elle montre, de façon convergente, que l'aspect calculatoire, à travers des algorithmes de résolution très reproductifs, l'emporte sur la conceptualisation. Si les étudiants s'adaptent assez bien, à l'intérieur du contrat didactique classique,

aux procédures algorithmiques, ils présentent, en revanche, un important déficit conceptuel et une méconnaissance des fondements de ces procédures. Diverses propositions didactiques destinées à favoriser l'apprentissage-appropriation sont explicitées.

Mots clés : *algorithmisation, conceptualisation, thermochimie, contrat didactique, évaluation.*

Abstract

First, we remind the importance of quantitative exercises in chemistry and their adjustment by the main evaluation mode at University. Then, the study of relationship between algorithmization and thermochemistry in first year of university is accomplished through textbooks, questions to know views of teachers and tests for students. The present study shows that calculatory aspect is prevailing over conceptualization. Students, within education contract, shows good adaptability to use algorithmic procedures but are failing in conceptual understanding of the background of these procedures. Propositions, in education field, are made to favorize understanding, particularly by use of qualitative evaluation focused on concepts and phenomens and by a dialectic relation between concepts as tools of resolution and as objects of learning.

Key words : *algorithmization, conceptualization, thermochemistry, education contract, évaluation.*

Resumen

En el marco de los ejercicios cuantitativos en química y de su modelaje por el tipo de evaluación dominante en la Universidad, este texto estudia las relaciones entre la algoritmización y la termoquímica en el 1er ciclo universitario. El estudio ha sido realizado a partir de manuales y del análisis de las respuestas obtenidas de un cuestionario aplicado a los docentes y otro a los estudiantes. La investigación muestra, de manera convergente, que el aspecto calculatorio, a través de los algoritmos de resolución muy reproductivos, lo lleva a la conceptualización. Si los estudiantes se adaptan bien, al interior del contrato didáctico clásico, a los procedimientos algorítmicos, ellos presentan, por el contrario, un importante déficit conceptual y un desconocimiento de los fundamentos de esos procedimientos. Diversas proposiciones didácticas destinadas a favorecer el aprendizaje-apropiación son explicadas.

Palabras claves : *algoritmización, conceptualización, termoquímica, contrato didáctico, evaluación.*

INTRODUCTION

Dans l'apprentissage scientifique les mécanismes cognitifs peuvent être mobilisés de façon duale. Leur mobilisation un peu mécanique, sans implication personnelle, par simple application de formules, relève d'un apprentissage passif et transmissif. Au contraire, leur mobilisation dans une démarche d'appropriation active, de résolution de problèmes, relève du schéma d'apprentissage constructiviste permettant d'affronter et éventuellement de franchir les obstacles cognitifs et didactiques.

La chimie, science éminemment expérimentale, présente, sur le plan de l'apprentissage, une **entrée qualitative et modélisée**, fondée sur la compréhension des nombreux faits expérimentaux, et une **entrée quantitative** exploitant des mesures et des calculs liés aux phénomènes observés, même si cette entrée est moins lourde qu'en physique. Mais ces deux entrées peuvent être pénétrées, l'une comme l'autre, de cette dualité transmission/construction, passivité/activité.

Les **algorithmes de résolution des problèmes quantitatifs**, dans lesquels les procédés ou les techniques mis en oeuvre occupent un espace pédagogique important, peuvent déboucher, en fonction de la dualité précédente, sur des obstacles ou difficultés de nature didactique.

Ce sont ces obstacles que nous proposons d'analyser, à partir d'une expérimentation menée en premier cycle scientifique universitaire (Mastrot, 1995), dans le domaine de la thermochimie c'est-à-dire des échanges d'énergie thermique qui accompagnent les réactions chimiques.

1. CADRE THÉORIQUE D'ÉTUDE : LES RAPPORTS ENTRE ALGORITHMISATION ET ÉVALUATION

1.1. Les exercices quantitatifs en chimie

La résolution des exercices de chimie quantitative, impliquant formules, expressions et applications numériques, fait maintenant partie du *fonds commun* d'apprentissage du lycéen ou de l'étudiant. Cette pratique « coutumière » d'exercices-types est largement modelée par le mode d'évaluation, tel qu'il fonctionne au baccalauréat ou dans les premiers cycles universitaires.

Pourtant l'exercice-type ne fonde pas toujours un réel apprentissage. La prégnance des programmes et des examens débouche trop souvent sur la mise en oeuvre d'exercices prototypiques et sur la capacité à reproduire des formules prêtes à l'emploi, particulièrement en première

année d'université. En DEUG première année¹ il nous semble en effet que la modularisation et le cloisonnement des savoirs qui lui est souvent lié favorisent cette tendance. La mobilisation d'algorithmes prend ainsi le pas sur la capacité à résoudre de véritables problèmes de chimie. Nous entendons par algorithmes des procédures automatiques de calcul, appliquées selon des schémas types, sans contextualisation de la situation expérimentale et sans évaluation des limites de la modélisation utilisée.

Une prise de conscience nette de ces difficultés s'est faite jour et s'est affirmée au début des années 90 (Pickering, 1990 ; Goffard, 1993). Elle a été rappelée récemment (Schowb & Blondel, 1996) : l'enseignement d'algorithmes de résolution ne suffit pas à assurer l'acquisition conceptuelle nécessaire à la compréhension profonde de la chimie. On a pu montrer également que l'évaluation par la résolution de problèmes peut renforcer l'approche symbolique, distincte des approches macroscopique ou microscopique, et qu'elle est porteuse d'intérêt didactique (Laugier & Dumon, 1994).

À l'arrivée à l'Université, il faut ajouter, à ce constat d'ensemble, l'existence, chez les lycéens, de conceptions relatives à la réaction chimique et aux changements d'état (Anderson, 1990) ainsi que le défaut de construction du concept de substance (Solomonidou & Stavridou, 1994).

1.2. Le contrat didactique et « la fiction didactique »

Dans la transposition didactique « interne » c'est-à-dire dans le passage du « *savoir à enseigner* » au « *savoir enseigné* », l'appropriation des connaissances est sous la dépendance du contrat didactique. « *Pour Y. Chevallard le contrat didactique définit les droits et devoirs des élèves, les droits et devoirs de l'enseignant et, par cette division des tâches, partage et limite les responsabilités de chacun* » (Bessot & Le Thi Hoai, 1994, p. 39).

Dans ce contrat, largement implicite, l'activité de préparation aux examens partiels ou aux examens de fin d'année, telle qu'elle s'exerce dans les travaux dirigés à l'Université, tient une place essentielle. Si l'examen porte sur des types d'exercices différents, l'étudiant ressentira cet écart comme une rupture du contrat et reprochera aux enseignants de recourir à des contrôles non conformes aux activités de l'année.

Il s'agit donc moins pour l'étudiant d'accéder à un approfondissement des connaissances que de passer en revue les différents algorithmes à mettre en oeuvre pour répondre à une situation d'évaluation précise et s'y préparer sans surprise. L'enseignant accompagne souvent cette dérive.

C'est dans ce cadre, sous la pression du contrat didactique, que s'opère la création d'algorithmes : « *Le maître montre l'algorithme, l'élève l'apprend et « l'applique » correctement* » (Brousseau, 1986, p. 61).

Ce processus pèse lourdement dans l'enseignement des sciences, pour Chevallard et al., « *la domination par les élèves de formalismes, de procédures fiables et d'algorithmes est en tout état de cause un objectif majeur d'un enseignement scientifique* » (Johsua & Dupin, 1993, p. 342). Le recours à des algorithmes est largement revendiqué pour la résolution des problèmes de chimie à condition qu'ils soient utilisés comme simples outils (Schrader, 1987).

Ce processus d'algorithmisation, qu'il ne s'agit pas de récuser *a priori*, est un mode de fonctionnement adapté aux contraintes du système didactique (programmes, faible volume du temps didactique, cloisonnement des enseignements, etc.) comme le prouve sa longévité et sa position souvent hégémonique.

Au total, l'enseignant, dans le cadre du contrat didactique, propose aux étudiants des algorithmes censés faciliter l'apprentissage des concepts abordés. L'étudiant, de son côté, se contente d'appliquer et de reproduire sans chercher à donner du sens à l'algorithme. On est alors en pleine « fiction didactique » :

- l'enseignant croit procurer à l'étudiant les moyens de parvenir à un véritable apprentissage ;
- l'étudiant pense avoir acquis les concepts dont il est question parce qu'il les manipule à travers des algorithmes qu'il est davantage capable de répéter que d'adapter à des situations nouvelles.

2. CHAMP D'ÉTUDE : LA THERMOCHIMIE EN PREMIÈRE ANNÉE DE DEUG

2.1. Les difficultés didactiques de la thermodynamique chimique

En thermodynamique chimique émergent de nombreuses difficultés conceptuelles, langagières et calculatoires. L'observation régulière de résultats médiocres dans ce domaine est une constante des évaluations en première année d'Université. On peut observer que les publications concernant la didactique de la thermodynamique chimique sont relativement rares, spécialement en ce qui concerne le premier principe réputé beaucoup moins problématique pour les étudiants que le second principe. La littérature

relève cependant les nombreuses difficultés, relatives aux deux principes de la thermodynamique. En y ajoutant notre propre perception on peut en dresser la typologie suivante :

- charge d'abstraction très lourde (Onillon, 1985) qui requiert le niveau des opérations formelles de Piaget ;
- dualité abstraction-application à des problèmes concrets (Balesdent, 1985) ;
- formalisme mathématique et axiomatisation (Lesoult, 1985 ; Sanfeld, 1988) ;
- terminologie complexe et rigoureuse dont un bel exemple est donné par l'utilisation des états de référence ;
- notion de fonctions d'état dont les variations, indépendantes du chemin suivi, sont entièrement définies par l'état initial et l'état final et qui sont caractérisées sur le plan mathématique par l'existence d'une différentielle totale exacte ;
- définition des grandeurs thermodynamiques pour une mole d'avancement ;
- distinction entre chaleur, travail et température (Tripp, 1976 ; Rist, 1985 ; Barrow, 1988) ;
- changement d'état, « chaleur latente » de changement d'état ;
- notion de réversibilité thermodynamique difficile à représenter expérimentalement et source de confusion avec l'équilibre chimique.

