



Choix du système dans la résolution des problèmes de thermodynamique : I – le problème du compresseur revisité*

Maxime Nagels^{1*}, Stéphane Bailleux^{2,3}, Tarik Benabbas², Abdelhalim Guelzim²,
Mohammed Lhassane Lahlaouti⁴, Abdelkader Anakkar²

¹ CPGE PSI, Lycée Roland Garros, Le Tampon, Île de la Réunion

² Université Lille. FST. Département physique, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

³ Université Lille, CNRS, UMR 8523 –PhLAM– Physique des Lasers Atomes et Molécules, 59000 Lille, France

⁴ Université Abdelmalek Essaadi, Faculté des Sciences de Tétouan, Département de physique, Maroc

*Auteur de correspondance : nagels.maxime@gmail.com

Résumé : Cette étude illustre l'importance du concept de système thermodynamique. Elle traite du problème du compresseur dont l'objectif est de réaliser un bilan énergétique au cours du cycle de transformations. Les difficultés dans le choix du système sont mises en lumière de même que la corrélation de ce choix avec les définitions du concept de système que l'on trouve dans la littérature. Pour mieux faire ressortir les difficultés et les ambiguïtés de ce problème, nous comparons deux corrections proposées par deux enseignants et nous analysons des copies d'étudiants de Classe Préparatoire aux Grandes Écoles et de Master MEEF (Métiers de l'Enseignement, de l'Éducation et de la Formation) préparant au concours du CAPES externe de sciences physiques et chimiques. Du fait de l'impossibilité d'accéder à un corrigé officiel d'une épreuve de ce type de concours, nous avons étudié le rapport du jury pour analyser les attentes des jurés.

Mots clés : Compresseur, système thermodynamique, cycle de transformations, bilan énergétique, retour d'expérience.

Abstract: Choice of System in Solving Thermodynamics Problems: I – The compressor issue revisited

* Note de bas de page liée au titre de l'article.

This study highlights the importance of the concept of a thermodynamic system through a compressor problem, which focuses on the energy balance during the cycle of transformations. It examines the difficulties in system selection and its correlation with definitions of a system found in the literature. To reveal the difficulties and ambiguities specific to this problem, we compare two corrections and analyse responses from students in Classe Préparatoire aux Grandes Écoles and a Master's in education. As official answer keys for this type of competitive examination are inaccessible, we study the jury's report to understand their expectations.

Keywords: Compressor, thermodynamic system, transformation cycle, energy balance, feedback.

1. Introduction

Certains ouvrages, traitant de thermodynamique, donnent des définitions très éparées de la notion de *système* (ou *système thermodynamique*), et les programmes du supérieur se contentent généralement d'en évoquer uniquement le qualificatif *isolé*, *fermé*, *ouvert*. Pourtant, de nombreuses remarques, présentes dans les manuels notamment, invitent à *choisir* correctement un système pour la résolution d'un problème. Cependant la tâche ne sera *a priori* pas aisée car : « *il n'existe pas de règles précises pour définir [le système]. Néanmoins, un volume de contrôle choisi de manière astucieuse peut simplifier considérablement l'analyse* », comme le rappellent Cengel et *al.*[1]. Nous illustrons l'importance du concept de système thermodynamique à travers l'étude d'un sujet de concours traitant du problème du compresseur (Figure 1) dont la première partie de l'énoncé « Étude énergétique des transformations » est présentée en annexe¹. Ce problème est un classique de la thermodynamique que l'on trouve dans de nombreux ouvrages [2, 3, 4] et qui, à notre connaissance, a été le sujet d'au moins onze problèmes de concours d'entrée en école d'ingénieurs de 1991 à 2015².

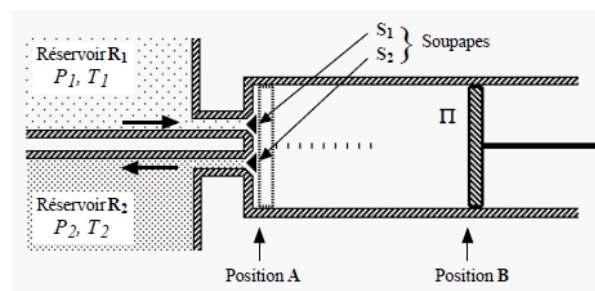


Figure 1. Schéma du compresseur

Notre analyse porte sur cette première partie du problème. L'objectif est de réaliser un bilan énergétique et notamment de calculer les échanges d'énergie par travail au cours d'un cycle de transformations constitué de trois étapes : l'admission d'une quantité donnée de gaz à (P_1, T_1)

¹ Concours de 2005 de la banque d'épreuves CCP DEUG. Ce concours est réservé aux étudiants ayant validé quatre semestres de licence dans le champ des sciences et technologie. Le programme du concours est identique à celui des classes préparatoires aux grandes écoles. [Lien de téléchargement](#).

