

**Rapport sur la LP 11 (binôme 7, Léo Mangeolle)
Gaz réels, gaz parfaits**

Correcteurs : alain.villaume@yahoo.fr
alain.miffre@univ-lyon1.fr

Dans cette leçon, il s'agit de mettre en évidence l'intérêt du modèle du gaz parfait (GP) pour décrire le comportement, macroscopique comme microscopique, des gaz réellement observés. Le titre de la leçon souligne l'importance primordiale du gaz réel, placé récemment en première position (cf. rapport de jury), ce qui montre la nécessité de présenter le modèle du GP non pas pour lui-même, mais en tant qu'il a ou n'a pas l'aptitude à décrire le comportement observé des gaz réels. Ainsi, il est conseillé de montrer d'emblée, i.e. dès l'introduction, la complexité d'un gaz réel dont les molécules ne sont ni ponctuelles ni sans interaction entre elles. Ceci valorise l'introduction du modèle du GP, qui apparaît dès lors comme une hypothèse simplificatrice (modèle) mais très souvent pertinente.

La leçon proposée présentait un bon équilibre entre le formalisme et les calculs (ordres de grandeur pertinents), les contenus ont été présentés avec précision et des ouvertures originales et intéressantes (transitions de phase), avec un effort de synthèse de la bibliographie. Les points qui gagneraient à être améliorés sont : i) Garder un temps substantiel pour conclure plus posément : la conclusion, donc le message, sont décisifs: pas de leçon sans message, une leçon s'adresse à des étudiants. ii) Les pré-requis doivent être plus précis et surtout réutilisés et mentionnés en cours de leçon de manière à saisir leur intérêt, iii) l'agencement de la seconde partie gagnerait à être revu afin d'aller d'emblée à l'essentiel (le message, correction à ponctuelles et sans interactions entre elles), laissant ainsi du temps pour les autres discussions, qui sont moins essentielles dans le contexte de cette leçon, bien qu'éminemment intéressantes et d'actualité. De manière générale, il est conseillé d'aller du plus simple au plus compliqué.

1. Gaz parfait

Cette première partie porte en réalité sur le gaz parfait monoatomique. Elle a été présentée de manière claire et précise et les réponses aux questions (cf. paragraphe final) ont permis d'affiner quelques points épineux. Le fil conducteur « Gaz réels, gaz parfaits » gagnerait à être oralement maintenu tout au long de cette partie, à minima en associant de manière plus systématique à l'oral le mot « modèle » au mot « gaz parfait », de manière à garantir la cohésion du message et donc de la leçon présentée.

1.1 Définition empirique

Le tracé du diagramme d'Amagat permet de donner une définition d'un GP en insistant d'emblée dès le début de la leçon sur un message clé : la distinction entre GP et GR. Les lois historiques des GP ont été mentionnées en soulignant le temps important, un siècle et demi (Boyle Mariotte, 1670 ; Avogadro-Ampère, 1810) qu'il a fallu pour établir l'équation d'état du GP. Une application numérique, même très simple, aurait été bienvenue, ceci afin de fixer d'emblée des ordres de grandeur.

1.2 Modèle microscopique

Les hypothèses du modèle du GP (molécules ponctuelles et sans interaction entre elles) ont été présentées ainsi que celles de la théorie cinétique des gaz (distribution homogène et isotrope). Le calcul de la vitesse quadratique moyenne des principaux gaz est intéressant, tout comme la définition de la température cinétique qui s'en suit.

1.3 Pression cinétique

L'objectif de ce paragraphe aurait gagné à être présenté d'emblée, avant de développer les calculs. Retrouver l'équation d'état du GP n'étant bien sûr pas un objectif en soi, il convient de souligner très clairement l'intérêt de suivre une démarche microscopique dans ce contexte. A cet effet, il est utile de bien préciser à quelle hypothèse on fait appel à chaque étape de la démonstration.

1.4 Propriétés énergétiques – macroscopiques

Ce paragraphe gagnerait à être intitulé « Energie interne, enthalpie d'un GP ». Le théorème d'équipartition de l'énergie a été supposé connu « on retrouve ainsi » : si tel est le cas, il est conseillé d'y faire référence aux pré-requis posés en début de leçon. Ceci assure la cohésion de la leçon.

2. Limites du modèle

Dans cette seconde partie, il convient de reprendre de manière systématique les hypothèses énoncées pour construire le modèle du GP et d'en faire une analyse critique, tout modèle ayant ces limitations. Cet objectif a été globalement atteint avec quelques remarques d'amélioration listées ci-dessous.