Plusieurs auteurs suggèrent de « *bâtir la thermodynamique sur le concret et son explication* » (Bertrand, 1988, p. 12) et pensent que la clé de la compréhension de cette discipline passe par l'appréciation de son lien intime avec l'expérience (Blandamer & Burgess, 1987). D'autres n'hésitent pas soit à déconseiller l'enseignement de la thermodynamique en première année d'Université, du fait de son caractère théorique, soit à proposer un enseignement amputé (étude de la loi de Hess et de ses applications quantitatives sans connaissance de la fonction d'état ou de l'enthalpie) (Battino, 1979). Plusieurs stratégies pédagogiques apparaissent donc possibles.

2.2. Le choix d'étude de la thermochimie

Nous avons choisi de limiter notre champ d'étude au premier principe et à l'utilisation des grandeurs thermodynamiques U (énergie interne) et H (enthalpie), appliquées aux échanges de chaleur accompagnant les réactions chimiques.

Cette limitation de notre champ d'investigation à la thermochimie nous paraît ainsi de nature à permettre une meilleure analyse des obstacles. La thermochimie est bien représentative des obstacles conceptuels qui apparaissent dans l'enseignement de la thermodynamique et relève point par point de chacune des difficultés précisées plus haut. Elle s'arrête cependant à un premier palier permettant de mieux circonscrire ces difficultés en évitant l'abstraction et la mathématisation supplémentaires liées à l'entropie, à l'enthalpie libre, à l'énergie libre et au potentiel thermodynamique.

L'étude dans le champ de la thermochimie, en première année d'Université, est d'autant plus intéressante que cette discipline n'est pas traitée, en tant que telle, au lycée. Quelques notions sur l'énergie et sa conservation ainsi qu'un peu de calorimétrie ont été introduites au secondaire, en première S (première scientifique) dans les programmes de 1988 et dans les nouveaux programmes de 1993, avec dans ce dernier cas, la définition de la chaleur de réaction et « *une première interprétation en relation avec les énergies moyennes de liaison* » (Bulletin officiel de l'Éducation nationale du 24 septembre 1992, p. 48).

À l'entrée de l'Université la « chance » de la thermochimie est donc d'avoir été à peine entrevue et de ne véhiculer que peu d'obstacles didactiques, en particulier ceux liés à la terminologie et à la charge d'abstraction. Elle reste alors largement une découverte.

2.3. Trois hypothèses de recherche

Dans la perspective d'une telle étude d'analyse du processus d'algorithmisation, nous avons cherché à vérifier trois hypothèses de recherche.

Première hypothèse : elle s'inscrit dans le droit fil de l'analyse introductive sur algorithmisation et évaluation. En première année d'Université l'enseignement du premier principe conduit à privilégier, sous la pression du mode d'évaluation, l'apprentissage de procédures et de méthodes de calcul. La compréhension globale des phénomènes et des concepts reste alors à la charge de l'étudiant.

Deuxième hypothèse : les étudiants ne relient pas entre elles les différentes notions enseignées en thermochimie en particulier premier principe, fonction d'état, loi de Hess et calcul des chaleurs de réaction.

Troisième hypothèse : les étudiants sont en mesure de résoudre un exercice mobilisant les méthodes de détermination indirecte des chaleurs de réaction, c'est-à-dire les algorithmes nécessaires, mais face à un exercice

« innovant », par défaut de conceptualisation, ils ne savent pas adapter ces algorithmes.

L'analyse du texte du savoir (programmes et manuels précisant le savoir à enseigner) et des réponses à un questionnaire auprès des enseignants (savoir enseigné) permettra de tester la première hypothèse. L'analyse des réponses des étudiants à un questionnaire en trois parties sur la thermochimie permettra de tester la deuxième et la troisième hypothèse.

3. ÉTUDE DU SAVOIR À ENSEIGNER ET DU SAVOIR ENSEIGNÉ

Les données analysées sur le « savoir à enseigner » ont été recueillies d'une part à partir des programmes de première année d'Université, en liaison avec les programmes du lycée, d'autre part à partir des manuels universitaires. Le « savoir enseigné » est analysé à partir des résultats d'un questionnaire proposé aux enseignants.

3.1. Les programmes

Notre expérimentation a été menée avec des étudiants de première année lors de l'année universitaire 94-95. Ces étudiants ont donc accompli leur scolarité au lycée, en particulier en première S, dans le cadre du programme de 1988. C'est donc ce programme que nous examinerons avant de nous intéresser aux changements apportés par les nouveaux programmes en 1993.

3.1.1. Première S

Dans les programmes de 1988 la conservation de l'énergie est abordée par des exemples de transformation de travail en chaleur (exemple : freinage d'un véhicule). Il s'agit de montrer que travail et chaleur « *ont un rôle équivalent du point de vue bilan énergétique et que l'énergie se conserve globalement* » (supplément au Bulletin officiel de l'Éducation nationale, n° 21 du 2 juin 1988, pp. 63-64). En calorimétrie, abordée en travaux pratiques, on montre que la production de chaleur peut être due aux réactions chimiques (combustions). La chaleur peut être fournie ou absorbée par le système. Elle peut entraîner une augmentation de température ou un changement d'état à température constante. Il doit être précisé que « *le bilan calorimétrique ne dépend que de l'état initial et de l'état final.* » (supplément au Bulletin officiel de l'Éducation nationale, n° 21 du 2 juin 1988, p. 64).

Dans les programmes de 1993 la notion de conservation de l'énergie est présentée en chimie sous le thème « *réactions chimiques et énergie thermique* ». On définit la chaleur de réaction et on donne « *une première interprétation en relation avec les énergies moyennes de liaison* » (Bulletin officiel de l'Éducation nationale, hors série du 24 septembre 1992, p. 48). On applique alors les notions de chaleur massique ($Q = mC\Delta t$) et de chaleur latente ($Q = mL$) et on montre que le bilan calorimétrique ne dépend que des états initial et final. On recommande cependant de ne pas introduire le terme d'enthalpie.

La présentation des premières notions de thermodynamique est donc plus large et la compréhension physique est favorisée par des liens étroits entre les phénomènes thermiques observables et le niveau microscopique. À noter cependant que dans le cadre d'un allègement des programmes, actuellement à l'ordre du jour, l'enseignement de l'énergie en chimie serait sensiblement réduit.

3.1.2. Première année de DEUG

Il n'existe pas au niveau universitaire de programme national officiel, tout au plus un « programme commun minimum de chimie » découpé en trois parties :

- 1er principe, énergie interne, enthalpie, détermination des chaleurs de réaction ;
- 2ème principe, ordre, désordre, entropie, enthalpie libre, sens d'évolution spontanée d'une réaction ;
- équilibres chimiques, application aux solutions aqueuses.

Les objectifs d'enseignement, relatifs à la première partie, sont précisés en termes de capacité à « *définir une fonction d'état, repérer le sens des échanges d'énergie, la chaleur échangée lors d'un changement de température et/ou d'un changement d'état, calculer une chaleur de réaction à partir des enthalpies d'autres réactions par un cycle de Hess ou une combinaison algébrique de ces réactions* » (Université Joseph Fourier, 1986, p. 3).

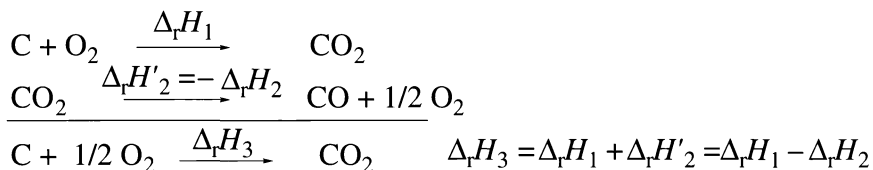
Les connaissances de base semblent donc plutôt axées sur des savoir-faire (« calculer ») que sur la compréhension de ces savoirs.

3.2. Les manuels

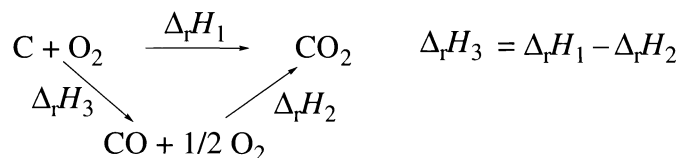
Puisque la découverte de la thermochimie, dans son côté abstrait et conceptuel, se fait à l'Université, nous avons analysé quelques ouvrages

universitaires connus en portant notre attention sur la thermochimie et en particulier sur les deux méthodes de calcul des chaleurs de réaction qui se retrouvent dans tous les manuels :

– *la méthode algébrique* résultant de la combinaison algébrique d'équations-bilans (exemple ci-dessous du calcul de l'enthalpie de formation de CO),



– *le cycle de Hess* où l'un des deux chemins thermodynamiques, entre un même état initial et un même état final, comporte la formation de l'espèce considérée (ici CO)



Les deux méthodes, assez semblables pour cet exemple simple, se distinguent très vite pour des cas plus complexes. La méthode algébrique comporte un poids algorithmique plus élevé tandis que la schématisation par chemins thermodynamiques intègre davantage de conceptualisation (fonction d'état, changement d'état et de température) comme en témoignent d'autres études sur les rapports schéma-concepts (Mottet, 1996 ; Beaufils et al, 1996).