² CCP DEUG 2005, Centrale Supélec 2015, Concours commun Maroc 2006, ESIM 2003, ENGEES 2000 filière PC, ESIM 2000, CCP TSI 1999, ENSAIT 1999, ENSAM 1995, INA ENSA 1995, ENSAM 1991.

(étape I), la compression adiabatique de celui-ci (étape II) et enfin son refoulement dans des nouvelles conditions (P_2, T_2) (étape III).

2. Présentation du problème

La présentation du problème indique une « *transformation en trois étapes* » mais n'emploie le terme de « transformation » que pour l'étape II relativement à la compression adiabatique du gaz. Cette précaution est probablement due au fait qu'une transformation est une évolution dans des conditions particulières d'un état d'équilibre thermodynamique (P_1, T_1) à un autre état d'équilibre thermodynamique (P_2, T_2) pour un système donné. Le fait que les étapes I et III ne soient pas qualifiées de transformations montre sans doute la difficulté d'identifier l'évolution d'un système dans ces étapes. Pourtant le titre de la partie est intitulé « *Étude énergétique des transformations* ». On note donc ici l'emploi du pluriel pour le mot transformation : une première ambiguïté quant à la considération des transformations (incluant les étapes) ou de la transformation (relative à l'ensemble des étapes). À la suite de cette présentation, l'énoncé propose classiquement de réaliser un bilan énergétique et entropique sur le compresseur. Pour se faire, le questionnaire est découpé de façon à accompagner l'étudiant dans l'élaboration de ces bilans.

Le questionnaire (Annexe) indique que les auteurs du sujet font référence à différents systèmes d'étude pour la résolution de ce problème :

- Masse m de gaz (ou unité de masse) : questions **1**, **6** et **9**)
- Cylindre du compresseur : question **2**)
- Masse m de gaz (ou unité de masse) **au niveau du piston** (ou paroi mobile) : questions **3**, **4** et **5**).

Si on analyse les différents systèmes proposés pour répondre aux questions, on peut remarquer deux points importants. Premièrement, le cas de la question **2**) est singulier. En effet, le cylindre du compresseur peut-il être considéré comme un système thermodynamique ? En effet lors des étapes I et III aucune particule de gaz ne se trouve dans le « système », empêchant toute moyenne statistique amenant à des paramètres macroscopiquement mesurables telles que la température ou la pression.

En outre les auteurs distinguent les systèmes « *masse m de gaz* »³ et « *masse m de gaz au niveau du piston* »⁴, une distinction clairement mise en évidence dans le document par l'utilisation de caractères gras. Bien sûr, la masse m de gaz peut constituer un système. Néanmoins, y a-t-il une différence entre le système {masse m de gaz} et le système {masse m de gaz au niveau du piston} ? *A priori* le complément d'information « *au niveau du piston* » apparaît pour les concepteurs du sujet comme un renseignement crucial pour la résolution du problème ; mais comment cela impacte-t-il la réponse à apporter à la question ? C'est ce qui va être exposé dans la suite, d'une part en comparant deux corrections [5,6] dont l'une est accessible sur Internet, et d'autre part en analysant des copies d'étudiants de CPGE et de Master Enseignement (master MEEF) auxquels le sujet a été proposé en exercice.

³ Ou unité de masse.

⁴ Ou au niveau de la paroi mobile.

3. La résolution d'un problème selon le système

3.1. Analyse de deux corrections suivant le système choisi

Les deux corrections présentées [5,6] disponibles au téléchargement,⁵ proposent des corrigés distincts de ce problème. L'objet de cette partie est d'analyser ces propositions de résolution, notamment en fonction du système ou des systèmes choisis. En question 2), l'énoncé propose la représentation des trois étapes dans le diagramme (P, V) où P représente la pression intérieure et V le volume intérieur du cylindre. Ainsi, il ne s'agit pas du système {gaz} mais d'un système {cylindre}, qui ne peut pas être considéré, comme nous l'avons vu, comme un système thermodynamique puisque le cylindre passe par un volume nul et ne contient donc à cet instant aucune particule. Dans les corrections proposées, les diagrammes font clairement apparaître chacune des trois étapes et précisent que lors de l'étape II le volume du cylindre est le volume du gaz (Figure 2 : partie gauche).

