

EDITION PUBLIQUE

Rapport final

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020

Pierre-François LOUVIGNÉ

-

Étude menée dans la cadre du groupe de travail TITANE piloté par le

Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire

Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature

Direction de l'eau et de la biodiversité

Sous-direction de la protection et de la gestion de l'eau, des ressources minérales et des écosystèmes aquatiques

Bureau de la politique des ressources minérales non énergétiques

Mars 2021

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	2/158

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
LISTE DE FIGURES	6
LISTE DES TABLEAUX	8
<i>Introduction</i>	9
PREMIERE PARTIE : Evolution de la demande	14
I Evolution du prix des matières premières	15
I.1 Marché libre européen	15
I.2 Marché intérieur chinois	19
I.3 Marché intérieur américain	20
II Evolution de la demande mondiale de titane jusqu'en 2019	22
II.1 Évolution de la demande aux USA	25
II.2 Évolution de la demande en CEI	30
II.3 Évolution de la demande en Chine	32
II.4 Évolution de la demande au Japon	36
II.5 Évolution de la demande en Europe	38
III Perspectives pour le marché aéronautique	40
III.1 Impact de la pandémie du Covid-19 sur le secteur aéronautique	41
III.2 Feuille de route de l'aéronautique à l'horizon 2050 (IATA)	43
III.3 Avions de ligne en 2021 (capacité supérieure à 100 sièges)	46
III.3.1 Airbus & Boeing	47
III.3.2 COMAC (Chine)	51
III.3.3 UAC (Russie)	52
III.4 Avions régionaux en 2021 (avion jusqu'à 130 à 149 sièges)	53
III.4.1 Embraer (Brésil)	55
III.4.2 Mitsubishi (Japon)	56
III.4.3 Bombardier (Canada)	56
III.4.4 Avic Commercial Aircraft Corporation (Chine)	57
III.4.5 Programmes russes d'avions régionaux	58
IV Perspectives pour le marché « Défense »	59
IV.1 Domaine terrestre	60
IV.1.1 Blindages	60
IV.1.2 Applications structurales	61
IV.2 Aéronautique militaire	62
IV.2.1 Programmes européens	62

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	3/158

IV.2.2	Programmes américains	63
IV.2.3	Programmes russes	66
IV.2.4	Programmes chinois	67
IV.3	Domaine naval militaire	68
V	<i>Perspectives pour les applications industrielles</i>	69
V.1	Besoin en énergie	70
V.1.1	Pétrole et autres carburants liquides	74
V.1.2	Gaz naturel (dont GNL)	76
V.1.3	Nucléaire	79
V.1.4	Charbon	82
V.1.5	Energies renouvelables	84
V.1.6	Énergie thermique des mers	84
V.2	Chimie	87
V.3	Dessalement	88
VI	<i>Perspectives pour le marché des biens de consommation</i>	90
VI.1	Applications grand public : sport, lunetterie, luxe & électronique nomade	90
VI.2	Médical	91
VI.3	Transports terrestres	92
VI.4	Constructions navales civiles : marine marchande, yacht & plaisance	94
VI.5	Architecture	94
DEUXIEME PARTIE : Evolution de l'Offre		96
VII	<i>Minerai de titane</i>	97
VII.1	Rutile naturel	97
VII.2	Rutile synthétique	97
VII.3	Slag de titane	98
VII.4	Du minerai à l'éponge de titane	98
VIII	<i>Eponge de titane</i>	99
VIII.1	Évolution des capacités mondiales de production d'éponge	99
VIII.1.1	Éponge de qualité aéronautique	105
VIII.2	Évolution de la production d'éponge	106
IX	<i>Lingots & demi-produits en titane</i>	108
IX.1	Évolution des capacités de production de lingot	108
IX.2	Évolution de la production de lingot et de demi-produits en titane	109
IX.3	Faits marquants de l'offre en lingot & demi-produits	110
IX.3.1	Kazakhstan	110
IX.3.2	France	111
IX.3.3	USA	111
IX.3.4	Russie	113