Nous avons comparé treize manuels de niveau premier cycle, parus entre 1928 et 1995 et dont près de la moitié sont anglophones, sur les points suivants :

- quel est l'énoncé formulé pour la loi de Hess ?
- quelles sont les méthodes proposées pour le calcul des chaleurs de réaction ?
- dans ce calcul, la liaison est-elle faite avec l'aspect expérimental, le premier principe et le concept de fonction d'état (+ indique liaison, - absence de liaison, + - liaison non explicite, - + liaison avant l'énoncé de la loi) ?

auteur	année	énoncé loi de Hess	méthodes	liaison avec		
				exp.,	1 ^{er} princ.,	f. état
Butler	1928	Q_v et $Q_p = f(E_i - E_f)$	alg.+cycle	+	-	+ -
Gallais	1950	Q_v et $Q_p = f(E_i - E_f)$	alg.	+	-	+ -
Barrow	1961	non énoncée	alg. + cycle	+	+	+
Mahan	1963	ΔH indép.étapes	alg.	+	-	+
Ander & Sonnessa	1965	Q_v et $Q_p = f(E_i - E_f)$	alg.	+	+	+
Suard et al.	1971	Q_v et $Q_p = f(E_i - E_f)$	alg.+cycle	+	-	-
Arnaud	1988	Q_v et $Q_p = f(E_i - E_f)$	alg.+ cycle	+	+	- +
Huntz & Meyer	1988	non énoncé	cycle	-	-	-
Laffitte & Rouquérol	1990	$\Delta_r H = \sum \Delta_r H$	alg.	+	-	-
Fabritius	1990	$\Delta_r H = \sum \nu_i \Delta_r H$	cycle	-	-	-
Atkins	1992	$\Delta_r H = \sum \Delta_r H_i$	alg.	-	+	+
Mc Quarrie & Rock	1992	$\Delta_r H = \sum \Delta_r H_i$	alg.	-	-	+
Tuech et al.	1995	$\Delta_r H = \sum \Delta_r H_i$	alg.	-	+ -	+

Tableau 1 : Le savoir à enseigner en thermochimie à travers les manuels

On voit que la loi de Hess est énoncée de différentes façons, avec un énoncé plus ou moins mathématique (soit différence entre état final et état initial soit sommation algébrique de grandeurs enthalpiques relatives à des composés ou à des réactions).

Sur le plan des méthodes de détermination des chaleurs de réaction, malgré ses limites la méthode algébrique est davantage utilisée que le cycle de Hess « *la méthode algébrique est dépourvue de toute signification chimique mais a l'avantage d'être efficace* » (Suard et al., 1971, p. 164) ou présentée comme strictement équivalente (Arnaud, 1988, pp. 328-329).

Seulement un tiers des manuels explicitent que la loi de Hess et les méthodes qui en découlent sont des conséquences du premier principe tandis que plus de la moitié, bien que brièvement, mentionnent que l'enthalpie est une grandeur d'état.

Un tiers des manuels analysés ne parlent ni du premier principe, ni des fonctions d'état à propos des méthodes utilisées et trois d'entre eux, parmi les plus récents (Huntz & Meyer, 1988 ; Laffitte & Rouquérol, 1990 ; Fabritius, 1990), ont une présentation assez mathématisée avec le risque d'offrir des formules « recettes ».

En conclusion, alors que la conservation de l'énergie liée au premier principe devrait être un concept central, elle n'intervient que dans l'introduction à la thermochimie et disparaît plus ou moins au profit d'une mathématisation excessive et d'algorithmes de calcul. Il semble bien que **l'aspect opératoire** des calculs prenne le pas sur la **conceptualisation globale**.

3.3. Questionnaire proposé aux enseignants

Une enquête sur le savoir enseigné en thermochimie a été lancée auprès de 70 enseignants de diverses universités. Nous avons eu les réponses de 31 d'entre eux dont 29 enseignaient uniquement en premier cycle (une majorité des réponses provenaient de Grenoble, quelques-unes de Toulouse, Strasbourg et Orsay). Le questionnaire-enquête comportait 6 questions (voir en annexe 1) et les réponses peuvent être regroupées de la façon qui suit.

3.3.1. Loi de Hess

Deux formulations étaient proposées dans la question 1 :

- formulation 1 (F_1) = *la chaleur produite ou absorbée par une réaction ne dépend que de l'état initial et de l'état final ...* ;
- formulation 2 (F_2) = *l'enthalpie d'une réaction est égale à la somme algébrique des enthalpies de formation ...*

Les réponses sont les suivantes (tableau 2) :

Formulation 1	Formulation 2	Formulation 1 et 2	Autres formulations
45,2 %	32,2 %	9,6 %	12,8 %

Tableau 2 : **Pourcentages des réponses données au questionnaire (loi de Hess)**

La formulation 1 (Arnaud) constitue le premier choix parce qu'elle est bien reliée à la notion de fonction d'état, à condition, précisent quelques enseignants, de remplacer « chaleur » par « enthalpie ».

La formulation 2 (Lafitte & Rouquérol) est choisie par une minorité importante parce qu'elle est simple, claire, adaptée aux calculs et facile à mémoriser.

3.3.2. Méthodes de détermination indirecte des chaleurs de réaction

Question 2a

méthode 1	cycle de Hess	réponse M ₁
méthode 2	combinaison algébrique d'équations de réaction	réponse M ₂
méthode 3	formule $\Delta_r H^\circ = \sum \nu_i \Delta_f H^\circ_i$	réponse M ₃

Les réponses sont très partagées. Une moitié des enseignants choisit l'ensemble des méthodes tandis que l'autre moitié écarte l'une des méthodes (tableau 3).

M1	M2	M3	M1+M2+M3	M1+M2	M2+M3	M1+M3
83,9 %	74,2 %	80,6 %	48,4 %	19,3 %	6,4 %	16,1 %

Tableau 3 : Pourcentages des réponses données au questionnaire (détermination des chaleurs de réaction)

Les raisons de ces choix, lorsqu'elles sont explicitées, sont les suivantes :

- donner à l'étudiant les 3 méthodes et le laisser choisir (19 %) ;
- adapter la méthode au problème (29 %) ;
- apprendre à résoudre un problème de plusieurs façons (7 %).

Les enseignants ne considèrent donc pas que le cycle de Hess ait des vertus propres mais ils souhaitent que leurs étudiants puissent le choisir et élargir ainsi leur savoir-faire.

Question 2 c

La liaison avec la propriété des fonctions d'état est majoritairement faite et paraît un peu plus facile avec le cycle de Hess (77 % contre 61 % pour les méthodes 2 et 3).

Question 3 : comparaison entre M₁ et M₂

Majoritairement (71 %) les enseignants disent montrer l'équivalence des deux méthodes mais ils ne sont que 58 % à les comparer explicitement. Les enseignants pensent que les étudiants préfèrent M₂ (25,8 %) à M₁ (12,9 %) mais, dans un examen, ils affirment très largement leur laisser le choix de la méthode (74,2 %).

Question 4 : liaison avec le 1^{er} principe

À la question « Expliquez vous que c'est le 1er principe qui fonde

ces méthodes » la réponse est très largement positive (83,9 %). Si on se réfère à l'analyse des manuels, donnant des résultats beaucoup moins positifs, on peut penser que les enseignants ne réalisent pas que, dans leur enseignement, cette liaison n'est peut être pas aussi explicite qu'ils le pensent.

3.3.3. Intérêt, difficultés et extensivité du cycle de Hess

Question 5 : intérêt didactique du cycle de Hess

Il est remarquable de constater que 28 enseignants sur 31 voient plus d'intérêt didactique au cycle de Hess (M_1) qu'à la méthode algébrique (M_2). Les raisons données sont les suivantes :

- visualisation concrète plutôt qu'abstraction (pour 20 d'entre eux) ;
- limitation des automatismes et sollicitation de l'imagination (pour 12) ;
- généralisation plus facile (pour 10) ;
- meilleure compréhension physique (pour 10).

Les enseignants pensent que l'utilisation limitée du cycle de Hess, par les étudiants, réside dans la difficulté de sa construction et la rigueur qu'il implique avec comme difficultés secondaires les erreurs de signes et l'oubli des coefficients multiplicateurs adéquats.

Question 6 : autres utilisations du cycle

Le cycle est cependant largement utilisé pour le calcul des énergies réticulaires ou de $\Delta_r H^\circ$ avec changement de température (dans l'un et l'autre cas, 26 enseignants sur 31) et pour le calcul des énergies de liaison (22 enseignants).

3.3.4. Conclusion

Les enseignants disent expliciter les liens des diverses méthodes avec le premier principe et les fonctions d'état et apprécier **l'intérêt didactique du cycle de Hess**. En même temps, ils en mesurent les **limites** dans le cadre des **contraintes d'enseignement** et de la pression du contrat didactique. En témoigne ce commentaire « *la méthode du cycle est plus intéressante car plus formatrice mais plus longue et plus difficile à élaborer. La méthode algébrique est plus systématique et demande donc moins de réflexion. Malgré cela, par manque de temps, je me cantonne à cette seconde méthode.* »

4. ÉTUDE DES DIFFICULTÉS D'APPRENTISSAGE DES ÉTUDIANTS

4.1. Nature des données recueillies par questionnaire

Après les limites didactiques, montrées par l'étude des manuels et l'enquête auprès des enseignants, il était nécessaire de cerner avec plus de précision le savoir étudiant afin d'évaluer le degré de validation de nos hypothèses 2 et 3 de recherche. Pour cela un questionnaire a été élaboré après une pré-expérimentation, organisée dans un des groupes de travaux dirigés (TD) du DEUG A₁². Dans sa forme définitive (annexe 2) il comporte trois parties utilisant chacune une forme de questionnement différente :

- **la première partie**, relative à la *comparaison entre « méthode algébrique » et « méthode du cycle »* est composée de questions à choix multiples ou à réponses ouvertes courtes ;

- **la deuxième partie**, est un *exercice de résolution* au moyen du cycle de *Hess* ;

- **la troisième partie** est un Q-sort (items à réponse pondérée entre - 2, pas du tout d'accord et + 2, tout à fait d'accord) destiné à vérifier les degrés de certitude vis-à-vis des différentes affirmations proposées et à mesurer le *niveau de maîtrise conceptuelle des étudiants*.