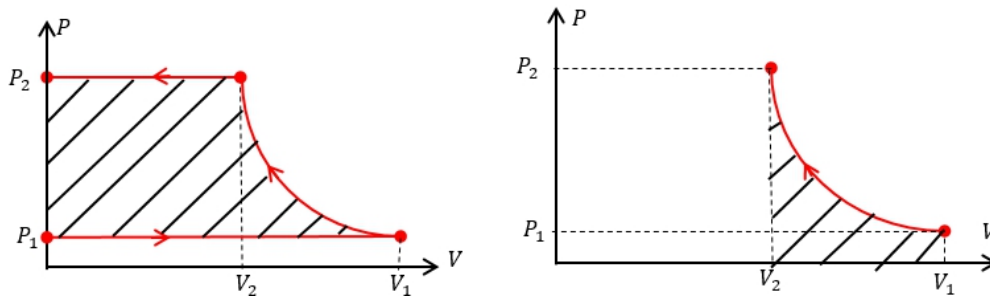


Figure 2. Diagramme de Watt ⁶ du compresseur (à gauche) et Diagramme de Clapeyron du gaz (à droite). Les points-tillés représentent les étapes d'admission et de refoulement.

Ainsi, l'étape II représente la « transformation » pour le système fermé {gaz} et les étapes I et III ne correspondant à aucune transformation thermodynamique, sont représentées par des points (Figure 2 : partie droite).

Cette distinction, entre les deux diagrammes, amène donc deux réponses différentes pour la question 4) relative à la représentation graphique du travail pour la masse m de gaz. En effet, celui-ci s'exprime comme l'opposé de l'aire sous la courbe, dans le diagramme d'équilibre (P, V) . Ainsi, si le système est constitué par la masse m de gaz, comme le propose le sujet, alors la réponse correcte est la Figure 2 de droite, puisque le gaz ne subit que la transformation relative à l'étape II. En revanche, si le concepteur du sujet souhaite illustrer le travail récupéré sur le diagramme de Watt pour le système constitué par le cylindre, comme proposé dans la question 2), alors la Figure 2 de gauche est celle qui est correcte.

Le sujet se poursuit avec la troisième question « Déterminer le travail reçu par la masse m de gaz **au niveau du piston**, au cours de chacune des trois étapes, pour un aller-retour de la paroi mobile II ». Encore une fois, le système à choisir pour l'étude est clairement proposé dans le texte : « travail reçu par la masse m ». Le candidat est donc invité à choisir un système fermé assimilé à un gaz parfait. Mais, il est intéressant de constater que l'auteur met en relief l'expression « **au niveau du piston** ».

⁵ <https://nextcloud.univ-lille.fr/index.php/s/66jNsxfpTMoDzcS>

⁶ On parle de diagramme de Watt dans la mesure où l'abscisse du diagramme (P, V) désigne non pas le volume du gaz mais le volume du cylindre du piston.

Dans le corrigé 1 [5], le correcteur ne fait pas apparaître distinctement le système étudié. Partant du principe que le sujet l'énonce clairement, on peut penser qu'il se dispense de le préciser car il semble "évident que" le système est le gaz de masse m . Néanmoins, il paraît important au correcteur 1 de souligner à nouveau « *travail reçu au niveau du piston* ». En ce qui concerne l'élément de réponse pour l'étape I, on lit : « $W_I = -P_1V_1 = -\frac{m}{M}RT_1$, c'est le gaz qui travaille pour refouler l'atmosphère, de l'autre côté du piston ». Ainsi, dans cette correction, le système n'est pas défini ; mais il semble néanmoins immédiat que ce soit le gaz. L'élément pertinent pour proposer une réponse est, ici, le piston qui *a priori* est identifié comme la frontière de séparation du système gaz avec le milieu extérieur et qui permet ainsi les transferts d'énergie par travail.

Pour la correction n°2 [6], le correcteur propose immédiatement une définition du système « *nous allons donc étudier le travail échangé par le gaz de masse m* » mais termine sa phrase par « *au cours des trois transformations* ». Il faut donc comprendre que le gaz subit trois transformations, i.e. une transformation pour chaque étape du cycle. Le calcul est davantage détaillé que pour la correction 1 et le résultat est clairement différent « $W_I = 0$ ». Le correcteur justifie son calcul par le fait que lors de l'étape I le gaz subit une "transformation nulle" puisque ses paramètres d'état sont constants : $\Delta U = 0$ et que l'ensemble est calorifugé : $Q_I = 0$; ainsi, par l'application du premier principe, nous avons $W_I = 0$.

Une autre justification est également proposée. Elle repose sur le caractère isochore de la transformation du gaz de masse m ; dans ce cas, nous avons : $W_I = -\int P_{ext} dV = 0$; la correction 2 ne reprend pas la phrase « *au niveau du piston* » de l'énoncé. Cet aspect ne semble donc pas être *a priori*, dans cette résolution, un élément majeur du raisonnement.

