

**42 800 kJ/kg**  
**145 gCO2/km/passager**

**141 000 kJ/kg**  
**~0 gCO2/km/passager**

### Contexte et problématiques

Problématique de fuites des réservoirs à Hydrogène

**Possibilités de stockage : Avantages et Inconvénients**

Stockage		
Kérosène	H2 Gazeux	H2 Liquide
$\rho = 775-840 \text{ kg.m}^{-3}$	$\rho = 25-35 \text{ kg.m}^{-3}$	$\rho = 65-70 \text{ kg.m}^{-3}$ ✓
$T = T_{\text{amb}}$	$T = T_{\text{amb}}$	$T = -253^\circ \text{ C}$
$p = p_{\text{atm}}$	$p = 350-700 \text{ bar}$ ⚠	$p = 1-4 \text{ bar}$

Sécurité

### Objectifs

**Objectif technique :** Développement d'un banc de mesure de perméabilité à l'H<sub>2</sub>(g) aux conditions cryogéniques ( $T < -150^\circ \text{ C}$ )

**Objectif académique :** Étude de l'influence de la microstructure des matrices organiques induite par la mise en œuvre et de l'architecture des composites sur la perméabilité à l'H<sub>2</sub>(g)

### Phénomènes de perméabilité

La perméabilité d'un gaz à travers un **matériau dense** correspond au couplage entre **Diffusion et Solubilisation**

Les coefficients de **perméabilité P**, **diffusion D** et **solubilité S** sont thermo-dépendants selon une loi d'Arrhénius :

$$P = P_0 \times e^{-\frac{E_p}{RT}} = \left( D_0 \times e^{-\frac{E_D}{RT}} \right) \times \left( S_0 \times e^{-\frac{H_S}{RT}} \right)$$

Cette thermo-dépendance indique que les matériaux sont moins perméables à l'H<sub>2</sub> en raison de la plus faible mobilité moléculaire. Cependant, les changements de températures peuvent induire des endommagements de la matière par phénomènes de dilatations/contractions, notamment dans les matériaux composites. [2]

**Diffusion** de Fick (cinétique)

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

**Solubilité** d'Henry (thermodynamique)

$$C = S \times p$$

$$J = -D \times S \frac{\partial p}{\partial x}$$

[1]

Perméabilité	$P = D \times S$	Solubilité
$\frac{\text{mol}}{\text{m} \times \text{MPa} \times \text{s}}$	$\frac{\text{Diffusion}}{\frac{\text{m}^2}{\text{s}}}$	$\frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \times \text{MPa}}$

Chambre d'admission du gaz | Polymère Semi-Cristallin | Chambre de détection du gaz

Lamelle cristalline, Phase amorphe, Charges de carbone

Solubilisation, Diffusion, Désorption

### Moyen de mesure de perméabilité cryogénique

Chambre de perméabilité, Isolation rayonnement thermique, Régulation thermique, Détecteur de fuites, Pompe à vide, Vanne, Capteur pression, Chambre à vide cryogénique

**Avantages techniques :**

- Refroidissement contrôlé jusqu'à moins de 60 Kelvins
- Refroidissement en circuit fermé → Pas de consommable
- Mesure de perméation par pression et/ou spectrométrie
- Facilité de mise en fonctionnement
- Durée totale de mise en place et mesure : 1 journée

### Paramètres d'essais

<b>Pression d'admission</b>	0,1 – 2 bar
<b>Gaz</b>	He, H <sub>2</sub>
<b>Détecteur de fuite</b>	Capteur de pression à cathode froide Spectromètre de masse
<b>Régulation thermique</b>	Cryogénérateur (34W/77K) Chaufferette (max 100W)
<b>Mesure de température</b>	PT100

### Mesure de P, D et S

Quantité d'hydrogène mesurée au cours du temps

$L = \text{épaisseur du matériau étudié}$   
 $p_{H_2} = \text{pression d'H}_2(\text{g})$

Equation transitoire, Valeurs exp, Equation permanente, Abscisse

$$P = CD \times \frac{L}{p_{H_2}}$$

$$D = \frac{L^2}{6\theta}$$

$$S = \frac{P}{D}$$

### Conclusions et perspectives

- Développement d'un moyen d'essais pour mesurer la perméabilité à des températures cryogéniques,
- Mise en évidence de l'influence de la chimie du polymère (monomère, microstructure) sur la perméabilité,
- Optimisation thermique du moyen d'essais (Isolation radiative, thermalisation, etc.) afin de descendre plus bas en température

### Références

[1] : Klopffer et al. – Revue IFP Vol.56 (2001)  
[2] : Malenfant. – Thèse Univ. Bordeaux I (2012)

### Remerciements

Région Occitanie, IMT Mines Albi et Airbus pour leur support financier, Arkema et HYCCO pour l'approvisionnement des matériaux.