4.2. Échantillon observé

Le questionnaire a été passé en séance de TD auprès de 132 étudiants pour lesquels l'enseignement de thermodynamique était terminé :

- 64 étudiants du DEUG A₁ répartis en 3 groupes appartenant à 3 sections différentes (2 h de cours et 2 h de TD hebdomadaires pendant 2 mois et demi) ;

- 68 étudiants de DEUG A₃₂³, répartis en 3 groupes appartenant à une même section (2 h de cours et 2 h de travaux dirigés hebdomadaires pendant 4 mois).

4.3. Résultats

4.3.1. Cycle de Hess et méthode algébrique (partie I du questionnaire)

Dans cette partie nous cherchons à comparer le cycle de Hess (M_1) et la méthode algébrique dans sa décomposition analytique (M_2) ou son bilan algorithmique (M_3). Les questions 1 et 2 cherchent à déterminer quelle est la méthode privilégiée par l'enseignement et la méthode spontanément préférée par les étudiants. Les questions 3 à 7 concernent les lois et principes qui fondent ces méthodes.

Questions 1 et 2

C'est la méthode du cycle de Hess (M_1) qui est globalement la plus apprise par les étudiants (61,3 % des étudiants l'ont vue en cours et TD contre 45 % pour les autres méthodes). On note cependant une nette différence entre A_1 et A_{32} :

– en DEUG A_1 , les étudiants disent avoir appris les 3 méthodes à plus de 60 % et le choix d'utilisation dépend du problème à résoudre ;

– en DEUG A_{32} , seul le cycle de Hess est majoritairement vu par les étudiants en cours et en TD ; pour ceux qui ont appris à appliquer M_1 et M_2 (question 2), la préférence va nettement au cycle de Hess (78 % contre 22 %).

Cette différenciation entre les deux publics nous amène à postuler un net effet de contrat didactique avec des réponses largement induites par les pratiques des enseignants : en DEUG A_1 , les enseignants ne paraissent pas privilégier l'une des méthodes et laissent les étudiants libres de leur choix ; au contraire, en A_{32} , les enseignants utilisent largement le cycle de Hess et préconisent l'application de cette méthode dans les examens.

Question 3

3a : l'énoncé de la loi de Hess est donné correctement par moins de 45 % des étudiants (pour 18,2 % enthalpie = fonction d'état, pour 6,8 % enthalpie de formation = fonction d'état, pour 19,7 % formule algorithmique $\Delta_r H^p = \sum \nu_i \Delta_f H_i^o$) et les réponses restent très approximatives et imprécises.

3b : la question b « Expliquez sur quelle notion physique est fondée cette loi » est laissée sans réponse par 71 % des étudiants. Seuls 15 % évoquent le premier principe, sans différence significative entre A_1 et A_{32} .

3c : la loi de Hess est également à la base de la méthode algébrique pour moins de la moitié des étudiants.

3d : l'extension de la loi de Hess, à d'autres grandeurs thermodynamiques que l'enthalpie, est connue par 72,7 % des étudiants interrogés mais 23,5 % seulement d'entre eux argumentent par la notion de fonction d'état (17,2 % en A₁, 29,4 % en A₃₂). Les grandeurs thermodynamiques citées sont d'abord l'entropie S (56 %), l'enthalpie libre G (27,3 %) et enfin l'énergie interne U (19,7 %) qui, bien que servant à énoncer le premier principe, est loin d'être sur un pied d'égalité avec H .

Question 4

Cette question relative aux enthalpies de réaction embarasse les étudiants (près de 50 % de non-réponses tant pour 4a que pour 4b) et cet embarras semble se situer entre la mesure expérimentale directe de ces enthalpies et leur détermination par le calcul. À propos de la « mesure » des enthalpies de réaction (4a), 3/4 des réponses exprimées évoquent les mesures expérimentales, en particulier calorimétriques. Cependant la question 4b (« les besoins des chimistes ») montre que peu d'étudiants (26 %) réalisent que le recours au calcul ne devient indispensable que lorsque les mesures expérimentales sont impossibles ou difficiles. Pour la majorité de ceux qui répondent, les méthodes de calcul permettent en effet de préciser, compléter, vérifier ou prévoir les résultats expérimentaux. Le rôle attribué à la théorie semble ainsi surpasser celui attribué à l'expérimental.

Parmi ceux qui donnent à ces calculs un rôle de prévision certains pensent que « ces méthodes permettent de prévoir si des réactions sont possibles ou non, de prévoir le sens d'évolution de la réaction » sans conscience des limites du premier principe qui, à l'inverse du second principe, ne permet pas une telle prévision (cf. la controverse Berthelot-Duhem à la fin du 19^{ème} siècle).

Question 5

Les étudiants sont d'accord pour associer la notion d'enthalpie à une grandeur physique mesurable, avec cependant 40 % de non-réponses. Ces grandeurs sont l'énergie et la chaleur (15,6 + 18,7 pour A₁ ; 1,4 + 29,4 pour A₃₂) mais la température est également beaucoup mentionnée.

Question 6

La propriété caractéristique d'une fonction d'état (ne dépendre que de l'état initial et de l'état final) est énoncée par 60 % des étudiants.

Question 7

« On peut déterminer la chaleur échangée au cours d'une réaction chimique en utilisant la propriété d'état » ne conduit à une réponse correcte (détermination de $\Delta_r H$ ou $\Delta_r U$) que pour 10,6 % des étudiants et plus des

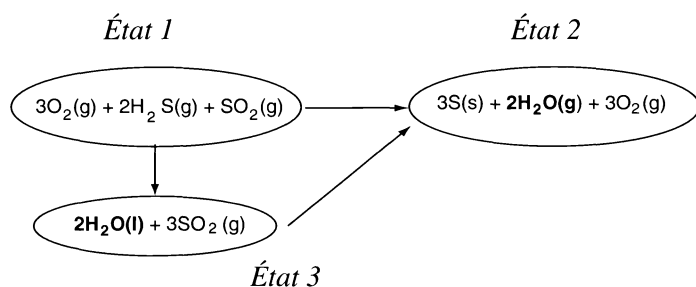
2/3 ne répondent pas. La chaleur et quelquefois la température sont énoncées comme fonctions d'état.

En conclusion de cette première partie du questionnaire, près de 45 % des étudiants énoncent la loi de Hess sous ses diverses formulations mais ils ne sont que 15,5 % à lui donner le premier principe comme fondement et 10 % à établir une relation avec la notion de fonction d'état qu'ils savent pourtant caractériser.

4.3.2. Résolution d'un exercice par le cycle de Hess (partie II du questionnaire)

• Méthode d'analyse

Nous avons délibérément choisi, dans cette détermination de



l'enthalpie de formation de SO_2 à 298 K, de ne pas demander d'application numérique pour éviter que les problèmes de calcul n'interfèrent avec ceux de thermochimie.

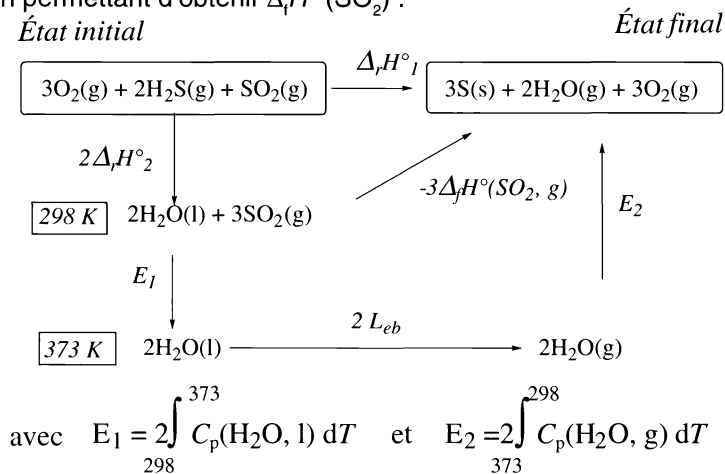
Pour obliger au choix du cycle de Hess comme méthode de résolution et limiter la difficulté nous avons proposé de compléter le cycle ci-dessous. Ce cycle déjà partiellement structuré est inachevé puisque H_2O y figure sous deux états physiques différents et qu'il convient d'assurer le passage d'un état à l'autre :

L'analyse *a priori* amenait à 4 stratégies prévisibles :

- S_1 , stratégie optimale intégrant correctement le changement d'état ;
- S_2 , stratégie ignorant le changement d'état à 298 K ;
- S_3 , stratégie avec changement d'état à 298 K ;
- S_4 , stratégie avec changement d'état ne prenant en compte que le changement de température.

La *stratégie S₁* implique diverses étapes de résolution (l'ordre peut en être éventuellement modifié). Il s'agit d'amener l'eau à sa température de changement d'état, d'opérer le changement d'état et de ramener l'eau à la température initiale de 298 K. Le problème est assez bien circonscrit puisque pour boucler le cycle, déjà largement ébauché, il suffit de travailler sur l'eau dont les deux états physiques différents apparaissent clairement dans l'ébauche fournie, même s'ils ne font pas l'objet d'un questionnement direct. On peut, si on explicite tout, repérer 14 étapes.