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	4/158

IX.3.5	Ukraine	114
IX.3.6	Chine	114
X	<i>Nouveaux procédés d'extraction</i>	114
X.1	Procédé FFC	116
X.2	Procédé Armstrong	117
X.3	Procédé MER	118
X.4	Procédé JTS	118
X.5	Poudres d'hydrure de titane (procédé HDH)	119
X.6	Procédé TiRO	120
X.7	Procédé CSIR	120
X.8	Procédé Bradford	120
XI	<i>Innovations dans les procédés de mise en œuvre</i>	121
XI.1	Technologies de fabrication additive	121
XI.2	Développements industriels	122
XI.3	Développements dans les technologies de soudage	125
XII	<i>CONCLUSION</i>	127
	<i>ANNEXES</i>	133
XIII	<i>ANNEXE : Techniques de fusion à foyer froid</i>	134
XIV	<i>ANNEXE : Historique du prix de l'éponge</i>	136
XV	<i>ANNEXE : Historique du prix du ferrotitane 70%</i>	137
XVI	<i>ANNEXE : Scenarii d'évolution du prix des matières premières</i>	138
XVII	<i>ANNEXE : Références historiques de prix des matières premières</i>	139
XVIII	<i>ANNEXE : historique consommation mondiale 2003-2009</i>	140
XIX	<i>ANNEXE : Emploi des composites dans les avions de nouvelle génération</i>	140
XX	<i>ANNEXE : Historique de production d'Airbus et Boeing</i>	141
XXI	<i>ANNEXE : Prises de commande d'Airbus et de Boeing</i>	142
XXII	<i>ANNEXE : Backlog de commande Airbus & Boeing</i>	143
XXIII	<i>ANNEXE : Nacelle du C919 (chine)</i>	144
XXIV	<i>ANNEXE : Blindages en titane</i>	145
XXV	<i>ANNEXE : Canon Howitzer 155mm châssis en titane</i>	146
XXVI	<i>ANNEXE: Châssis en titane pour le futur véhicule FCS</i>	147

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	5/158

XXVII	ANNEXE : Programmes nucléaires	148
XXVIII	ANNEXE : Energie thermique des océans (OTEC)	149
XXIX	ANNEXE : Technologie de Production d'éponge	151
XXX	ANNEXE : Standards de qualité d'éponge de titane	152
XXXI	ANNEXE : Procédé de traitement de l'éponge de titane	154
XXXII	ANNEXE : Mise en forme des poudres ADMA (HDH)	155
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	156