Tableau 1. Synthèse des réponses de la correction 1

Étape	Correction 1
Étape I	$W_I = -P_1V_1$
Étape II (transformation II)	$W_{II} = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{\gamma - 1}$
Étape III	$W_{III} = +P_2V_2$
Sur un aller-retour du piston	$W_{tot} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}(P_2V_2 - P_1V_1) = \Delta H$

Toutes ces remarques s'appliquent évidemment à l'identique pour l'étape III du cycle. Le corrigé 2 propose avec les mêmes arguments $W_{III} = 0$. Le corrigé 1 justifie un travail non nul pour le gaz : « $W_{III} = +P_2V_2 = +\frac{m}{M}RT_2$. Cette fois c'est le gaz qui est refoulé et reçoit un travail positif ».

Intéressons-nous désormais à l'étape II. Dans la représentation graphique du diagramme (P, V) nous avons déjà mentionné que cette étape II revêt le caractère de transformation II pour le gaz de masse m . Ainsi les deux corrigés s'accordent à dire que pour cette transformation adiabatique et réversible d'un gaz parfait, le travail s'écrit : $W_{II} = \frac{m}{M} \frac{R}{\gamma - 1} (T_2 - T_1)$.

Ces remarques sont synthétisées dans les Tableaux 1 et 2 mettant en relief les deux corrections proposées. La dernière ligne de chaque tableau affiche la somme des contributions des trois étapes correspondant à un aller-retour du piston. La correction 1 aboutit donc à $W_{tot} = \Delta H$, où H désigne l'enthalpie du gaz parfait : un résultat attendu sur les études de compresseurs. La correction 2 se conclut quant à elle, sur le fait que $W_{tot} = \Delta U$, où U est l'énergie interne du gaz parfait.

Tableau 2. Synthèse des réponses de la correction 2

Étapes	Correction 2
Étape I	$W_I = 0$
Étape II (transformation II)	$W_{II} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{\gamma - 1}$
Étape III	$W_{III} = 0$
Sur un aller-retour du piston	$W_{tot} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{\gamma - 1} = \Delta U$

Une analyse de la rédaction proposée en correction 1 mène au constat qu'il n'y a aucune mention du système étudié lors de la proposition de la solution. Le système est sous-entendu, dans le corrigé 1, et est choisi comme le suggère l'énoncé la masse m de gaz. Mais si on s'intéresse à la détermination des travaux W_I et W_{II} , il apparaît que le système réellement étudié est un volume dit de contrôle qui correspondrait à l'intérieur du compresseur passant successivement d'un volume nul à un volume V_1 lors de l'admission de gaz, puis d'un volume V_2 à un volume nul lors de l'éjection des gaz. Pourtant, il est impossible que ce volume de contrôle soit un système thermodynamique car comme nous l'avons dit, à volume nul il n'y a pas de particules dans le système !

Quant à la correction 2, à chaque début de question le correcteur souligne le fait que le système choisi est, comme le propose le sujet, la masse m de gaz. Ainsi, lors des étapes d'admission et de refoulement, le gaz ne subit pas de transformation. Il est simplement déplacé d'un lieu à un autre lieu. On parle donc de *travail de transvasement*⁷ qui ne modifie pas l'état du système. Ce dernier n'échange d'énergie ni par travail ni par transfert thermique avec l'extérieur. Une question vient alors immédiatement : Pourquoi, la correction 1 proposée se dirige dans cette voie ? La réponse a, en réalité, déjà été donnée. Le problème du compresseur est un classique de thermodynamique, généralement traité dans le cadre des systèmes ouverts. Or, le résultat attendu est une énergie récupérable, sous forme de travail par l'utilisateur, égale à la variation d'enthalpie ΔH , c'est-à-dire la variation d'énergie interne (étape II) à laquelle on a soustrait le travail de transvasement (étapes I et III). Ainsi, on légitime par cette remarque la réponse du correcteur 1. Mais à regarder le sujet de plus près, on remarque que le concepteur du sujet, encourage le candidat à choisir comme système « la masse m de gaz ». Ainsi, les réponses

⁷ Le libellé *travail de transvasement* proposé ici pour désigner la quantité $P_2 V_2 - P_1 V_1$, pourrait être l'objet de nombreuses discussions. En effet, certains auteurs utilisent ce terme pour désigner l'ensemble du travail au niveau du compresseur, c'est-à-dire le travail nécessaire pour que le gaz passe de l'état (P_1, T_1) à l'état (P_2, T_2) [2] sans donner plus de détail.

données dans la correction 2, bien que différentes de celles *a priori* attendues, sont celles qui correspondent le mieux à la question posée.

Mais l'analyse peut être en réalité toute autre. Si on peut effectivement orienter notre réflexion sur les corrections, il est légitime de se demander ce que souhaitaient en réalité les concepteurs du sujet pour résoudre ce problème. Nous sommes en effet amenés à nous poser cette question à cause de l'expression « *au niveau du piston* » ou « *au niveau de la paroi mobile* » que l'on trouve de façon récurrente dans le sujet. Pourquoi les concepteurs du sujet insistent sur ce point ? Pourquoi, comme il a été vu, le système choisi pour le questionnaire est sans cesse modifié ? Une probable réponse est que les auteurs ont sans doute cherché à faire comprendre que le travail utile (réellement récupéré) est le travail de la compression adiabatique auquel on a ajouté le travail de transvasement (qu'ils suggèrent au lecteur à travers la remarque « *au niveau du piston...* »).

