

Table des matières

Introduction	1
Laure MONCONDUIT et Laurence CROGUENNEC	
Chapitre 1. NaMO₂ lamellaires à l'électrode positive	9
Shinichi KOMABA et Kei KUBOTA	
1.1. Historique de la recherche sur les oxydes lamellaires de métaux de transition comme matériaux d'électrode pour les batteries Na-ion jusqu'en 2009.	9
1.2. Structures cristallines des oxydes lamellaires.	12
1.2.1. Structures cristallines des composés Na _x MO ₂	12
1.2.2. Modifications structurales de O3-NaMO ₂ lors de l'extraction de Na	16
1.2.3. Modifications structurales de P2-Na _x MO ₂ par l'extraction de Na	18
1.3. Matériaux lamellaires de type O3.	20
1.3.1. NaMO ₂ (M = Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni).	20
1.3.2. O3-Na[M,M']O ₂ (M, M' = métaux de transition)	31
1.3.3. Stabilité de O3-NaMO ₂ à l'air humide et revêtement de surface	36
1.4. Matériaux lamellaires de type P2	38
1.4.1. Questions pratiques sur les matériaux de type P2 pour les batteries Na-ion.	38
1.4.2. P2-Na _{2/3} [Mn,Co,M]O ₂	40
1.4.3. P2-Na _{2/3} [Mn,Fe,M]O ₂	41
1.4.4. P2-Na _{2/3} [Ni,Mn,M]O ₂	43
1.5. Conclusion	43
1.6. Remerciements.	45
1.7. Bibliographie.	45

Chapitre 2. Des composés de type polyanioniques à l'électrode positive de batteries Na-ion	61
Long H.B. NGUYEN, Fan CHEN, Christian MASQUELIER et Laurence CROGUENNEC	
2.1. Introduction.	61
2.1.1. Des réseaux oxydes et polyanioniques comme matériaux d'électrodes positives pour batteries Na-ion	61
2.1.2. NASICON et $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3$	64
2.2. Les structures de type NASICON comme structures modèles dans les applications batteries Na-ion	68
2.2.1. Une diversité de compositions couvrant à la fois des électrolytes solides et des matériaux d'électrode	68
2.2.2. Des composés de type NASICON comme matériaux d'électrodes pour les batteries au Na	70
2.2.3. $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ (NVP).	73
2.3. $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3$, une structure hôte modèle pour les applications batteries Na-ion	89
2.3.1. Description structurale et diversité de composition	89
2.3.2. $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3$: un matériau actif prometteur à l'électrode positive de NIB	91
2.3.3. Substitution de l'oxygène au fluor dans $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3$ et ses effets sur les performances électrochimiques des phases substituées	96
2.3.4. Ouvrir la voie à $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3$ avec des performances supérieures	102
2.4. Conclusion	108
2.5. Bibliographie.	109

Chapitre 3. Le carbone dur pour les batteries Na-ion : de la synthèse aux performances et mécanismes de stockage	123
Carolina DEL MAR SAAVEDRA RIOS, Adrian BEDA, Loic SIMONIN et Camélia MATEI GHIMBEU	

3.1. Introduction.	123
3.2. Définition du carbone dur	125
3.3. Synthèse et microstructure du carbone dur	127
3.3.1. Synthèse du carbone dur à base de précurseurs synthétiques	129
3.3.2. Synthèse du carbone dur dérivé de biopolymères	133
3.3.3. Synthèse du carbone dur à partir de la biomasse.	135
3.4. Caractéristiques du carbone dur.	139
3.4.1. Structure du carbone dur.	139

3.4.2. Porosité du carbone dur	142
3.4.3. Chimie de la surface du carbone dur	146
3.4.4. Défauts structuraux du carbone dur	149
3.5. Performances électrochimiques	152
3.5.1. Performances des matériaux.	152
3.5.2. Performances en système complet Na-ion	157
3.5.3. Mécanismes d'insertion du sodium dans le carbone dur	159
3.6. Conclusion	164
3.7. Bibliographie.	165

Chapitre 4. Électrodes négatives non carbonées pour batteries au sodium 175

Vincent GABAUDAN, Moulay Tahar SOUGRATI, Lorenzo STIEVANO
et Laure MONCONDUIT

4.1. Introduction.	175
4.2. Matériaux d'insertion	177
4.2.1. Anodes d'insertion à base d'oxyde de titane et de titanates	177
4.2.2. Anodes d'insertion à base de chalcogénures de métaux de transition	186
4.2.3. Anodes d'insertion à base de MXene	188
4.2.4. Anodes organiques d'insertion	190
4.3. Matériaux d'électrode négative basés sur un alliage électrochimique avec le sodium.	191
4.3.1. Le silicium et le germanium.	192
4.3.2. L'étain	194
4.3.3. Le phosphore	195
4.3.4. L'antimoine	199
4.3.5. Autres éléments métalliques post-transitionnels	203
4.4. Matériaux d'électrode négative basés sur des réactions de conversion	205
4.4.1. Mécanismes de réaction des matériaux de conversion	208
4.4.2. Vers des anodes de conversion efficaces pour les NIB	213
4.5. Conclusion	217
4.6. Bibliographie.	218