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	6/158

LISTE DE FIGURES

Figure 1: Prix de l'éponge de titane sur le marché libre européen [ref.3]	16
Figure 2: Prix du scrap et de l'éponge de titane sur le marché libre européen [réf.3]	17
Figure 3: Prix du FeTi70% sur le marché libre européen [réf.3]	18
Figure 4: Prix de l'éponge sur les marchés chinois et européen [réf. 6]	19
Figure 5: Prix du ferrotitane en Chine, aux USA et sur le marché libre européen [réf.3]	20
Figure 6: Prix du ferrotitane et du scrap de titane sur le marché intérieur US [réf.3]	21
Figure 7: Evolution de la consommation mondiale de titane jusqu'en 2019 (en volume)	23
Figure 8: Evolution comparée de la consommation de titane par secteur (en volume)	24
Figure 9: Consommation de titane aux USA	25
Figure 10: Consommation et stock de mat. 1 ^{ères} et production de lingots aux USA [réf.4]	27
Figure 11: Stocks industriels de matières 1 ^{ères} et de lingots aux USA [réf.4]	28
Figure 12: Ratio d'emploi éponge/scrap pour la production de lingot aux USA [réf.4]	28
Figure 13: Importation et consommation de matières premières aux USA	29
Figure 14: Évolution de la consommation de titane sur le marché intérieur CEI [réf.5]	31
Figure 15: Évolution de la consommation de titane du secteur industriel en CEI [réf.5]	31
Figure 16: Consommation de titane sur le marché intérieur chinois par secteur 2010-2019 [réf.6]	32
Figure 17: Import – Export de produits en titane comparé à la consommation intérieure en Chine [réf.6]	35
Figure 18: Import-Export d'éponge de titane en Chine [réf.6]	35
Figure 19: Consommation de titane au Japon par secteur 1995 – 2019 [réf. 7]	36
Figure 20: Comparaison consommation intérieure/export au Japon [réf. 7]	37
Figure 21: Exportations d'éponge du Japon [réf. 7]	38
Figure 22: Évolution de la consommation de titane dans le secteur aéronautique	41
Figure 23: Objectif de réduction d'émission de CO2 pour l'aéronautique [ref. 14]	42
Figure 24: Démonstrateur d'aile volante MAVERIC de type BWB (source : Airbus)	43
Figure 25: Concept de fuselage dédoublé (source : NASA)	44
Figure 26: Concept de soufflante non carénée (source : Safran)	44
Figure 27: Concept favorisant l'ingestion des couches limites (source : ONERA)	44
Figure 28: Train électromagnétique supersonique (source : Hyperloop TT)	45
Figure 29: Boeing 2707 (source : Boeing - archives Air & Cosmos)	46
Figure 30: Tupolev 144 (source : Wikipedia)	46
Figure 31: Consommation de titane pour Airbus et Boeing	50
Figure 32: Prévision de croissance du trafic aérien avant et après Covid-19 [ref.17].	54
Figure 33: Prévision de la consommation en titane des programmes d'avions régionaux	55
Figure 34: Évolution du trafic aérien Russie [ref.17]	58
Figure 35: Évolution de la consommation de titane dans les applications militaires	60
Figure 36: Consommation de titane dans le secteur « Industrie »	70
Figure 37: Évolution du mix énergétique à l'horizon 2040 selon ExxonMobil [ref. 31]	72
Figure 38: Évolution du mix énergétique à l'horizon 2050 selon BP [ref. 32]	73
Figure 39: Évolution du mix énergétique dans le scénario Rapid de BP [ref. 32]	73
Figure 40: Évolution de la production de pétrole et gaz de schiste aux USA [ref.34]	75
Figure 41: Évolution du prix du baril de pétrole (cours du Brent) [ref.34]	75
Figure 42: Évolution de la consommation de pétrole selon BP [ref.32]	76
Figure 43: Évolution de la consommation de gaz selon BP [ref.32]	77
Figure 44: Principaux flux d'approvisionnement en gaz et GNL dans le monde (en milliards de m ³) [ref.36]	78
Figure 45: Producteurs et pays importateurs de GNL à l'horizon 2035 [ref.37]	79
Figure 46: Évolution des capacités de production d'électricité par le nucléaire [réf.41]	80
Figure 47: Réacteurs nucléaires en construction dans le monde en décembre 2020 [réf.39]	81
Figure 48: Capacités nucléaires mondiales : retraits de service et nouvelles capacités [réf.39]	81
Figure 49: Production et consommation de charbon dans le monde [ref.33]	83
Figure 50: Evolution de la demande en titane dans le secteur des biens de consommation	90
Figure 51: Filière de transformation des minerais titanifères	99

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	7/158

<i>Figure 52: Capacités mondiales de production d'éponge 2010 – 2020</i>	100
<i>Figure 53: Capacités de production d'éponge de qualité aéronautique 2006 – 2020</i>	105
<i>Figure 54: Évolution de la production mondiale d'éponge de titane 2003 – 2019</i>	107
<i>Figure 55: Capacité et de la production effective mondiale d'éponge 2006 – 2019</i>	107
<i>Figure 56: Évolution des capacités de fusion de lingot de titane par pays</i>	108
<i>Figure 57: Capacités mondiales de fusion de lingot en tonnes liquides en 2020</i>	109
<i>Figure 58: Capacité de fusion et production effective de lingot de titane 2006 – 2019</i>	110
<i>Figure 59: Principe de fusion à foyer froid par faisceau d'électrons EB (source :Timet)</i>	134
<i>Figure 60: Principe de fusion à foyer froid par torche plasma PAM (source Timet)</i>	135
<i>Figure 61: Évolution du prix de l'éponge de qualité métallurgique entre 2005 et 2007 [réf.3]</i>	136
<i>Figure 62: Évolution du prix du ferrotitane 70% entre 2002 et 2007 [réf.3]</i>	137
<i>Figure 63: Utilisation des matériaux composites et des métaux dans l'A350 et le B787</i>	141
<i>Figure 64: Historique des livraisons annuelles d'avions d'Airbus et Boeing (1994-2020)</i>	141
<i>Figure 65: Historique des prises de commande d'Airbus et de Boeing (1994-2020)</i>	142
<i>Figure 66: Évolution du backlog d'Airbus et de Boeing (1994-2020)</i>	143
<i>Figure 67: Nouvelle technologie de nacelle « moteur » de l'avion chinois C919</i>	144
<i>Figure 68: Exemples de kits de protection balistique en titane [réf. 21]</i>	145
<i>Figure 69: Châssis en titane du canon d'artillerie Howitzer de 155mm [réf.23]</i>	146
<i>Figure 70: Projet de châssis en titane du "Futur Combat System" (US Army)</i>	147
<i>Figure 71: Principe de la technologie OTEC,</i>	149
<i>Figure 72: Procédé de traitement de l'éponge de titane chez VSMPO-AVISMA (Russie)</i>	154
<i>Figure 73: Mise en forme et transformation de produits titane élaboré à partir de TiH2 [réf. 69]</i>	155