Dans ce cas de figure, la correction attendue serait la numéro 1. Naturellement ceci n'est qu'une hypothèse. Cependant, pour montrer encore mieux les difficultés et les ambiguïtés de ce problème, le sujet a été soumis à un autre regard : celui des étudiants.

3.2. Analyse des copies d'étudiants de CPGE et de Master enseignement

Le sujet abordé dans cette étude a été proposé en devoir sur table à 15 étudiants de CPGE⁸ (dont 2 étudiants redoublants leur deuxième année désignés par 5/2)⁹ et 20 étudiants de Master enseignement¹⁰. Les résultats avancés par les étudiants sont synthétisés dans le Tableau 3.

Le constat est sans appel : moins de 6% des étudiants suivent la correction 2 pour les valeurs des travaux lors des étapes I et III. Ils sont donc une large majorité à concevoir que le gaz lors des étapes d'admission et de refoulement subit une transformation. Certaines copies montrent clairement des erreurs de raisonnement que nous ne détaillerons pas ici, mais d'autres expriment clairement le travail égal au produit pression $\times$ volume (P_1V_1 ou P_2V_2).

Tableau 3. Synthèse des réponses des étudiants

	Étudiants de Master	Étudiants de CPGE	Pourcentage des réponses
$W = 0$, étapes I, III	1 ¹¹	1 ¹²	6
$W \neq 0$, étapes I, III	17	14	88
W pas de réponse étapes I, III	2	0	6
Sur un aller-retour, ΔU	4	3	20
Sur un aller-retour, ΔH	2	5 ¹³	20
Sur un aller-retour, autres	5	4	26
Sur un aller-retour, pas de réponse	9	3	34

⁸ Etudiants en CPGE section PSI* année scolaire 2013-2014.

⁹ Le programme de thermodynamique de cette section aborde les bilans énergétiques sur les systèmes ouverts, tel que le compresseur. Mais au moment du test, les étudiants n'avaient pas encore traité cette partie du programme, (hormis les 5/2).

¹⁰ Etudiants en Master enseignement année scolaire 2013-2014.

¹¹ Justifié par : « le volume est constant d'où $dV = 0$ ».

¹² Justifié par : « la transformation est isotherme et adiabatique ».

¹³ Dont les deux redoublants.

En revanche, si on regarde l'expression du travail utile total, les réponses sont partagées : 20% se retrouvent dans le cas de la correction 1 et 20% dans le cas de la correction 2. Aussi, une partie des étudiants considère que les étapes I et III s'annulent deux à deux lors de l'expérience, le bilan se ramenant alors à l'étape II faisant apparaître la variation d'énergie interne du gaz. Les autres étudiants somment les trois travaux et aboutissent à la variation d'enthalpie du gaz. C'est notamment le cas des étudiants 5/2. On peut alors remettre en doute l'objectivité de l'expérience pour ces deux étudiants qui ont déjà eu à traiter l'exemple du compresseur. Aussi, retrouvent-ils le résultat attendu : sur un aller-retour le travail correspond à la variation d'enthalpie ΔH . L'un des étudiants commente d'ailleurs sa réponse d'une remarque confirmant notre hypothèse : « *on retrouve ici l'expression du premier principe industriel [i.e. du premier principe de la thermodynamique appliquée au système ouvert]*. ». Pourtant dans sa copie, cet étudiant avait clairement identifié le système {masse m de gaz au niveau du piston} comme le suggère l'énoncé. Il semblerait que l'indication du système de la part de l'étudiant tient plus du réflexe que d'un raisonnement basé sur le système proposé. En effet, il n'y a pas corrélation entre le système et la réponse. Ce constat est d'autant plus édifiant puisqu'on constate que la majorité des étudiants ne précise en réalité presque jamais le système étudié (ils ne sont que 4 sur 35 à présenter clairement le système). Enfin, aucun d'entre eux ne signale la notion de système ouvert alors qu'ils sont 20% à proposer une correction relative à un système ouvert.

