

Table des matières

Introduction	11
Chapitre 1. Elaboration des nanoparticules	15
1.1. Elaboration en phase solide : broyage mécanique	16
1.1.1. Principe	17
1.1.2. Les principaux types de broyeurs	20
1.1.2.1. Le broyeur à vibration	20
1.1.2.2. L'attriteur	20
1.1.2.3. Le broyeur à anneaux	20
1.1.2.4. Le broyeur planétaire	21
1.1.3. Les paramètres de broyage	21
1.1.3.1. Energie transmise	22
1.1.3.2. Durée de broyage	24
1.1.3.3. Nature des <i>media</i>	25
1.1.3.4. Taille des billes	25
1.1.3.5. Rapport entre la masse des billes et la masse de la poudre	26
1.1.3.6. Taux de remplissage	27
1.1.3.7. Atmosphère de broyage	27
1.1.3.8. Agent de contrôle	27
1.1.3.9. Température de broyage	28
1.1.4. Mécanosynthèse	28
1.1.5. Conclusion	35
1.2. Elaboration en phase liquide	35
1.2.1. Sonochimie	35
1.2.1.1. Principe	35

1.2.1.2. Effets des paramètres de mise en œuvre	35
1.2.1.3. Conclusion.	40
1.2.2. Synthèse par micro-émulsions	40
1.2.2.1. Définition	40
1.2.2.2. Préparation des nanoparticules	41
1.2.2.3. Mécanismes mis en jeux	41
1.2.2.4. Influence des paramètres de mise en œuvre	43
1.2.2.5. Conclusion.	45
1.2.3. Synthèses solvothermales	45
1.2.3.1. Principe	46
1.2.3.2. Effet de la température	53
1.2.3.3. Effet de la concentration de précurseur	54
1.2.3.4. Effet de la présence de tensioactif	54
1.2.3.5. Effet du pH	54
1.2.3.6. Effet du solvant.	55
1.2.3.7. Effet de l'anion	55
1.2.3.8. Effet de la durée	55
1.2.3.9. Synthèses assistées par micro-ondes	56
1.2.3.10. Conclusion	56
1.2.4. Synthèses sol-gel	57
1.2.4.1. Principe	57
1.2.4.2. Influence des conditions opératoires	58
1.2.4.3. Conclusion.	60
1.3. Elaboration en phase gazeuse	61
1.3.1. Par condensation dans un gaz inerte	61
1.3.1.1. Principe	61
1.3.1.2. Influence des conditions opératoires	61
1.3.1.3. Conclusion.	64
1.3.2. Explosion de fils métalliques	64
1.3.2.1. Principe	64
1.3.2.2. Influence des conditions opératoires	65
1.3.2.3. Passivation.	65
1.3.2.4. Conclusion.	66
1.3.3. Synthèse par plasma thermique.	66
1.3.3.1. Décharges continues (DC) et basses fréquences (AC)	66
1.3.3.2. Plasma radiofréquence (RF)	69
1.3.3.3. Plasma par décharges micro-ondes	71
1.3.3.4. Plasma thermique en solution	75
1.3.4. Ablation laser	78
1.3.4.1. Impulsion longue.	79
1.3.4.2. Impulsions ultrabrèves (picosecondes et femtosecondes)	81

1.3.4.3. Expansion du plasma sous vide ou sous faible pression . . .	82
1.3.4.4. Ablation laser dans les liquides	84
1.3.4.5. Effet des paramètres lasers	89
1.3.4.6. Conclusion.	92
1.3.5. Synthèse pyrotechnique	93
1.3.5.1. Synthèse par détonation	93
1.3.5.2. Synthèse par déflagration	101
1.3.5.3. Synthèse par combustion	102
1.3.5.4. Conclusion.	105
Chapitre 2. Les procédés de préparation des nanothermites	107
2.1. Introduction.	107
2.2. Le mélange physique	109
2.2.1. Mélange dans l'hexane.	109
2.2.2. Mélange dans l'isopropanol	112
2.2.3. Mélange dans l'eau	115
2.2.4. Mélange dans d'autres solvants.	116
2.2.5. Mélange à sec	117
2.2.6. Synthèse par aérosolisation de « briques » pour le mélange physique	118
2.2.6.1. Particules d'oxydant simple	118
2.2.6.2. Particules d'oxydant composite	119
2.2.6.3. Nanoparticules organiques	121
2.3. L'enrobage	121
2.3.1. L'enrobage de l'oxyde par le fuel	121
2.3.2. L'enrobage du fuel par l'oxyde	123
2.3.3. L'enrobage du fuel par une couche métallique.	125
2.4. Le procédé sol-gel.	125
2.4.1. Formation d'oxyde autour de particules de métal	126
2.4.2. Préparation d'oxydes mélangés ultérieurement au métal.	129
2.5. L'imprégnation de solides poreux	132
2.6. L'assemblage.	135
2.6.1. Procédés chimiques.	135
2.6.2. Procédés biologiques.	138
2.6.3. Procédés électriques	139
2.6.3.1. L'électrolyse et l'électrophorèse.	140
2.6.3.2. La coagulation bipolaire.	141
2.6.3.3. L'électronébulisation	141
2.6.3.4. L'électrofilage	142