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	8/158

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1: Production de minerais de titane en 2019 [réf.2]</i>	10
<i>Tableau 2: Consommation mondiale de titane (2009-2019)</i>	22
<i>Tableau 3: Consommation de titane aux USA [réf.4]</i>	26
<i>Tableau 4: Consommation de titane sur le marché intérieur chinois [réf.6]</i>	32
<i>Tableau 5: Évolution de la consommation de titane en Europe</i>	38
<i>Tableau 6: Importation d'éponge et de produits en titane en Europe [réf.8,9,10,11]</i>	39
<i>Tableau 7: Exportation d'éponge et de produits en titane depuis l'Europe [réf.8,9,10,11]</i>	39
<i>Tableau 8: Cadences de production d'Airbus</i>	48
<i>Tableau 9: Cadences de production de Boeing</i>	50
<i>Tableau 10: Prévission de cadences de production annuelles du C919</i>	52
<i>Tableau 11: Cadence annuelle de livraison de l'ARJ21</i>	57
<i>Tableau 12: Cadences de production annuelles du F-35 (Joint Strike Fighter)</i>	64
<i>Tableau 13: Principaux programmes aéronautiques militaires aux USA</i>	66
<i>Tableau 14: Mécanisme d'évolution des prix et de disponibilité des matières premières</i>	138
<i>Tableau 15: Prix des matières premières en fonction de l'équilibre offre-demande</i>	139
<i>Tableau 16: Evolution de la consommation mondiale de titane entre 2003 et 2009</i>	140
<i>Tableau 17: Réacteurs nucléaires en service et en cours de construction [réf.39]</i>	148
<i>Tableau 18: Projets OTEC dans le monde (mai 2017) [réf.78]</i>	150
<i>Tableau 19 : Comparaison des différentes technologies de production d'éponge [Réf.79]</i>	151
<i>Tableau 20: Standards de qualité des éponges chinoises, japonaises</i>	153

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	9/158

INTRODUCTION

Le titane est un élément métallique découvert en 1791 par Sir William Gregor¹, pasteur britannique et géologue amateur. Identifié à partir du minerai d'ilménite (FeTiO_2), le titane n'a été isolé sous sa forme métallique pure qu'en 1910 par Mathew H. Hunter aux Etats-Unis pour le compte de la General Electric Company. Son procédé de réduction du TiCl_4 par du sodium fut supplanté par le procédé de réduction au magnésium développé dans les années 30 par William J. Kroll. Depuis la première démonstration de sa capacité de production commerciale en 1946, le procédé Kroll est devenu le procédé de référence pour la production du titane. Malgré les recherches menées dans le domaine, aucune technologie alternative n'a encore réussi à détrôner ce procédé.

Comparé à l'acier, le titane a des performances mécaniques comparables pour une densité deux fois plus faible (4,51) et un point de fusion plus élevé (1670°C). Il conserve de bonnes propriétés mécaniques à très basse température. D'un point de vue chimique, sa résistance à la corrosion est supérieure à celles des aciers inoxydables. Le titane est un métal physiologiquement inerte et amagnétique ; il se caractérise également par une conductivité thermique et électrique basse et un faible coefficient de dilatation linéaire.

Employé sous une forme faiblement alliée dans de nombreuses applications industrielles (nuances T35, T40, T60...), le titane est aussi décliné en alliages à propriétés optimisées pour répondre à des besoins plus pointus : les alliages alpha, les alliages beta et les alliages alpha – beta. Le plus utilisé est l'alliage biphasé TA6V développé initialement pour le secteur aéronautique. Une trentaine de familles d'alliages est aujourd'hui disponible pour couvrir les besoins industriels.