Il convient donc de se demander en toute logique l'influence ou le poids que peut avoir le vécu de l'étudiant sur le traitement et l'analyse des problèmes. Cette remarque est notamment étayée par la copie d'un étudiant n'ayant jamais traité le problème d'un système tel que le compresseur. Il suit alors un raisonnement proche de la correction 2. En effet, l'étudiant décrit le système en début de problème en stipulant : « *on a un gaz parfait* ». Puis il applique les principes à ce système clairement identifié et aboutit à la réponse de la correction 2, où le travail se ramène à la variation d'énergie interne :

$$\Delta U = \frac{C_{v,m}}{mR} (P_2 V_2 - P_1 V_1)$$

Il y a donc une difficulté certaine à appréhender la résolution de ce problème. Si comme l'invite le sujet le candidat doit choisir le système masse m de gaz alors la correction type doit être proche de la correction 2. Le résultat obtenu diffère alors des résultats "classiques" des compresseurs. En revanche si, comme le suggèrent les concepteurs du sujet avec l'indication « **au niveau du piston** », les calculs des travaux doivent conduire à un résultat tel que le travail utile est la variation d'enthalpie, alors c'est la correction 1 qui fait foi. Comme il est impossible d'accéder au corrigé officiel d'une épreuve de ce type de concours, on peut chercher des indices dans le rapport de jury afin d'analyser les attentes des jurés.

3.3. Analyse du rapport de jury

Le rapport de jury du concours [7] blâme « *le manque d'attention et de concentration des candidats au cours de la lecture d'un énoncé [alors que] ce dernier "regorge" de renseignements intéressants qui permettent de résoudre un bon nombre de questions.* » Dans le cas du compresseur, on peut naturellement penser que ces renseignements intéressants sont les informations donnant le système à étudier et notamment l'information récurrente « **au niveau du piston** ». Le rapport du jury condamne sévèrement le manque de rigueur de certains

candidats car « *la rigueur imposée par la thermodynamique ne supporte pas de telles erreurs !* »

Pourtant, compte tenu des différences entre les corrections que l'on peut rencontrer pour ce problème, on peut se demander ce qu'attend le rapporteur.

Ainsi, comment interpréter la remarque suivante : « *Le diagramme $P_i = f(V_i)$ proposé par la majorité des candidats montre que ces derniers sont loin de faire preuve d'un bon sens physique.* » ? Naturellement on peut imaginer certains diagrammes farfelus présentés par les candidats. Nous avons pu, nous même, le constater dans le test proposé à des étudiants de CPGE et de Master. Cependant, comme nous l'avons souligné plus haut, deux diagrammes peuvent satisfaire cette question selon le système choisi : {masse de gaz} ou {cylindre} qui rappelons-le ne correspond pas à un système thermodynamique. Aussi le « bon sens physique » valide-t-il la première ou la seconde proposition ?

La remarque suivante du rapport est encore plus ambiguë : « *Le calcul du travail reçu (sous forme de travail de forces de pression) par un système thermodynamique gazeux, au cours d'une adiabatique, comme au cours d'une isotherme, pose toujours d'énormes problèmes* ». En effet, si les deux corrections s'accordent pour le calcul du travail selon l'adiabatique (étape II du fonctionnement du compresseur) : $W_{II} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{\gamma - 1}$, on peut se demander ce qui est attendu dans la remarque « *au cours d'une isotherme* ». De fait le travail sur une isotherme fait apparaître le logarithme du rapport des volumes. Or ni la correction 1 ni la correction 2 ne proposent ce genre de résultat.

Pourtant, on pourrait penser que le rapporteur attend, pour cette question, un résultat proche de la correction 1. En effet, dans une dernière remarque relative au problème du compresseur on peut ainsi lire : « *L'égalité $w = \Delta h$, dans le cas des compresseurs calorifugés, est inconnue* ». Ainsi clairement, le rapporteur de l'épreuve valide la correction 1 et non la correction 2 pourtant fidèle au sujet qui « *“regorge” de renseignements intéressants* ». L'information « *au niveau du piston* » apparaît alors comme un élément fondamental pour la résolution du problème selon les souhaits des auteurs. On ne peut en outre, rester que perplexe à la lecture de la conclusion du rapport de l'épreuve : « *Pour réussir cette épreuve, il est nécessaire de bien dominer les bases fondamentales du programme, grâce à un travail assidu* ». « *Les candidats bien entraînés ne manquent pas d'en tirer profit* ». Pourtant les tests effectués auprès des étudiants de CPGE et de Master, montrent qu'un tel sujet peut aboutir à des résultats bien différents. En outre, on peut également imaginer que les « mauvaises » copies sont le résultat de travaux d'étudiants assidus et appliqués ayant été déstabilisés par les indications ambiguës du sujet pour définir le système d'étude.

4. Conclusion

La critique première qui pourrait être faite au travail que nous venons d'exposer est la suivante : « *Est-il nécessaire de donner une définition précise du système thermodynamique avec des critères et des propriétés qu'il doit respecter ?* » sachant comme le suggèrent Faroux et *al.* [8], que « *une grande souplesse existe dans la définition du système* ». Les partisans du non pourraient répondre qu'il n'existe pas de règles précises pour définir un système ou comme le suggère Dudeck [9] en 1993 : « *un système thermodynamique est une "collection d'objets sur laquelle on porte son attention"* ». Combien d'étudiants ont-ils entendu ou combien

d'enseignants de thermodynamique ont-ils dit que : choisir un système en thermodynamique est « intuitif », « dépendant du problème à résoudre » ou encore « fonction de la question » ? Mais comment transmettre cette « astuce », cette « intuition » aux étudiants ? Cette part de subjectivité n'engendre-t-elle pas une difficulté pour les étudiants (mais aussi pour les enseignants) lors de la résolution des problèmes de thermodynamique ?