2.7. La structuration à la surface de substrats	143
2.8. Conclusions et perspectives	146

Chapitre 3. L'étude expérimentale des nanothermites 147

3.1. Introduction	147
3.2. Etude et propriétés des principaux fuels	148
3.2.1. L'aluminium nanométrique	149
3.2.1.1. Caractérisation de l'aluminium nanométrique	153
3.2.1.2. Mécanismes de réaction de l'aluminium nanométrique	158
3.2.1.3. Formes particulières de l'aluminium	176
3.2.2. Les autres fuels d'intérêt	178
3.2.2.1. Le bore nanométrique	178
3.2.2.2. Le zinc nanométrique	179
3.2.2.3. Le magnésium nanométrique	181
3.2.2.4. Le titane nanométrique	182
3.2.2.5. Le phosphore rouge	182
3.2.2.6. Autres fuels	186
3.3. Les oxydants d'intérêt pour les nanothermites	187
3.3.1. Les oxydes métalliques ou métalloïdiques	187
3.3.1.1. L'oxyde d'argent (Ag_2O)	189
3.3.1.2. L'oxyde de bismuth (Bi_2O_3)	190
3.3.1.3. L'oxyde de cobalt (Co_3O_4)	192
3.3.1.4. L'oxyde de chrome (Cr_2O_3)	192
3.3.1.5. L'oxyde de cuivre (CuO)	193
3.3.1.6. L'oxyde de fer (Fe_2O_3)	198
3.3.1.7. L'oxyde d'iode (I_2O_5)	200
3.3.1.8. L'oxyde de manganèse (MnO_2)	202
3.3.1.9. L'oxyde de molybdène (MoO_3)	203
3.3.1.10. L'oxyde de nickel (NiO)	206
3.3.1.11. L'oxyde d'étain (SnO_2)	207
3.3.1.12. L'oxyde de titane (TiO_2)	208
3.3.1.13. L'oxyde de tungstène (WO_3)	208
3.3.1.14. L'oxyde zinc (ZnO)	209
3.3.2. Les sels oxydants	210
3.4. Méthodes de caractérisation des nanothermites	216
3.4.1. Caractérisation réactive	216
3.4.1.1. Analyse thermique	217
3.4.1.2. Allumage par rayonnement laser	220
3.4.1.3. Tests en gouttière	222
3.4.1.4. Tests en tube	223

3.4.1.5. Tests radiaux	227
3.4.1.6. Tests en bombe	228
3.4.1.7. Microtests de combustion	232
3.4.1.8. Tests d'impact	236
3.4.1.9. Mesures pyrométriques	237
3.4.2. Caractérisations morphologiques	238
3.4.2.1. Techniques de microscopie	239
3.4.2.2. Diffraction des rayons X	242
3.4.2.3. Mesures d'aire spécifiques	242
3.5. Conclusion : les performances des nanothermites et leur amélioration	245
Chapitre 4. Les nanothermites et la sécurité	249
4.1. Introduction	249
4.2. Sécurité pyrotechnique	249
4.2.1. Définition et mesure de la sensibilité	250
4.2.2. Techniques d'insensibilisation des nanothermites	252
4.2.3. Evaluation du risque pyrotechnique	256
4.2.4. Aspects réglementaires	259
4.3. Neutralisation des nanothermites	260
4.4. Risque toxicologique	263
4.4.1. Toxicité des constituants et des produits de réaction des nanothermites	264
4.4.2. Analyses des risques spécifiques et bonnes pratiques	270
4.5. Conclusions et perspectives	277
Conclusion	279
Bibliographie	283
Index	349