- 1 – Trouver l'équation-bilan correspondant à $\Delta_r H$ demandé :
[il s'agit de $S(s) + O_2(g) \rightarrow SO_2(g)$].
- 2 – Repérer les équations-bilans, données dans l'énoncé et les placer sur le cycle.
- 3 – Appliquer le coefficient 2 à l'équation (2) pour passer de l'état 1 à l'état 3.
- 4 – Retrouver la réaction de formation de SO_2 , présentée de façon inverse dans le cycle, avec coefficient 3.
- 5 – Faire le passage de $H_2O(l)$ à $H_2O(g)$ entre les états 3 et 2.
- 6 – « Élever » H_2O à 373 K.
- 7 – Faire passer l'eau de l'état liquide à l'état gazeux à 373 K avec la chaleur latente adéquate.
- 8 – Faire « redescendre » H_2O à 298 K.
- 9 – Ne pas oublier le coefficient multiplicatif 2 dans les 3 étapes précédentes.
- 10 – Différencier les C_p de $H_2O(l)$ et $H_2O(g)$.
- 11 – Donner les bornes exactes des intégrales.
- 12 – Choisir un état initial (EI) et un état final (EF) pour écrire la relation permettant d'obtenir $\Delta_r H^\circ(SO_2)$:



13 – Écrire que la variation d'enthalpie entre état initial et état final est la même :

$$\Delta_r H^\circ_1 = 2\Delta_r H^\circ_2 + E_1 + 2L_{\text{eb}} + E_2 - 3\Delta_f H^\circ(\text{SO}_2, \text{g})$$

14 – En tirer mathématiquement $\Delta_r H^\circ(\text{SO}_2, \text{g})$.

Les autres stratégies négligent chaque fois une ou plusieurs étapes :

- la *stratégie* S_2 oublie les étapes 5 à 11 ;
- la *stratégie* S_3 oublie les étapes 6, 8, 10, 11 et envisage l'étape 7 à 298 K ;
- la *stratégie* S_4 oublie l'étape 7.

L'étude des réponses nous a amenés à observer une cinquième stratégie S_5 que nous n'avions pas prévue dans l'analyse *a priori* : S_5 est identique à S_3 , avec changement d'état à 298 K mais avec $T_{\text{vap}}(\text{H}_2\text{O})$, pris à la place de la chaleur latente, comme variation d'enthalpie (confusion entre chaleur et température).

• Conclusions

Les cinq stratégies identifiées sont inégalement utilisées :

- S_1 est utilisée par 12,5 % des étudiants de A_1 et 42,6 % des étudiants de A_{32} (au total 28 % des étudiants) ; cette stratégie en 14 étapes conduit au bon résultat mais sa relative complexité peut expliquer qu'elle soit mobilisée par moins d'un tiers des étudiants ; elle se situe cependant en tête des 5 stratégies ;

- S_2 rassemble globalement 16,7 % des étudiants qui choisissent d'ignorer purement et simplement le changement d'état de l'eau ;

- S_3 regroupe 25 % des étudiants de chacune des deux filières ;

- S_4 n'est appliquée que marginalement (3 %) ;

- S_5 , qui montre une confusion importante entre température et chaleur, est utilisée par 11 % des étudiants en A_1 et 1,5 % des étudiants en DEUG A_{32} .

L'application d'une des 5 stratégies s'accompagne aussi de 3 types d'erreurs :

- utilisation d'un seul C_p pour $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ et $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ dans les stratégies S_1 et S_4 (13 % des étudiants, erreur trois fois plus fréquente en A_{32} qu'en A_1) ;

- erreurs de coefficients multiplicatifs des enthalpies (plus de 30 % des étudiants) ;

– erreurs dans le signe des enthalpies (17,5 %, deux fois plus fréquente en A_{32}).

Au travers de ces résultats on voit que le changement d'état n'est pas maîtrisé par les étudiants (sauf les 28 % qui utilisent S_1) et que la filière A_{32} réussit mieux que la filière A_1 dans la stratégie de résolution malgré des erreurs numériques et de signes plus importantes. L'identification de l'état initial et de l'état final et son utilisation dans le calcul ne sont faites que par une minorité (13,5 %), trois fois plus élevée en A_{32} (18,3 %) qu'en A_1 (6,8 %).

• Contrat didactique classique et contrat nouveau

Dans la gestion des données, le contrat didactique implicite est le suivant : l'enseignant doit fournir à l'élève toutes les données nécessaires à la résolution et l'élève doit utiliser, dans la résolution, toutes ces données. Reprenons une citation de Chevallard : « *Un problème proposable possède une réponse et une seule ; pour parvenir à cette réponse toutes les données proposées doivent être utilisées, aucune autre indication n'est nécessaire* ». (Chevallard, cité par Joshua et Dupin, 1993, p. 267).

Notre expérimentation, comme un certain nombre de sujets d'examen ne respecte pas ce contrat classique : bien qu'il ne s'agisse pas ici, dans la deuxième partie du questionnaire, d'un exercice numérique, toutes les données physiques nécessaires ne sont pas fournies. Les indications écrites « *l'initiative vous est laissée d'utiliser des données supplémentaires* » ou orales « *n'hésitez pas à travailler avec des données en plus si vous en avez besoin* » vont dans le sens d'un contrat didactique nouveau dans lequel l'étudiant aurait la responsabilité de gérer les données dont il a besoin.

Dans la stratégie S_1 , utilisée globalement dans 28 % des réponses, les étudiants se situent dans cette évolution du contrat didactique, davantage d'ailleurs en A_{32} (près d'un étudiant sur deux) qu'en A_1 (à peine plus d'un étudiant sur 10). Cette différence notable peut s'expliquer par le fait que les étudiants du DEUG A_{32} sont en deuxième année universitaire. On peut penser que moins dépendants du contrat didactique classique, ils sont capables d'une certaine autonomie.

La stratégie S_5 renvoie les étudiants au contrat didactique classique : toutes les données de l'énoncé sont exploitées sans modification, même au prix de la confusion entre température et chaleur de changement d'état. Cette stratégie se retrouve à nouveau davantage en A_1 (10,9 %) qu'en A_{32} (1,5 %).

Notons cependant que les meilleurs résultats des étudiants de A_{32} ne prouvent pas que le cycle de Hess, qu'ils ont davantage utilisé dans le temps didactique, soit plus formateur puisqu'on a vu, dans la première partie,

et on verra, dans la troisième partie, que leurs résultats d'ensemble ne sont pas particulièrement meilleurs. L'émergence d'un contrat didactique nouveau, apte à développer l'autonomie et à libérer l'étudiant de première année des procédures algorithmiques, constitue à notre sens un enjeu didactique important. Nos résultats ne nous ont cependant pas permis de mettre réellement en évidence une telle émergence même s'ils entendaient se situer dans une telle perspective.

4.3.3. Maîtrise conceptuelle (partie III du questionnaire)

Cette partie du questionnaire utilise la technique du Q-sort où, à propos de 12 propositions (Q_1 – Q_{12}), les étudiants doivent choisir le degré de certitude de leurs réponses entre 4 possibilités : - 2, -1, +1, +2 qui correspondent respectivement à « pas du tout d'accord », « plutôt pas d'accord », « plutôt d'accord » et « tout à fait d'accord ». Les moyennes de certitude ont toutes tendance à aller dans le sens de « la bonne réponse », même si c'est quelquefois d'extrême justesse (Q_7).

L'analyse des réponses peut se faire selon quatre types de regroupements.

• Conception d'énergie, chaleur et enthalpie (items 1, 2, 4, 7, et 12)

Si la chaleur est bien reconnue comme une forme d'énergie (Q_2 représente le meilleur score de bonnes réponses avec 1,63 comme moyenne de certitude et 82 % d'accord), les étudiants sont plus hésitants sur la relation entre chaleur et enthalpie ($Q_{12} = 0,59$) ou chaleur latente et enthalpie ($Q_1 = 0,61$).

La réponse Q_7 , de loin la plus mauvaise de ce lot, montre que les étudiants n'établissent pas majoritairement de correspondance entre « chaleur latente » et « chaleur », moins encore qu'entre « chaleur latente » et « enthalpie ». Ceci vaut plus encore pour A_{32} ($Q_7 = - 0,12$ avec 39 % d'accord) que pour A_1 ($Q_7 = - 0,06$ avec 39 % d'accord).

La partie II a pourtant montré que pour la section A_{32} la chaleur latente était appliquée de façon relativement correcte dans les problèmes ($S_1 + S_3 = 67\%$) ce qui peut confirmer que les processus d'algorithmisation, mobilisés dans les résolutions de problèmes, n'impliquent pas compréhension globale du phénomène.

• Énergie interne (items 5 et 9)

La réponse Q_5 montre que les étudiants ont beaucoup de mal à situer l'énergie interne U , à côté de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle et cela plus encore en A_{32} (indice de certitude 0,27) qu'en A_1 (0,47). L'énergie interne semble être une fonction thermodynamique, sans

statut particulier, qui ne dispose que d'un rôle formel et mathématique. L'item 9 « *le cycle de Hess peut s'appliquer à la détermination de $\Delta_r U^\circ$* » est assez massivement accepté avec cependant 12 % de désaccord (aussi bien en A₁ qu'en A₃₂). Cela confirme que les grandeurs thermodynamiques citées par les étudiants, dans la question I 3d, l'étaient davantage pour leur relation avec l'enthalpie que pour leur nature de fonction d'état.

• **Relation avec les calculs de variation d'enthalpie (items 8, 10 et 11)**

Ces items malgré d'assez bons résultats montrent un certain niveau de confusion entre enthalpie de formation et enthalpie de réaction (Q₈, Q₁₀), particulièrement en A₁ (environ 30 % de réponses fausses). Le signe de l'enthalpie, associé à un sens précis de réaction, est plus largement maîtrisé (Q₁₁ = 1,45 avec 10 % seulement de réponses fausses). Il est vrai que le côté automatique de cette question la rend plus facile.