La réponse ici, est clairement affirmative ! Comme nous l'avons illustré sur l'exemple de concours, la résolution d'un problème de thermodynamique dépend du système choisi. Les transferts, (en signe et en intensité) sont évalués relativement au système défini. Et les attentes des jurys peuvent être très différentes des résultats donnés par les étudiants suivant la nature du système choisi. Ainsi, il paraît essentiel de définir un système thermodynamique, en donnant ses caractéristiques. Il est également important d'appliquer ces définitions en choisissant clairement le système sur lequel les bilans seront effectués. Ce travail, comme le suggère Roulet [10], doit être réalisé avec l'étudiant, lequel doit être capable de savoir que plusieurs choix de système peuvent être possibles. Mais c'est un travail qui reste à faire.

Dans un article connexe [11] nous proposons diverses résolutions de ce problème en mettant en avant l'importance du choix (non unique) du système en thermodynamique. C'est donc un constat douloureux pour l'enseignement de la thermodynamique qui est fait ici.

Références

- [1] Y. Cengel and M. Boles, *Thermodynamique : Une approche pragmatique*, De Boeck, 2009.
- [2] P. Grécias and J.-P. Migeon, *Physique Sup PCSI, cours et exercices d'application*, Tec & Doc, 1999.
- [3] J.-P. Pérez, *Thermodynamique. Fondements et applications*, Masson, 1997.
- [4] M. Nagels, *Évolutions de quelques concepts de thermodynamique classique dans l'enseignement secondaire et supérieur en France au cours du 20^{ème} siècle* – Thèse de Doctorat, Université de Lille, 2017. <http://www.theses.fr/2017LIL12005>
- [5] J. Le Hir, *Correction devoirs surveillés classe MP*. Lycée de Kerichen, 6 décembre 2007.
<http://gensdelalune.free.fr/mp/Devoirs%20surveilles/DS4-2-thermodynamique%20%28CCP%20national%20Deug%202005%29-corrige.pdf>
- [6] G. Micolau, *Correction des Épreuves de Physique I aux Concours Communs Polytechniques DEUG des ENSI Années 2003 à 2011* - Université Paul Cézanne, 2013.
G. Micolau, O. Chevalier and K. Castellani, *Physique L1 : cours complet avec exercices corrigés et vidéos*, Pearson, 2015.
- [7] Ph. Faynot, *Rapport de Jury, Épreuve de Physique, Concours CCP DEUG 2005*, 2005.
- [8] J.-P. Faroux, J. Renault and L. Bocquet, *Toute la thermodynamique, la mécanique des fluides et les ondes mécaniques MPSI-PCSI, MP-PC-PSI*, Dunod, 2002.
- [9] M. Dudeck, *Thermodynamique : Les irréversibilités*, ESKA, 1993.
- [10] B. Roulet, *L'énergie interne en classe de première*, Bulletin de l'Union des Physiciens, Vol. 631 (1981), pp. 613-619.
- [11] M. Nagels, T. Benabbas, M. L. Lahlaoui, S. Bailleux, A. Guelzim and A. Anakkar. *Choix du système dans la résolution des problèmes de thermodynamique : II – Comment*

résoudre le problème du compresseur ?, 16^{ème} Colloque de l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes (CETIS 2025), 2025.

Remerciements

S.B. remercie le CNRS et l'Université de Lille pour leurs soutiens financiers et logistiques ayant permis la contribution à cette étude.

Annexe : Questionnaire du sujet « compresseur »

On étudie la compression réversible d'un gaz dans un compresseur parfaitement calorifugé. Il s'agit de prélever du gaz situé dans un réservoir R_1 , de grandes dimensions, maintenu à la pression P_1 et à la température T_1 constantes, de le comprimer, puis de le refouler dans un second réservoir R_2 , lui aussi de grandes dimensions, maintenu à P_2 et T_2 constantes (Figure 1). Le gaz est parfait, de masse molaire M et de caractéristique énergétique $\gamma = \frac{c_{p,m}}{c_{v,m}}$ (rapport des coefficients thermiques molaires, respectivement isobare et isochore) constante. La transformation s'effectue en trois étapes :

(I) Étape d'admission : La soupape d'admission S_1 est ouverte, et la soupape de refoulement S_2 est fermée. Le piston Π est initialement au fond du cylindre (position extrême A) : le volume interne V_i du cylindre est alors considéré comme nul (volume résiduel). Par déplacement du piston, une masse m de gaz, initialement stockée dans le réservoir R_1 , est aspirée dans le cylindre à pression P_1 et température T_1 constantes. Lorsque Π est en bout de course (position extrême B), le volume interne du cylindre est $V_i = V_1$.

