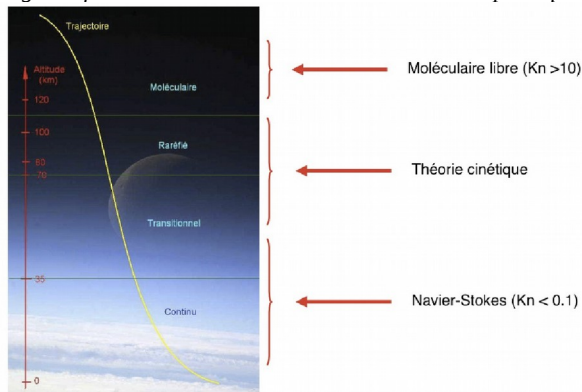


# Modèles aux moments pour la dynamique des gaz raréfiés à haute température

**Contexte physique:** lors de la rentrée atmosphérique terrestre ou martienne d'un objet celui-ci traverse différentes couches qui deviennent de plus en plus denses:

Régimes fluides rencontrés lors d'une rentrée atmosphérique en fonction du nombre de Knudsen



Au début de la rentrée, l'objet heurte peu de molécules de gaz (régime moléculaire libre). Puis l'atmosphère se densifiant, il faut tenir compte des impacts des particules à la paroi (frottement et flux de chaleur): ceci est alors modélisé par la théorie cinétique (équation de Boltzmann pour les écoulements raréfiés). Enfin dans les couches les plus basses, les molécules se comportent comme un fluide: une modélisation de type équation de Navier-Stokes est alors employée et si nécessaire les effets de turbulence peuvent être pris en compte. La compréhension de ces différentes étapes permet de garantir que l'objet (navette ou sonde spatiale) arrive intègre au sol ou se désagrège (satellite rentrant dans l'atmosphère) avant de toucher le sol. D'autres phénomènes peuvent intervenir (rencontre de poussières dans l'atmosphère martienne endommageant la protection thermique des sondes) et il est nécessaire de connaître le comportement des matériaux ainsi que leur interaction avec le fluide pour avoir une maîtrise globale du processus. Un dernier facteur important à prendre en compte est la vitesse de l'objet qui peut aller à des vitesses supersoniques lors de la rentrée sollicitant fortement alors les protections thermiques. En haute atmosphère lorsque les molécules sont suffisamment nombreuses pour entrer en collision (nombre de caractéristique de Knudsen supérieur à l'unité), l'écoulement des molécules est modélisée par une équation de type Boltzmann:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla_x f = Q(f),$$

où  $f$  représente le nombre de particules à l'instant  $t$  se situant en  $x$  avec la vitesse  $v$ .  $Q$  s'appelle le noyau de collision. Différentes modélisations existent pour ce dernier qui peut s'avérer très coûteux en temps à simuler lorsque le nombre de molécules devient très important. Au noyau originel de l'équation de Boltzmann peuvent être préférés des modèles simplifiés de relaxation de type BGK (Bhatnagar, Gross et Krook en 1954) ou des modèles de diffusion (équation de Fokker-Planck) :

-modèle BGK: ce modèle bien connu fait partie d'un code développé au CEA depuis 20 ans sous l'impulsion de L. Mieussens (IMB) et des ingénieurs CEA et peut être étendu en un modèle ESGK capable de mieux capturer les flux thermiques. Des travaux sont en cours pour améliorer la chimie de l'écoulement car durant la rentrée atmosphérique l'écoulement atteint plusieurs milliers de degrés ceci déclenchant les réactions chimiques entre diazote et dioxygène.

-modèle Fokker-Planck: ce modèle est généralement moins utilisé pour simuler les écoulements raréfiés. Néanmoins des travaux récents l'ont remis en avant. Son principal défaut est de mal capturer les flux thermiques: nous avons corrigé ce défaut pour les écoulements de gaz monoatomique avec L. Mieussens en construisant un modèle préservant le second principe de la thermodynamique et l'avons ensuite étendu aux gaz polyatomiques.

## Publications:

J Mathiaud, Luc Mieussens: *A Fokker-Planck Model of the Boltzmann Equation with Correct Prandtl Number for Polyatomic Gases*. Journal of Statistical Physics 07/2017;, DOI:10.1007/s10955-017-1837-4

J Mathiaud, L Mieussens: *A Fokker-Planck Model of the Boltzmann Equation with Correct Prandtl Number*. Journal of Statistical Physics 03/2015; 162(2)., DOI:10.1007/s10955-015-1404-9