Chapitre 5. Électrolytes pour batteries au sodium 237

Faezeh MAKHLOOGHIAZAD, Cristina POZO-GONZALO,
Patrik JOHANSSON et Maria FORSYTH

5.1. Introduction.	237
5.2. Les électrolytes liquides et solides pour les batteries au sodium.	239
5.2.1. Les électrolytes liquides organiques	240

5.2.2. Les électrolytes à base d'IL	243
5.2.3. Les électrolytes hybrides.	247
5.2.4. Effets des additifs et des impuretés	248
5.2.5. Les électrolytes solides.	249
5.3. Propriétés des électrolytes à base d'IL pour les batteries au sodium . .	255
5.3.1. Les propriétés physiques.	255
5.3.2. La stabilité thermique	257
5.3.3. La stabilité électrochimique.	258
5.4. La modélisation des électrolytes à base d'IL	258
5.5. Conclusion	261
5.6. Liste des abréviations	263
5.7. Bibliographie.	265

Chapitre 6. L'interphase solide à l'interface électrode-électrolyte dans les batteries au Na ? 275

Le Anh MA, Ronnie MOGENSEN, Andrew J. NAYLOR et Reza YOUNESI

6.1. Introduction.	275
6.1.1. L'interphase de l'électrolyte solide (SEI).	275
6.1.2. Caractérisation de la SEI.	276
6.2. Propriétés physiques de la SEI d'une batterie Na-ion	279
6.2.1. Stabilité électrochimique	279
6.2.2. Propriétés mécaniques	280
6.2.3. Dissolution des composants de la SEI.	281
6.3. Comparaisons de la SEI dans les électrolytes à base de sodium et de lithium	284
6.3.1. Formation et composition	284
6.3.2. Résistance	290
6.4. Conclusion	293
6.5. Bibliographie.	293

Chapitre 7. Batteries contenant des matériaux d'électrodes analogues au bleu de Prusse 297

Colin D. WESSELLS

7.1. Introduction.	297
7.1.1. Introduction du chapitre	297
7.1.2. Histoire du bleu de Prusse.	297
7.1.3. Caractéristiques physiques : structure, composition et morphologie	298
7.1.4. Méthodes synthétiques.	302
7.2. L'électrochimie des analogues du bleu de Prusse (PBA).	305

7.2.1. Mécanisme et caractéristiques correspondantes	305
7.2.2. Potentiels de réaction.	307
7.2.3. Les matériaux d'électrode positive de type PBA	311
7.2.4. Les matériaux d'électrode négative de type PBA	319
7.3. Batteries à base de bleu de Prusse.	326
7.3.1. Cellules contenant deux électrodes de type PBA	326
7.3.2. Cellules contenant une électrode de type PBA.	335
7.3.3. Les défis des batteries de type PBA	339
7.4. Conclusion	341
7.5. Bibliographie.	342

Chapitre 8. Conception, performance et commercialisation de la technologie des batteries non aqueuses Na-ion de Faradion

Ashish RUDOLA, Fazlil COOWAR, Richard HEAP et Jerry BARKER

349

8.1. Introduction.	349
8.2. Données expérimentales	351
8.2.1. Matériaux actifs	351
8.2.2. Fabrication d'électrodes	354
8.2.3. Fabrication de <i>pouch cells</i>	355
8.2.4. Électrolyte de Faradion	357
8.3. Performances des cellules	357
8.3.1. Cyclage en demi-cellules	357
8.3.2. Cyclage des batteries Na-ion complètes : courbes et stabilité . . .	358
8.3.3. Capacité à régime variable	360
8.3.4. Études sur la température	361
8.3.5. Études des cellules à trois électrodes	362
8.4. Sécurité et stockage et transport à énergie nulle	364
8.5. Mise à l'échelle et prototypage	368
8.6. Démonstrateurs : des batteries et des emballages.	369
8.7. Stratégie en matière de commerce et de propriété intellectuelle	372
8.8. Analyse des coûts	375
8.9. Développements futurs	376
8.10. Conclusion	380
8.11. Remerciements	381
8.12. Bibliographie	381

Liste des auteurs. 383

Index 387