**Annexe : quelques idées sur la thermodynamique de l’hydrogène**

Le tableau ci-dessous résume les propriétés du para-hydrogène dans quelques cas particuliers :

* Evolution entre 35 et 20 K (passage de l’état supercritique à l’état liquide sous pression constante de 3 MPa), il suffit ensuite de détendre le fluide dans une turbine hydraulique. Cette méthode est recommandée paour diminuer les pertes d’un liquéfacteur par rapport à la méthode de détente Joule Thomson.
* Compression isotherme de 3 à 20 MPa à 80 K.
* Compression isotherme de 3 à 20 MPa à 300 K.

Les données sont extraites des tables NIST.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Temperature (K)** | **Pressure (MPa)** | **Density (kg/m3)** | **Volume (m3/kg)** | **Internal Energy (kJ/kg)** | **Enthalpy (kJ/kg)** | **Entropy (J/g\*K)** | **Cv (J/g\*K)** | **Cp (J/g\*K)** | **Sound Spd. (m/s)** | **Joule-Thomson (K/MPa)** | **Viscosity (uPa\*s)** | **Therm. Cond. (W/m\*K)** | **Phase** |
| **20.277** | **0.10130** | **70.798** | **0.014125** | **-1.4391** | **-0.0082857** | **-0.00039121** | **5.6602** | **9.6583** | **1101.1** | **-0.96845** | **13.306** | **0.10341** | **liquid** |
| **20.000** | **3.0000** | **74.543** | **0.013415** | **-15.098** | **25.148** | **-0.72678** | **5.6503** | **8.6410** | **1256.0** | **-1.1786** | **16.577** | **0.10935** | **liquid** |
| **30.000** | **3.0000** | **62.849** | **0.015911** | **87.636** | **135.37** | **3.6697** | **6.2453** | **14.149** | **989.71** | **-0.29172** | **8.6498** | **0.10919** | **liquid** |
| **35.000** | **3.0000** | **53.175** | **0.018806** | **164.09** | **220.51** | **6.2816** | **6.4741** | **20.919** | **790.38** | **0.55477** | **6.3311** | **0.097205** | **supercritical** |
| **80.000** | **3.0000** | **9.3825** | **0.10658** | **701.36** | **1021.1** | **22.131** | **6.7079** | **12.296** | **758.81** | **1.6728** | **3.8545** | **0.064857** | **supercritical** |
| **300.00** | **3.0000** | **2.3826** | **0.41971** | **2711.9** | **3971.0** | **39.462** | **10.210** | **14.389** | **1343.9** | **-0.31696** | **9.0219** | **0.18809** | **supercritical** |
| **20.000** | **20.000** | **85.145** | **0.011745** | **-32.035** | **202.86** | **-2.4121** | **5.5814** | **7.0187** | **1687.9** | **-1.4849** | **34.079** | **0.13369** | **liquid** |
| **35.000** | **20.000** | **76.747** | **0.013030** | **71.650** | **332.25** | **2.3317** | **6.5938** | **10.182** | **1541.0** | **-0.91398** | **15.041** | **0.15218** | **supercritical** |
| **80.000** | **20.000** | **48.236** | **0.020732** | **495.17** | **909.80** | **12.718** | **7.1961** | **14.006** | **1206.6** | **-0.21688** | **6.8912** | **0.12930** | **supercritical** |
| **300.00** | **20.000** | **14.400** | **0.069444** | **2672.1** | **4060.9** | **31.516** | **10.346** | **14.712** | **1492.6** | **-0.40460** | **9.4604** | **0.20189** | **supercritical** |

La comparaison de la compression isotherme à 80 et 300 K vise à montrer l’intérêt de comprimer à basse température pour les applications de stockage sou pression.

Le travail de compression théorique (gaz parfait) est donné par la formule :

Equation de travail de compression isotherme

avec:

With : Travail isothermique en J/mole

Tasp : Température d'aspiration (K)

Pref : Pression absolue au refoulement

Pasp : Pression absolue à l'aspiration

Z : facteur de compressibilité du gaz

R = 8,3145 J/K/mole

A rapport de pression identique, la compression à 80 K consomme 3,75 fois d’énergie qu’à 300 K. Il faut dépenser de l’énergie pour refroidir le gaz de 300 à 80 K mais un échangeur à contre-courant permet de limiter la puissance de réfrigération au rendement de l’échangeur en régime permanent soit 2 à 3 % de l’enthalpie de refroidissement et à la différence des Cp (~10 %).

On note aussi que la vitesse du son dans l’hydrogène à 80K et 3 MPa n’est « que » de 758 m/s. On sait faire dans le domaine des turbopompes cryotechniques des machines avec une vitesse périphérique de 700 m/s. Cela ouvre la perspective d’utiliser des turbomachines pour effectuer le travail de compression avec un rendement bien meilleur que celui des compresseurs à vis.

Cependant, cela ne peut fonctionner qu’à pression modérée. A 20 MPa et 80 K, la vitesse du son augmente à 1206.6 m/s. Il faut alors passer à des compresseurs volumétriques.

La compression à basse température aura surtout des applications dans le domaine terrestre (hydrogène stocké sous pression), même si les applications aéronautiques sont nombreuses (APU, servitudes sol des aéroports, avions de tourisme).

C’est un exemple de synergie entre le domaine aérospatial vers les applications terrestres (turbomachines à grande vitesse).