Le titane est le 9^{ème} élément le plus abondant sur Terre (0.44% à 0.6% de la croûte terrestre, selon les estimations) et se classe 4^{ème} dans la liste des métaux après le fer, l'aluminium et le magnésium. Il est extrait de minerais, principalement d'ilménite (FeTiO_3 – réserve mondiale^a estimée à 770 millions de tonnes² d'équivalent TiO_2) et de rutil (TiO_2 – réserve mondiale estimée à 47 millions de tonnes [réf.2]). On trouve le minerai en grandes quantités en Australie, en Chine, en Inde, en Afrique du Sud et, en quantité plus modeste au Brésil, à Madagascar, en Norvège, au Kenya, au Sénégal, en Russie, au Canada etc.

Le minerai de titane utilisé pour la production de titane métal ne représente qu'une infime partie de la consommation totale. En effet, sur une production mondiale de l'ordre de 7 millions de tonne d'ilménite et de rutil en 2019 [réf.2], seulement quelques pour cent ont été utilisés pour produire de l'éponge de titane^b. La grande majorité de la production est utilisé dans l'industrie du pigment, en particulier comme agent de blanchiment du papier et des peintures.

^a Réserve naturelle présentant un potentiel d'extraction économiquement rentable

^b Matière première de la filière « titane métal », voir page suivante

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	10/158

Le minerai est également utilisé sous forme de ferrotitane^c à faible teneur en titane ou transformé en carbures et autres composés chimiques.

Les chiffres de l'exploitation minière d'ilménite et de rutil en 2019 sont présentés dans le tableau suivant :

<i>En milliers de tonnes d'équivalent TiO₂</i>	Ilménite	Rutile
Chine	2.100	
Afrique du Sud	820	110
Canada	690	
Australie	660	140
Mozambique	590	8
Ukraine	380	94
Inde	320	14
Madagascar	300	
Sénégal	290	9
Norvège	260	
Kenya	200	74
Vietnam	150	
USA	100	
Brésil	70	
Sierra Leone		120
Autres	90	29
Total monde	7.000	600

Tableau 1: Production de minerais de titane en 2019 [réf.2]

Dans la filière de production du titane métal, le TiO₂ est transformé en TiCl₄ par procédé de chloration puis réduit par réaction avec du sodium (procédé Hunter) ou avec du magnésium (procédé Kroll) pour obtenir un matériau très poreux appelé éponge de titane.

La réaction suivante a lieu : $TiCl_4 + 2Mg \rightarrow Ti + 2 MgCl_2$

Le procédé Kroll est aujourd'hui le procédé le plus utilisé dans l'industrie parce qu'il évite le danger de la manipulation du sodium. Néanmoins, il reste une étape de production délicate en raison du caractère fortement exothermique de formation du TiCl₄ et de la complexité des traitements chimiques.

Le MgCl₂ est progressivement retiré du réacteur et recyclé dans un bain électrolytique en magnésium et chlore. Une fois la réaction de réduction terminée, l'éponge subit différents traitements : broyage, concassage, découpe etc. Elle est également débarrassée des sels de magnésium soit par lavage à l'acide chlorhydrique et séchage soit par distillation sous vide (entre 1000°C et 1065°C pendant 85 heures).

^c Élément d'addition pour la sidérurgique

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	11/158

La production d'un kilogramme d'éponge de titane nécessite environ 4,4 kg de $TiCl_4$ et 1,5 kg de magnésium.

Après l'étape de production de l'éponge, vient la fabrication du lingot de titane. Ce lingot est obtenu par une technique de fusion. Plusieurs voies existent :

- La technique de fusion sous vide par électrode consommable ou VAR (Vacuum Arc Reduction) ;
- Les techniques de fusion à foyer froid^d par faisceau d'électron EB (Electron Beam) ou par source plasma PAM (Plasma Arc Melting) ;
- La technique de fusion par induction ISM (Induction Skull Melting)

Pour fabriquer un lingot de titane pur, la matière fondue peut être soit exclusivement de l'éponge, soit un mélange d'éponge et de déchet de titane (scrap), soit exclusivement du déchet de titane. Les lingots d'alliage de titane sont obtenus en mélangeant à la matière titane les éléments d'addition, comme le vanadium et l'aluminium, pour obtenir, après fusion, l'alliage souhaité. L'alliage le plus couramment utilisé est le TA6V. En fonction des techniques de fusion utilisées et selon les besoins d'homogénéité des produits obtenus, le cycle de production peut comprendre deux, voire trois fusions successives du même lingot.

