

Table des matières

Avant-propos	1
Patricia DE RANGO et Fermin CUEVAS	
 Chapitre 1. Stockage hyperbare.	 3
David CHAPELLE, Damien HALM et Stéphane VILLALONGA	
1.1. Hydrogène comprimé.	3
1.1.1. Généralités sur H ₂	4
1.1.2. La compression	9
1.1.3. Géométrie mécanique du réservoir.	11
1.1.4. Aspects réglementaires et normatifs	14
1.2. Conception et modélisation	15
1.2.1. Essais sur réservoir	19
1.2.2. Modélisation de la géométrie du réservoir	26
1.2.3. Comportement du réservoir	30
1.2.4. Optimisation du réservoir	37
1.2.5. Perspectives	40
1.3. Les procédés de fabrication	41
1.3.1. Fabrication des embases	42
1.3.2. Fabrication des liners polymères	42
1.3.3. Fabrication du composite	45
1.3.4. Les avancées et perspectives (matériaux, thermoplastiques, etc.)	49
1.4. Remerciements.	54
1.5. Bibliographie.	55

Chapitre 2. Stockage géologique 61

Laurent TRUCHE et Frédéric-Victor DONZÉ

2.1. Introduction.	61
2.2. Le stockage souterrain de gaz	65
2.2.1. Concepts généraux	65
2.2.2. Stockage en cavités salines	66
2.2.3. Stockage en aquifères	67
2.2.4. Stockage en réservoirs de pétrole ou de gaz déplétés	69
2.2.5. Stockage dans d'anciennes mines de charbon	70
2.2.6. Stockage dans des cavernes de roche dure revêtues ou dans des cavités réfrigérées	70
2.2.7. Les retours d'expériences du passé.	71
2.3. Propriété hydrodynamique de l'hydrogène en contexte de stockage.	73
2.3.1. Interactions fluide-H ₂	73
2.3.2. Interactions solide-H ₂	78
2.4. Réactivité de l'hydrogène dans les environnements souterrains	85
2.4.1. Réactivité abiotique et catalyse surfacique	85
2.4.2. Réactivité microbienne.	90
2.5. Perspectives et défis scientifiques.	92
2.6. Bibliographie.	94

Chapitre 3. Stockage dans des liquides organiques : LOHC 105

Xiaolong Ji, Valérie MEILLE et Catherine PINEL

3.1. Introduction.	105
3.2. Hydrocarbures aromatiques	106
3.2.1. Introduction	106
3.2.2. Couples LOHC d'hydrocarbures aromatiques	110
3.3. Molécules contenant de l'azote	126
3.3.1. Introduction	126
3.3.2. N-hétérocycles.	127
3.3.3. Nitriles/amines	135
3.4. Molécules contenant de l'oxygène	136
3.4.1. Introduction	136
3.4.2. Monoalcools	137
3.4.3. Polyols	145
3.5. Amines/amides.	147
3.6. Comparaison et conclusion	147

3.7. Annexe : liste des abréviations	148
3.8. Bibliographie	149

Chapitre 4. Stockage liquide : ammoniac 171

Nicolas BION, Fabien CAN, Charlotte CROISÉ, Xavier COURTOIS
et Mohamed El Amine KRIBÉCHE

4.1. Introduction	171
4.2. L'ammoniac, vecteur énergétique	172
4.3. Compatibilité avec les piles à combustible	175
4.4. La synthèse d'ammoniac	176
4.4.1. Le procédé Haber-Bosch	176
4.4.2. Les catalyseurs de synthèse d'ammoniac	180
4.4.3. Les mécanismes et étapes limitantes de la synthèse de l'ammoniac	188
4.5. Les procédés alternatifs de synthèse d'ammoniac	191
4.6. La décomposition de l'ammoniac	194
4.6.1. Le craquage de l'ammoniac à haute température	194
4.6.2. L'électro-oxydation de l'ammoniac	197
4.7. Bilan et perspectives	201
4.8. Bibliographie	203

Chapitre 5. Stockage réversible de l'hydrogène : composés intermétalliques et matériaux à base de Mg 215

Ghofrane FEDLOUK, Hugo BENET, Valérie Paul BONCOUR, Judith MONNIER
et Junxian ZHANG