• **Relation avec la réalité expérimentale (items 3 et 6)**

Les étudiants ont assimilé, à propos de Q₃ et plus encore de Q₆, que, dans l'application des méthodes de détermination indirecte, la réalité intervient peu et qu'il s'agit avant tout d'accéder à des données déterminées par des calculs sur des réactions fictives.

En conclusion de cette troisième partie, on peut observer, sur la figure 1, que les étudiants éprouvent des difficultés à coupler les différentes notions fondamentales de thermochimie et thermodynamique (énergie interne, variation d'enthalpie et relation avec la chaleur, chaleur latente, fonction d'état, etc.) mais qu'ils sont capables d'éviter les pièges de calcul des variations d'enthalpie (items 8, 10 et 11), ce qui atteste d'une relative maîtrise dans l'application d'algorithmes même si le sens physique des concepts n'est pas acquis.

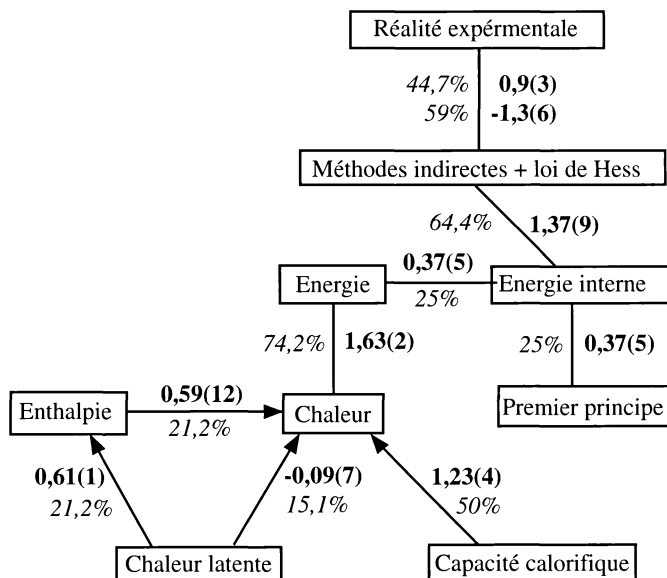


Figure 1 : La mise en relation de quelques concepts de la thermodynamique

- en italique, le pourcentage d'étudiants ayant fait le lien entre les 2 notions indiquées ;
- les moyennes de certitude attribuées à la réponse ;
- entre parenthèses, le numéro de la question où les notions sont impliquées

5. CONCLUSIONS ET PROPOSITIONS DIDACTIQUES

5.1. Retour sur les hypothèses de recherche

L'ensemble du travail d'analyse mené nous permet de revenir sur les trois hypothèses de recherches formulées plus haut (cf. 2.3.)

5.1.1. Hypothèse 1

L'analyse des programmes de première S et de DEUG 1ère année jointe à l'analyse des manuels universitaires semble bien indiquer que sont privilégiés les savoir-faire et les calculs plutôt que la compréhension conceptuelle. Le texte du savoir reste largement centré sur les méthodes

automatiques et les algorithmes de calcul. Notre hypothèse 1 paraît donc, ici, globalement vérifiée.

L'analyse des réponses au questionnaire proposé aux enseignants montre que ceux-ci ne revendiquent pas, pour la plupart, une logique purement calculatoire et apprécient l'intérêt didactique d'une présentation diversifiée intégrant largement le cycle de Hess. Ils en précisent cependant les difficultés de mise en oeuvre et les limites face aux contraintes d'enseignement et au temps didactique insuffisant. Il ne paraît donc pas possible, sur ce plan du savoir enseigné, de valider ou d'invalidier notre hypothèse 1.

Cependant, le poids conjugué de l'évaluation, du contrat didactique et du texte du savoir semble bien laisser à la charge de l'étudiant la compréhension globale des concepts comme le montrent les déficits observés dans les réponses à la troisième partie du questionnaire posé aux étudiants.

5.1.2. Hypothèse 2

L'hypothèse 2 « *les étudiants ne relient pas entre elles les différentes notions enseignées en thermochimie...* » se situe logiquement, côté étudiant, dans la suite de l'hypothèse 1. On peut la subdiviser en trois sous-hypothèses, toutes vérifiées par le travail d'analyse mené à partir du questionnaire posé aux étudiants :

– « *la loi de Hess, qui fonde les méthodes de détermination indirecte des chaleurs de réaction, n'est pas connue en tant que telle* » comme le montre les réponses à la question I 3a ;

– « *les étudiants ne savent pas que le premier principe de la thermodynamique est à la base des calculs faits en thermochimie, à partir des méthodes indirectes* » puisque 15 % seulement répondent, dans la question I 3b, que le premier principe fonde la loi de Hess ;

– « *la notion de fonction d'état est connue des étudiants (cf. I.6.) mais elle n'est pas opérationnelle en chimie* » car son application est très peu utilisée (18 % citent « *H fonction d'état* » comme loi de Hess, 23,5 % l'appliquent en I 3d, 10 % savent relier cette notion à la chaleur de réaction.)

5.1.3. Hypothèse 3

À partir de l'exercice sur le cycle de Hess (partie II du questionnaire), de quelques items de la partie III et de l'analyse de copies d'examen nous avons pu vérifier l'hypothèse 3 : « *les étudiants savent résoudre un exercice impliquant les méthodes de détermination indirecte des chaleurs de réaction,*

c'est-à-dire des algorithmes, mais face à un exercice « innovant » ils ne savent pas adapter ces algorithmes ».

La plupart des étudiants réussit à résoudre les exercices proposés qui consistent en une simple application des algorithmes. De même, les items 8, 10 et 11 de la partie III obtiennent des taux de bonnes réponses relativement importants.

En revanche, l'exercice sur le cycle de Hess, qui nécessitait une démarche plus innovante, a donné des résultats plus faibles, particulièrement en A_1 où seuls 12,5 % des étudiants ont répondu correctement (stratégie S_1). Un tel résultat traduit, à propos de la loi de Hess, un décalage entre stratégie de résolution et apprentissage conceptuel des apprenants en première année d'Université. Ce décalage a également été observé à partir de l'analyse que nous avons menée de copies d'examen en thermochimie en DEUG A_1 en 1992-1993 et 1993-1994 : les résultats sont corrects tant qu'il s'agit d'applications directes de formules algorithmiques mais s'effondrent pour des résolutions plus complexes ou encore des questions qualitatives mettant en œuvre le sens des concepts. L'importance d'un tel décalage a déjà été noté à propos de la stœchiométrie (Niaz, 1989).

On peut donc conclure de ce travail d'analyse que les étudiants contraints de prendre en charge la compréhension globale des phénomènes ne parviennent pas à **lier entre eux les différents concepts** et se réfugient dans des **procédures algorithmiques**. Cette place importante des algorithmes, efficaces comme on l'a vu dans la résolution d'exercices peu innovants, est cohérente avec un mode d'évaluation visant l'apprentissage de procédures de calcul et de savoir-faire immédiatement opératoires plutôt que l'articulation entre concepts (faiblesse du temps didactique et du taux d'encadrement, hétérogénéité croissante des étudiants, diversité des filières, modularisation, etc.)

5.2. Propositions didactiques

Devant ce constat, il serait illusoire de livrer un panel de propositions didactiques susceptibles de transformer fondamentalement la situation. Notre pratique de l'enseignement en premier cycle et la régularité d'observations convergentes avec les conclusions de ce travail nous amènent simplement à proposer quelques axes de réflexion.

5.2.1. Mise en oeuvre d'une dialectique outil-objet

La dialectique outil-objet est définie en didactique des mathématiques comme « *un processus cyclique organisant les rôles*

respectifs de l'enseignant et des élèves, au cours duquel les concepts mathématiques jouent alternativement le rôle d'outil pour résoudre un problème et d'objet prenant place dans la construction d'un savoir organisé » (Douady, 1986, p. 6). Un apprenant a des connaissances « s'il est capable d'en provoquer le fonctionnement comme outils explicites dans des problèmes qu'il doit résoudre » (Douady, 1986, p. 11).

Nous pouvons reprendre à notre compte cette dialectique outil-objet, créatrice de sens, pour l'apprentissage des concepts thermodynamiques. Trop souvent, en effet, on met en avant la fonction d'état et le premier principe comme objets d'étude donnant lieu à des développements conceptuels et à des approfondissements théoriques et on limite la chaleur latente ou la capacité calorifique à de simples outils, simples auxiliaires nécessaires à la résolution algorithmique d'exercices. C'est bien ce qu'on a observé avec le questionnaire posé aux étudiants. Cette dichotomie fait que certains objets d'étude sont connus en tant que tels mais ne sont pas opératoires comme outils de résolution (la notion de fonction d'état par exemple) tandis que certains outils sont dépourvus de signification théorique (la notion de chaleur latente par exemple). Tout au contraire, il s'agirait ici de prendre ces deux types de concepts à la fois comme outils pour résoudre un problème et comme objets ayant obligatoirement leur place dans la construction du savoir. On pourrait ainsi dépasser l'algorithme et accéder au sens.

5.2.2. Intérêt du cycle de Hess

Par sa schématisation le cycle de Hess permet la mise en valeur du premier principe et de la notion de fonction d'état. On sait que le schéma, par son rôle dans la représentation imagée de l'information transmise, peut fonctionner comme médiateur entre la formulation abstraite et la représentation mentale d'un concept. Cette médiation, jointe à la dialectique outil-objet précédente, pourrait donner à la méthode du cycle de Hess un réel intérêt didactique, pour la construction des connaissances des étudiants.