Dans la filière de production actuelle, les lingots de titane sont en général transformés par forgeage à chaud et usinage pour obtenir des demi-produits sous forme de brames^e, bloom^f ou billette^g. On distingue les demi-produits longs (barres) et les demi-produits plats (tôles). Les produits finis (feuilles, bobines, barres, plaques, câbles, tubes, pièces de forge, matricés etc.) par différentes étapes de transformation de laminage, forgeage, extrusion, usinage etc. Les pièces de fonderie sont réalisées souvent directement à partir du lingot de fusion auquel est rajoutée une proportion variable de scrap. De nombreuses recherches sont menées pour introduire des filières de production alternatives plus courtes et plus économiques. Ainsi, de nouvelles techniques permettant d'obtenir plus directement des pièces proches des cotes finies sont en cours de développement, en particulier dans le domaine des méthodes de production additives à base de poudre et de fil.

Du fait de la grande réactivité et de la faible conductivité thermique du titane, le travail de transformation et de parachèvement de ce métal nécessite des précautions et des méthodes particulières qui constituent un savoir-faire spécifique. Une attention particulière est portée aux traitements thermomécaniques dans le but de maîtriser la métallurgie dans la pièce finale tout en évitant la présence de défauts, en particulier en surface, car le titane est sensible à l'effet d'entaille.

En raison de ses propriétés thermomécaniques, le titane peut aussi être transformé par des industries spécialisées dans les aciers fortement alliés et les alliages base nickel.

^d Voir annexe XIII

^e Lingot transformé, de section rectangulaire, servant à fabriquer les tôles

^f Lingot transformé, de section carrée, destiné aux laminoirs

^g Lingot transformé, barre servant à fabriquer des produits longs

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	12/158

Les propriétés mécaniques du titane et sa faible densité le rendent en particulier intéressant pour toutes les applications structurales nécessitant un allègement^h : aéronautique, espace, missiles, coques de sous-marins, matériels aérotransportés etc. Le titane est également adapté aux applications cryogéniques. Il bénéficie d'excellentes propriétés anticorrosion en milieu aqueux et dans beaucoup de milieux acides qui incitent à l'emploi du titane pour de nombreuses applications en chimie, pétrochimie et pour la fabrication de circuits de retraitement ou d'échangeurs de chaleur (nucléaire, dessalement, circuits eau de mer). Grâce à sa biocompatibilité, le titane est préconisé pour toutes les applications biomédicales (prothèses, implants et instruments chirurgicaux). Enfin, sa sensibilité à la vitesse de déformation en fait un excellent matériau pour les blindages balistiques et ses propriétés amagnétiques le destinent aussi à quelques applications militaires navales.

En conclusion, le titane est un matériau incontournable pour certaines applications stratégiques (aéronautique & espace, nucléaire, militaire, etc.) et un excellent candidat pour de nombreuses applications industrielles et de biens de consommation.

^h Performances spécifiques élevées (propriété mécanique rapportée à la densité)

Étude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	13/158

Première Partie : Évolution de la demande

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	14/158

PREMIERE PARTIE : EVOLUTION DE LA DEMANDE

CHAPITRE I

Résumé :

Le titane est utilisé sous la forme d'alliages dans les applications à haute performance dans l'aéronautique et la défense et sous sa forme pure ou faiblement alliée dans les applications industrielles et les biens de consommation. Dans la plupart des cas, les critères de qualité et de performance sont prépondérants pour l'emploi du matériau. Son prix est en général le principal frein à son utilisation.