5.1. Introduction	215
5.2. Composés intermétalliques	217
5.2.1. Alliages de type BCC	217
5.2.2. Composés AB	219
5.2.3. Composés AB ₂	220
5.2.4. Composés AB ₅	222
5.2.5. Composés AB _x ($2 < x < 5$)	224
5.3. Matériaux à base de Mg	233
5.3.1. Hydrure de magnésium MgH ₂	233
5.3.2. Composés binaires à base de Mg	240
5.3.3. Composés ternaires à base de Mg	247
5.4. Conclusion	253
5.5. Bibliographie	255

Chapitre 6. Alliages à haute entropie pour le stockage de l'hydrogène 273

Nayely PINEDA ROMERO, Claudia ZLOTEA et Kylia MARCUS

6.1. Contexte	273
6.2. Alliages à haute entropie	275
6.2.1. Définition des HEA	275
6.2.2. Thermodynamique des HEA	279
6.2.3. Méthodes d'élaboration des HEA	283
6.2.4. Prédiction des phases des HEA et sélection des éléments	285
6.2.5. Microstructure des HEA	286
6.2.6. Très grands instruments pour la caractérisation des HEA	288
6.2.7. Propriétés de stockage de l'hydrogène dans les HEA	289
6.3. Revue sur les alliages à haute entropie	298
6.3.1. Les alliages à haute entropie cubiques centrés	298
6.3.2. Phases intermétalliques à haute entropie	306
6.4. Conclusions et perspectives	310
6.5. Bibliographie	311

Chapitre 7. Hydrures régénérables 325

Carlos A. CASTILLA-MARTINEZ, Jean-Louis BOBET et Umit B. DEMIRCI

7.1. Introduction	325
7.2. Hydrures alcalins	327
7.2.1. Hydrures MH avec M pour Li, Na ou K	327
7.2.2. Hydrolyse de LiH et production d'hydrogène	329
7.2.3. Régénération de LiH	331
7.3. Hydrures de magnésium	332
7.3.1. Préambule	332
7.3.2. L'hydrure MgH_2	333
7.3.3. Les alliages de magnésium	336
7.3.4. Régénération	338
7.4. Hydrures d'aluminium	339
7.4.1. Préambule	339
7.4.2. L'alane AlH_3	340
7.4.3. L'alanate de lithium $LiAlH_4$	343
7.5. Borohydrures alcalins	344
7.5.1. Préambule	344
7.5.2. Borohydrure de lithium $LiBH_4$	345
7.5.3. Borohydrure de sodium $NaBH_4$	346
7.5.4. Borohydrure de potassium KBH_4	350

7.6. Composés BNH	352
7.6.1. Présentation des composés BNH	352
7.6.2. Ammonia borane NH_3BH_3	352
7.6.3. Amidoboranes alcalins avec M pour Li, Na ou K	357
7.6.4. Hydrazine borane $\text{N}_2\text{H}_4\text{BH}_3$ et dérivés	359
7.6.5. Vers d'autres composés BNH	360
7.7. Conclusions et perspectives	360
7.8. Bibliographie	362

Chapitre 8. L'adsorption de l'hydrogène dans les matériaux poreux à surface spécifique élevée

379

Rafael MORALES-OSPINO, Alain CELZARD et Vanessa FIERRO

8.1. Introduction	379
8.2. Définition de l'adsorption et modèle d'adsorption de Gibbs	380
8.3. Comment exprimer la quantité en excès ?	383
8.4. Comparaison quantité en excès/quantité adsorbée	385
8.5. Quantité totale stockée et capacité de libération	387
8.6. Procédure expérimentale pour l'obtention d'isothermes à haute pression	389
8.6.1. Méthode gravimétrique	389
8.6.2. Méthode manométrique	391
8.7. Caractérisation des adsorbants pour le stockage de l'hydrogène	394
8.7.1. Volume et distribution de la taille des pores	395
8.7.2. Surface spécifique	400
8.8. Adsorbants pour le stockage de l'hydrogène	402
8.9. Conclusion	407
8.10. Bibliographie	408

Liste des auteurs	419
------------------------------------	------------

Index	421
------------------------	------------