(II) Étape de compression : Les deux soupapes sont fermées. La masse m de gaz est alors comprimée, par déplacement du piston, de l'état (P_1, V_1, T_1) à l'état (P_2, V_2, T_2) , avec $0 < V_2 < V_1$.

(III) Étape de refoulement : La soupape S_1 reste fermée, mais la soupape S_2 s'ouvre. Le gaz est refoulé à P_2 et T_2 constantes, dans le second réservoir R_2 . Le piston Π se retrouve finalement dans sa position A initiale.

I. Etude énergétique des transformations

- 1) Préciser la nature de la transformation (II) subie par la masse m de gaz.
- 2) Représentez les trois étapes de fonctionnement du compresseur dans un diagramme donnant la pression intérieure P_i en fonction du volume intérieur V_i du cylindre.
- 3) Déterminer le travail reçu par la masse m de gaz **au niveau du piston**, au cours de chacune des trois étapes, pour un aller-retour de la paroi mobile Π .
- 4) Faire apparaître, sur le diagramme de la question I.2, la représentation graphique du travail total de compression reçu par la masse m , au niveau de la paroi mobile.
- 5) Donner l'expression du travail massique w reçu, au niveau du piston, par l'unité de masse du fluide ayant transité dans le compresseur.
- 6) Montrer que ce travail w représente la variation d'une fonction d'état massique du fluide entre les états (P_1, T_1) et (P_2, T_2) .
- 7) Donner en fonction de T_1 , P_1 , P_2 et γ , l'expression de la température T_2 .
- 8) Application numérique : calculer T_2 et w .
- 9) Donner la variation d'entropie massique Δs du fluide lors de son passage du réservoir R_1 au réservoir R_2 .

Biographie des auteurs

Maxime Nagels : est agrégé de physique. Il enseigne la physique et la chimie en CPGE PSI et est chargé de mission pour la promotion des Sciences et Technologies dans l'académie de la Réunion. Docteur en sciences de l'éducation, spécialisé en thermodynamique, il travaille en collaboration avec des chercheurs de l'Université de Lille sur la didactique des sciences dans l'enseignement supérieur.

Stéphane Bailleux : physicien, il est Maître de conférences à l'université de Lille, spécialisé dans la spectroscopie rotationnelle de petites molécules instables en phase gazeuse, dont l'étude s'appuie sur des calculs quantiques ab initio de structure géométrique et de grandeurs thermochimiques en phase gazeuse (dont l'enthalpie standard de formation). Il enseigne la thermodynamique en licence de physique et physique-chimie et développe des outils numériques pour en faciliter l'apprentissage et l'enseignement.

Tarik Benabbas : est Maître de Conférences à l'Université de Lille. Ses travaux de recherche portent sur la simulation par éléments finis des champs de contraintes dans les microstructures semiconductrices, en lien avec les observations réalisées par microscopie électronique en transmission. Il enseigne la thermodynamique au sein de la licence de physique ainsi que dans le cadre de la préparation intégrée du parcours des écoles d'ingénieurs Polytech (PEIP).

Abdelhalim Guelzim : est enseignant-chercheur en physique à l'Université de Lille, Docteur en Science des Matériaux, spécialisé dans la diffraction des RX et neutron sur monocristaux. Il enseigne entre autres la thermodynamique en Licence de physique et participe à la réflexion sur les difficultés rencontrées par les étudiants pour la compréhension des concepts en thermodynamique.

Mohammed Lhassane Lahlaouti : est professeur de physique à la faculté des sciences de l'université Abdelmalek Essaâdi de Tétouan -Maroc. Titulaire d'un doctorat en Sciences des matériaux de l'université de Lille1 et enseigne la thermodynamique. Coordonnateur du master Génie énergétique et énergie renouvelable. S'intéresse à la didactique de la physique et de la thermodynamique en particulier et travaille en collaboration avec des chercheurs de l'université de Lille.

Abdelkader Anakkar : est enseignant-chercheur en physique à l'Université de Lille. Docteur en Sciences des matériaux spécialisé dans les études thermodynamiques sous contraintes (pression, température, luminosité, concentration) de cristaux liquides. Il est auteur du livre « *Etudes thermodynamiques des phases cristallines liquides. Analyse des points multicritiques et modélisation des diagrammes de phase* ». Actuellement les activités de recherche sont orientées vers des études didactiques et pédagogiques toujours dans le domaine de la thermodynamique avec un regard également épistémologique et historique.