En 2019, la consommation mondiale de titane a atteint un niveau record avec environ 162.000 t. Entre 2015 et 2019, elle a augmenté en moyenne de +9,7%/an grâce en particulier à la demande aéronautique et au développement du marché intérieur chinois dans le secteur des applications industrielles. Globalement, l'aéronautique représentait en 2019 environ 45% du marché, le secteur industriel 40%, les applications militaires 8,5% et les biens de consommation 6,5%. Cette répartition de la demande ne sera pas remise en cause par la crise provoquée par la pandémie de Covid-19 en revanche une forte chute de la consommation est attendue en 2020 avec -30% à -40% et les perspectives de retour aux niveaux de 2019 ne sont pas espérées avant 2023 voire 2025. Au-delà des conséquences à court terme sur les volumes de consommation, le Covid-19 remet également en cause les prévisions d'évolution du marché à long terme en particulier dans le secteur aéronautique, tant sur les quantités d'avion à produire pour les 20 prochaines années que sur la segmentation de l'offre entre les monocouloirs type A320/B737 et les long-courriers type A350/A330/B787. Or la demande en titane est surtout portée par les nouvelles générations d'avions long-courriers en composite dont les perspectives commerciales sont remises en cause par la crise. Fragilisé par les problèmes techniques sur le B737MAX, la situation de Boeing est particulièrement critique et nous prévoyons un effondrement de la consommation apparente de titane pour l'avionneur américain entre 2020 et 2023. Pour le secteur industriel, le second grand segment de la consommation de titane, la demande est dominée par l'industrie chinoise qui a consommé à elle seule 70% du total mondial en 2019. Le secteur de la chimie chinoise est particulièrement actif puisqu'il représentait plus des 2/3 de ce volume. Les autres segments consommateurs de titane sont le nucléaire, le pétrole & gaz, l'industrie off-shore etc. Les perspectives les plus importantes pour le nucléaire sont surtout en Chine avec des niveaux d'exigence pour l'approvisionnement qui interdit le titane chinois pour des raisons de qualité. Le titane pour le dessalement a quasiment disparu des carnets de commande en raison de l'abandon des techniques thermiques au profit de l'osmose inverse. Métal de haute technologie, le titane est synonyme de performance dans le domaine des biens de consommation : sports, loisirs, technologies nomades, horlogerie, architecture etc. Il est également utilisé pour sa biocompatibilité dans le domaine médical avec de belles perspectives de croissance liées au vieillissement des populations. Enfin, légèreté et performance font du titane un métal de choix pour de nombreuses applications militaires dans tous les secteurs de l'armement : terre, air, mer et espace. Avec une acceptation prix plus élevée et un haut niveau d'exigence, le titane est souvent incontournable dans les systèmes d'armes. La montée en puissance de la Chine et la tendance au réarmement dans toutes les régions du monde ont eu pour effet une augmentation significative de la consommation de titane militaire ces dernières années.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	15/158

I EVOLUTION DU PRIX DES MATIERES PREMIERES

Pour comprendre les mécanismes économiques du marché du titane il faut d’abord s’intéresser au prix des matières premières. Nous présentons dans les sections suivantes l’évolution des prix des trois matières qui sont directement liées au marché du titane : l’éponge de titane, le scrap de titane (déchet) et le ferrotitane (FeTi).

Comme précisé dans l’introduction, l’éponge et le scrap de titane sont les deux matières premières utilisées dans la filière de production du titane. Le ferrotitane en revanche n’est pas utilisé dans cette filière mais son économie est liée à celle-ci par l’intermédiaire du scrap de titane. En effet, c’est la nuance enrichie par adjonction de déchet de titane, le FeTi70%, que l’industrie sidérurgique approvisionne couramment pour ses besoins de productionⁱ. En source alternative, les sidérurgistes peuvent également utiliser le ferrotitane produit directement à partir du minerai mais sa teneur plus faible en titane (typiquement 30 à 35%) oblige à manipuler de plus gros volumes de matière pour une même teneur en titane au final. Enfin, l’éponge de titane peut être également utilisée directement dans les hauts fourneaux mais cela nécessite des équipements et des précautions de manipulation qui ne conviennent pas à tous les sites de production. L’éponge et le scrap de titane sont aussi utilisés comme éléments d’addition pour la production d’acier inoxydable, les alliages d’aluminium et les superalliages.

I.1 Marché libre européen

⇒ Prix de l’éponge

La Figure 1 donne l’évolution du prix de l’éponge de titane de qualité métallurgique sur le marché libre européen³ (en vert). En annexe, l’historique des prix antérieur à 2008 est donné dans la Figure 61. Pour exploiter ces données économiques il convient de prendre en compte les commentaires suivants :

- On entend par « qualité métallurgique » une qualité d’éponge destinée à des applications courantes dans les produits en titane ou à un emploi dans le secteur sidérurgique. Le prix publié pour l’éponge de qualité métallurgique est un prix spot ;
- L’éponge de qualité supérieure destinée aux applications aéronautiques n’est pas cotée sur le marché spot, seul un indicateur sur les contrats long terme est publié (en orange sur la Figure 1).