5.2.3. Utilisation des algorithmes

Il ne s'agit pas d'évacuer l'aspect opératoire et fonctionnel des algorithmes mais de les replacer pleinement dans leur contexte conceptuel et d'indiquer comment et pourquoi l'algorithme fonctionne (Schrader, 1987). Appliquée au cycle de Hess une pareille utilisation permettrait de donner plus d'importance à la compréhension qu'à la mémorisation de règles (Suntcliffe, 1983). Elle autoriserait la mise en cause d'une algorithmisation-refuge purement automatique dont nous avons pu vérifier la consistance à travers le questionnaire posé aux étudiants.

5.2.4. *Double évaluation quantitative et qualitative*

Sortir d'une algorithmisation-refuge de type répétitif, largement induite par l'évaluation quantitative qui prévaut le plus souvent en première année d'Université, est bien un véritable enjeu didactique. À côté de l'évaluation classique, fondée le plus souvent sur d'inévitables exercices calculatoires ou d'authentiques résolutions de problèmes, il serait utile d'introduire un quota de questions qualitatives sur le sens des concepts et des phénomènes. Ceci est en accord avec des propositions de même nature faites pour l'étude de la stœchiométrie ou des lois des gaz à l'arrivée à l'Université (Sawrey, 1990).

Cette évaluation qualitative, relative à des questions de compréhension et de réflexion, surprend toujours les étudiants lorsqu'elle est mise en oeuvre pour la première fois mais elle est de nature à permettre une modification du contrat didactique, à remettre en cause la logique algorithmique automatique et à favoriser une véritable maîtrise et mise en relation des différents concepts à mobiliser.

Ces différentes propositions nous paraissent utilisables dans le cadre d'un enseignement de thermochimie en premier cycle universitaire. Leur caractère opératoire et leur facilité de mise en oeuvre dépendent évidemment du contexte et des contraintes d'enseignement mais jointes à d'autres propositions, fondées sur d'autres études, elles pourraient favoriser un **apprentissage-appropriation** dans un secteur où les progrès à accomplir sont à la mesure des lacunes et carences constatées.

NOTES

1. Le Diplôme d'Études Universitaires Générales (DEUG) comportait à Grenoble, au moment de notre étude, deux sections : le DEUG A (sciences de la matière) et le DEUG B (sciences de la vie). Notre expérimentation a été menée sur des sections et des copies du DEUG A, même si notre analyse est largement transposable au DEUG B.

2. La première année de DEUG A est constituée par le DEUG A₁ et la deuxième année par le DEUG A₂.

3. Le DEUG A₃₂ appartenait à une filière spécifique à Grenoble qui permettait aux étudiants volontaires d'accomplir un DEUG en 3 ans, à vitesse ralentie, qui a fonctionné de la rentrée 1989 à la rentrée 1997 : le programme de la première année du DEUG A était effectuée en 2 ans (DEUG A₃₁ puis DEUG A₃₂ où était traitée la thermochimie) ; les étudiants accomplissaient ensuite leur troisième année en deuxième année normale du DEUG dans la filière commune du DEUG A₂.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDER P. & SONNESSA A.J. (1965). *Principes of chemistry*. New-York, Mac Millan Company.
- ANDERSON B. (1990). Pupils conceptions of matter and its Transformations. *Studies in science Education*, n° 18, pp. 53-85.
- ARNAUD P. (1988). *Cours de chimie physique*. Paris, Dunod.
- ATKINS P. (1992). *Chimie générale*. Paris, Interéditions.
- BALESDENT D. (1985). De l'intérêt de la thermodynamique énergétique pour la compréhension du 2^{ème} principe. In ReCoDic (Éd.), *L'enseignement de la thermodynamique, Les recherches en didactique de la chimie*, vol. Vb. Poitiers, CUDNME de Poitiers, p. 9.
- BARROW G.M. (1961, 1976). *Chimie physique, tome 1*. Paris, Masson.
- BARROW G.M. (1988). Thermodynamics should be built on energy, not on heat and work. *Journal of chemical Education* vol. 65, n° 2, pp. 122-125.
- BATTINO R. (1979). Why thermodynamics should not be taught to freshmen or who owns the problem. *Journal of chemical Education*, vol. 56, n° 8, pp. 520-522.
- BEAUFILS D., LETOUZE J.-C., RICHOUX H. & RICHOUX B. (1996). Des images pour des activités scientifiques. *Aster*, n° 22, pp. 149-168.
- BERTRAND G. (1988). L'enseignement de la thermodynamique a-t-il trouvé son équilibre ? *L'Actualité Chimique*, n° 1, pp. 11-17.
- BESSOT A. & LE THI HOAI A. (1994). Une étude du contrat didactique à propos de la racine carrée. *Petit x*, n° 36, pp.39-60.
- BLANDAMER M.J. & BURGESS J. (1987). Thermodynamics properties, a chartist approach. *Education in Chemistry*, vol. 24, n° 3, pp. 85-87.
- BROUSSEAU G. (1986). Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *Recherches en Didactique des mathématiques*, vol. 7, n° 2, pp. 33-115.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1988). *Supplément au numéro 21 du 2 juin 1988*. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1992). *Numéro hors série du 24 septembre 1992*. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale.
- BUTLER J.A.U. (1928, 1949). *Chemical thermodynamics*. London, Mac Millan.
- DOUADY R. (1986). Jeux de cadres et dialectique outil-objet. *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 7, n° 2, pp. 5-31.
- FABRITIUS E. (1990). *La réaction chimique, tome 1, thermodynamique chimique*. Paris, Masson.
- GALLAIS F. (1950, 1957). *Chimie minérale théorique et expérimentale*. Paris, Masson.
- GOFFARD M. (1993). Réflexions post-bac. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 759, pp. 1593-1604.
- HUNTZ M. & MEYER C. (1988). *Thermochimie*. Paris, Ellipses.
- JOSHUA S. & DUPIN J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris, PUF.
- LAFFITTE M. & ROUQUÉROL F. (1990). *La réaction chimique, tome 1*. Paris, Masson.
- LAUGIERA. & DUMON A. (1994). Les obstacles à la conceptualisation de la réaction chimique en classe de seconde, interprétation microscopique modèle-langage. In M. Caillot (Coord.), *Actes du quatrième séminaire national de la recherche en didactique des sciences physiques*. Amiens, Université de Picardie Jules Verne (CURSEP) et IUFM de Picardie, pp. 37-48.

- LESOULT G. (1985). Où la micro-informatique et la télématique pourraient contribuer à rendre attractif l'enseignement de la thermodynamique auprès des élèves ingénieurs. In ReCoDic (Éd.), *L'enseignement de la thermodynamique, Les recherches en didactique de la chimie, vol. Vb*. Poitiers, CUDNME de Poitiers, p. 11.
- MAHAN B.-H. (1969). *Thermodynamique chimique*. Paris, Édisciences.
- MASTROT G. (1995). *Enseignement et apprentissage de la thermochimie en DEUG A 1ère année : l'algorithmisation, une difficulté à l'application des fondements de la thermodynamique*. Mémoire de DEA, Université Joseph Fourier, Grenoble 1.
- MC QUARRIE D. & ROCK P.A. (1992). *Chimie générale*. Bruxelles, De Boeck.
- MOTTET G. (1996). Les situations-images. *Aster*, n° 22, pp. 15-56.
- NAZ M. (1989). The Relationship between M-Demand, Algorithms, and Problem Solving : A Neo-Piagetian Analysis. *Journal of Chemical Education*, vol. 66, n° 5, pp. 422-424.
- ONILLON M. (1985). L'enseignement de la thermodynamique : situation, difficultés, remèdes possibles. In ReCoDic (Éd.), *L'enseignement de la thermodynamique, Les recherches en didactique de la chimie, vol. Vb*. Poitiers, CUDNME de Poitiers, p. 6.
- PICKERING M. (1990). Further studies on concept learning versus problem solving. Is there a difference ? *Journal of chemical Education*, vol. 64, n° 6, pp. 508-510.
- RIST A. (1985). Pour une meilleure perception des fonctions thermodynamiques par les étudiants. In ReCoDic (Éd.), *L'enseignement de la thermodynamique, Les recherches en didactique de la chimie, vol. Vb*. Poitiers, CUDNME de Poitiers, p. 14.
- SANFELD A. (1988). Sur une présentation conceptuelle erronée de la thermodynamique chimique. *L'Actualité Chimique*, n° 3, pp. 124-129.
- SAWREY B.A. (1990). Concept learning versus problem solving : revisited. *Journal of Chemical Education*, vol. 67, n° 3, pp. 253-254.
- SCHRADER C.L. (1987). Using algorithms to teach problem solving. *Journal of Chemical Education*, vol. 64, n° 6, pp. 518-519.
- SCHWOB M. & BLONDEL F.-M. (1996). Questions posées par la conception et la réalisation d'un environnement d'aide à la résolution de problèmes en chimie. *Didaskalia*, n° 8, pp. 111-137.
- SOLOMONIDOU C. & STAVRIDOU H. (1994). Les transformations des substances, enjeu de l'enseignement de la réaction chimique. *Aster*, n° 18, pp. 75-95.
- SUARD M., PRAUD B. & PRAUD L. (1971). *Éléments de chimie générale*. Paris, Flammarion.
- SUTCLIFFE R. (1983). Another method for solving problems based on Hess's law. *Journal of chemical Education*, vol. 60, n° 4, pp. 362-364.
- TRIPP T.B. (1976). The definition of heat. *Journal of chemical Education*, vol. 5, n° 12, pp. 782-784.
- TUECH J., DUBUSC M. & MOSSOYAN M. (1995). *Thermodynamique chimique*. Paris, Colin.
- UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER (1986). *DEUG A expérimental. Enseignement de chimie. Objectifs de l'enseignement de première année*. Grenoble, Université Joseph Fourier.