2.1 Gaz parfait diatomique

Le calcul (littéral et numérique) des énergies de rotation et de vibration est très intéressant. Il a de plus été effectué avec clarté et concision, ce qui est une forme d'excellence. Pour autant, l'aspect diatomique ne peut être considéré comme une correction au modèle du GP mais une correction au modèle du GP monoatomique. Ainsi l'orateur le dit lui-même « ne remet pas en cause le modèle du GP ». Ce paragraphe intéressant gagnerait ainsi à être présenté dans une autre partie, éventuellement à la fin de cette partie.

Pour l'illustration, il serait intéressant de montrer une « vraie » courbe de mesures de capacités thermiques.

2.2 Limite quantique

L'aspect quantique qui se manifeste lorsque la longueur d'onde thermique de De Broglie excède la distance moyenne qui sépare deux molécules se manifeste à très basse température. Des ordres de grandeur ont été donnés, ce qui était positif. Cette limitation classique / quantique n'est cependant probablement pas à mettre en avant en premier comme limitation au modèle du GP.

On peut signaler au passage que quand la température tend vers 0K, on a bien une longueur d'onde thermique de DE Broglie qui est infinie, et donc un comportement fortement quantique.

2.3 Limite de densité

L'hypothèse de ponctualité des molécules est ici discutée par utilisation du libre parcours moyen, ce qui est positif. Ce paragraphe gagnerait à être discuté en début de seconde partie.

2.4 Limite d'interaction

L'hypothèse de non-interaction (en dehors des chocs) des molécules entre elles est ici discutée par des ordres de grandeurs. Le potentiel de Lennard-Jones gagnerait à être introduit et le graphe de l'énergie potentielle d'interaction tracé de manière à discuter visuellement de la correction apportée au modèle du GP. Comme le précédent, ce paragraphe gagnerait à être discuté en début de seconde partie.

3. Gaz réels

De même, il convient ici de reprendre de manière systématique les hypothèses énoncées pour construire le modèle du GP et d'en faire une analyse critique, tout modèle ayant ces limitations. Cet objectif a été globalement atteint avec quelques remarques d'amélioration listées ci-dessous.

3.1 Gaz de Van der Waals

Les corrections de volume et de pression, et leurs expressions respectives, ont été présentées clairement. S'agissant de la correction de pression, il est conseillé de faire un schéma montrant les interactions entre une molécule et sa voisine, au sein du gaz, puis entre une molécule et sa voisine proche de la paroi (Cf. Livre de J.Ph Pérez, *Thermodynamique*). Ceci permet de distinguer la pression cinétique de la pression moléculaire, laquelle aurait gagnée à être ici introduite. L'expérience montre que ce schéma aide à la compréhension des étudiants.

3.2 Aspects expérimentaux

Cette partie est originale et très intéressante car elle permet d'ouvrir la discussion au cas pratique très important des transitions de phase.

3.3 Le développement du Viriel-conclusion

Ce paragraphe a été traité très brièvement, faute de temps. Il est nécessaire de consacrer un temps substantiel à la conclusion. Celle-ci, rappelons-le, doit comporter deux aspects : i) le temps du bilan : qu'avons-nous appris, quel est le message ? ii) celui des perspectives éventuelles. Il est très important, surtout en enseignement, de ne pas sacrifier la première partie au détriment de la seconde. Pour le temps du bilan, par exemple, on peut aussi conclure jusqu'à quand on le modèle du GP est valide dans les CNTP pour l'air.

4. Questions et discussions

Les discussions sont intégrées dans l'introduction et les commentaires ci-dessus.

1. *Dans le modèle du GP, les molécules sont considérées comme ponctuelles et sans interaction entre elles. Qu'en est-il des chocs ?* Les interactions entre molécules sont considérées comme inexistantes en dehors des chocs des molécules avec la paroi.
2. *Le modèle du gaz parfait dépend-il de la nature élastique ou inélastique de la collision ?* Non, par effet statistique, le résultat ne dépend pas de la nature de la collision (Ref. J.Ph.Pérez, Thermodynamique).
3. *Peut-on toujours appliquer la statistique de Maxwell-Boltzmann ?* Elle convient pour des énergies thermiques $k_B T \gg \varepsilon$.
4. *L'hypothèse d'homogénéité de la densité moléculaire peut-elle être remise en cause ?* Oui, lorsqu'un fort gradient de concentration existe, le champ électrique intervient.
5. *Qu'est-ce que la température d'inversion de Joule-Thomson ?* C'est la température au-dessus de laquelle l'expansion occasionnera une augmentation de la température, et au-dessous de laquelle elle occasionnera une diminution de la température du gaz. Pour la plupart des gaz au voisinage de la pression atmosphérique, cette température d'inversion de Joule-Thomson est relativement élevée (nettement supérieure à la température ambiante), et le gaz peut donc être refroidi sous l'effet de l'expansion. Une exception notable est l'hélium qui a une température d'inversion de 40K : obtenir de l'hélium liquide est donc bien plus difficile que de l'azote liquide par exemple.