- 3 – Si vous enseignez les *méthodes précédentes 1 et 2*
- a– Montrez-vous l'équivalence de ces méthodes ?
 Oui Non
- b– Comparez-vous ces deux méthodes ?
 Oui Non
- c– Pourquoi ?
- d– Avez-vous constaté que les étudiants préfèrent l'une des deux méthodes ?
 Oui Non
Laquelle ? Méthode 1 Méthode 2
À votre avis pourquoi ?
- e– Dans un sujet d'examen, préférez-vous
 Laisser le choix de la méthode aux étudiants
 Imposer une méthode
Dans ce dernier cas quelle méthode a votre préférence ?
- 4 – Expliquez-vous que c'est le **1^{er} principe** qui fonde ces méthodes ?
 Oui Non
- 5 – a– Voyez-vous un **intérêt didactique** à l'utilisation du cycle de Hess plutôt qu'à la méthode algébrique ?
 Oui Non
- b– Si *oui* pour quelle(s) raison(s) ?
Cochez une ou plusieurs propositions parmi celles qui suivent
 Visualisation concrète plutôt qu'abstraction
 Plus généralisable
 Meilleure compréhension physique
 Limite les automatismes de raisonnement et sollicite l'imagination
 Autres :
- c– Quelles difficultés voyez-vous à l'utilisation du cycle de Hess par les étudiants ?
- 6 – Que vous ayez introduit ou non l'application du cycle de Hess pour la détermination indirecte des chaleurs de réaction, utilisez-vous le cycle pour d'autres notions du cours ?

- Calcul des énergies de liaisons (covalence)
- Calcul d'énergies réticulaires (cycle de Born-Haber)
- Calcul de $\Delta_r H^\circ$ avec changement de température
- Autres

Précisez :

7 – Observations personnelles

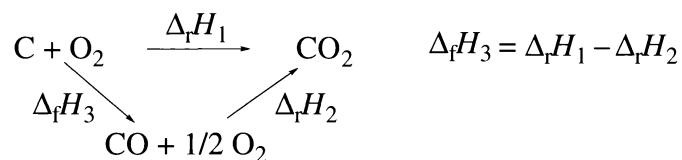
ANNEXE 2

ENQUÊTE PROPOSÉE AUX ÉTUDIANTS

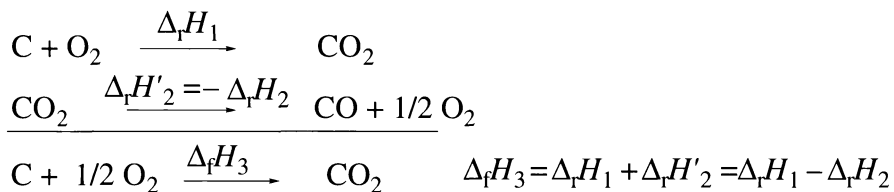
Exemple d'utilisation des méthodes auxquelles le questionnaire fait référence :

On cherche l'enthalpie de formation de CO, c'est à dire $\Delta_f H_3$

Méthode 1 : Cycle de Hess



Méthode 2 : Combinaison algébrique d'équations de réaction



Partie I

Cochez les cases selon votre choix de réponse

1 – a– Quelle(s) *méthode(s)* de calcul des chaleurs de réactions avez-vous apprise(s) dans votre enseignement de chimie ?

- *Méthode 1* : Le cycle de Hess en cours en TD
- *Méthode 2* : La combinaison algébrique d'équations en cours en TD
- *Méthode 3* : $\Delta_f H^\circ = \sum \nu_i \Delta_f H_i^\circ$ en cours en TD

2 – Si vous avez appris à appliquer les méthodes 1 et 2

a– Laquelle préférez-vous utiliser dans un exercice ? Méthode 1 Méthode 2

b – Utilisez-vous toujours la même méthode quel que soit le problème à résoudre ?

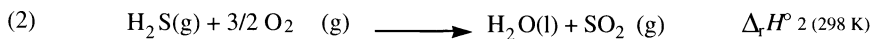
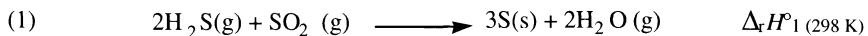
- Oui Non

- Si *oui* laquelle ? Méthode 1 Méthode 2
- Pourquoi ?
- c– Si vous *comparez* ces deux méthodes laquelle vous semble
- La plus facile Méthode 1 Méthode 2
 - La plus rapide Méthode 1 Méthode 2
 - La plus automatique Méthode 1 Méthode 2
- 3 – a– Énoncez *la loi générale* – Loi de Hess – qui permet de calculer les chaleurs de réaction par l'intermédiaire d'un cycle de Hess, en vous aidant de l'exemple de l'enthalpie de formation de CO (page précédente) :
- b– Expliquez sur quelle notion physique est fondée cette loi :
- c– Est-ce que cette loi est aussi à la base de la méthode algébrique ?
Pourquoi ?
- d– On applique généralement cette loi à l'enthalpie. À votre avis, peut-on appliquer cette loi à d'autres grandeurs thermodynamiques ? Si *oui* auxquelles ? Pourquoi ?
- 4 – a– Comment les chimistes mesurent-ils les enthalpies de réaction ?
- b– À votre avis, pourquoi les chimistes ont-ils besoin des méthodes de calcul citées dans la question 1 ?
- 5 – Peut-on associer la variation d'*enthalpie* à une grandeur physique mesurable ? Si *oui* laquelle ?
- 6 – Énoncer une *propriété* caractéristique d'une fonction d'état :
- 7 – On peut déterminer théoriquement la chaleur échangée au cours d'une réaction chimique en utilisant la propriété d'une fonction d'état. Expliquer :

Partie II

On voudrait calculer l'enthalpie standard de **formation de SO₂** à 298 K.

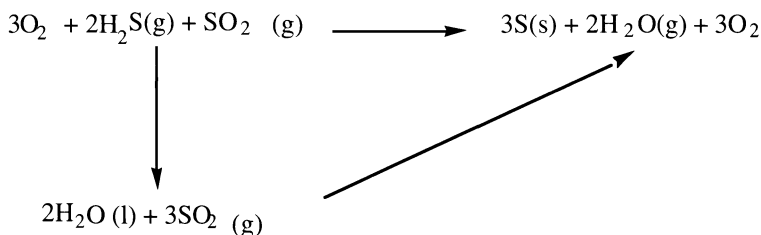
Sachant qu'à 298 K on a :



et que $T_{\text{vap}}(\text{H}_2\text{O}(\text{l})) = 373\text{ K}$.

L'initiative vous est laissée d'utiliser des données supplémentaires.

Voici une *partie* du cycle de Hess qui permet ce calcul :



- Compléter le cycle
- Noter sur le schéma du cycle les $\Delta_r H^\circ$
- Préciser l'état initial et l'état final choisis
- Ecrire la relation qui permet d'obtenir $\Delta_r H^\circ_{(\text{SO}_2)}$

Partie III

Dans cette partie nous vous demandons d'entourer le nombre correspondant à votre réponse selon cette notation :

- 2 = pas du tout d'accord
- 1 = plutôt pas d'accord
- 1 = plutôt d'accord
- 2 = tout à fait d'accord

- 1 – La chaleur latente correspond à une variation d'enthalpie.....

-2	-1	1	2
----	----	---	---
- 2 – La chaleur est une forme courante de transfert de l'énergie.....

-2	-1	1	2
----	----	---	---
- 3 – À une température de 298 K et une pression totale de 1 atm.....

-2	-1	1	2
----	----	---	---

H₂O gaz est un état physique hypothétique.
- 4 – Le produit de la capacité calorifique molaire par la.....

-2	-1	1	2
----	----	---	---

variation de température représente physiquement une quantité de chaleur molaire.
- 5 – On peut dire que l'énergie totale d'un système est égale.....

-2	-1	1	2
----	----	---	---

à la somme de l'énergie cinétique, de l'énergie potentielle et de l'énergie interne de ce système, soit : $E_T = E_c + E_p + U$.
- 6 – Dans l'application de la loi de Hess, les équation-bilans.....

-2	-1	1	2
----	----	---	---

intervenant dans les calculs doivent obligatoirement correspondre à des réactions réalisables en laboratoire.

- 7 – La notion de «chaleur latente» ne correspond pas en.....
réalité à une chaleur.

-2	-1	1	2
----	----	---	---
- 8 – Au cours de la transformation $O_2(g)_{298} \rightarrow O_2(g)_{373}$
la variation d'enthalpie est nulle.

-2	-1	1	2
----	----	---	---
- 9 – Le cycle de Hess peut s'appliquer à la détermination.....
de $\Delta_r U^\circ$.

-2	-1	1	2
----	----	---	---
- 10 – Soit la réaction $CO_2 + CaO \rightarrow CaCO_3$ et $\Delta_r H^\circ$ son enthalpie...
standard de réaction. On a $\Delta_r H^\circ = \Delta_r H^\circ_{(CaCO_3)}$.

-2	-1	1	2
----	----	---	---
- 11 – Si pour la réaction $C + O_2 \rightarrow CO_2$ la variation d'enthalpie.....
de réaction vaut -393 kJ.mol^{-1} alors pour la réaction
 $CO_2 \rightarrow C + O_2$ la variation d'enthalpie vaut $+393 \text{ kJ.mol}^{-1}$.

-2	-1	1	2
----	----	---	---
- 12 – La variation d'enthalpie est une forme particulière
de la chaleur.

-2	-1	1	2
----	----	---	---

Cet article a été reçu le 26/02/98 et accepté le 24/11/98.