En conséquence, ces prix ne sont pas directement corrélables avec les niveaux de prix négociés entre un fabricant d’éponge et un producteur de lingots car leurs contrats portent généralement sur plusieurs années avec des niveaux de prix révisables annuellement. Il convient

ⁱ Principalement pour les aciers « bas carbone »

également de souligner que, pour des producteurs de titane intégrés verticalement^j, les variations de cotation de l'éponge n'ont pas d'impact économique direct sur les coûts de production.

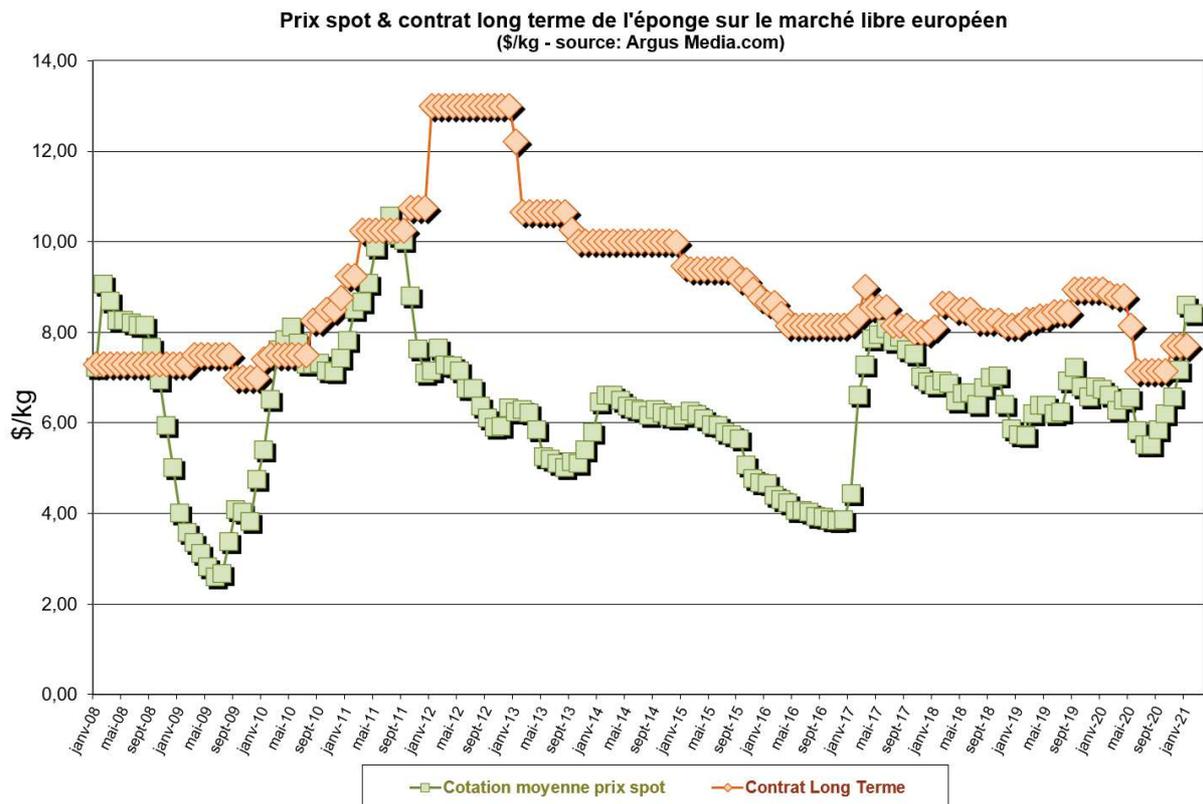


Figure 1: Prix de l'éponge de titane sur le marché libre européen [ref.3]

⇒ Prix du scrap de titane

La Figure 2 présente l'évolution depuis mars 2008 du prix du scrap de titane de nuance TA6V contenant une teneur en Sn inférieure à 0,5% comparé au prix de l'éponge. Cette qualité est compatible avec l'utilisation de recyclage pour la production de lingot de titane de qualité courante ou l'enrichissement de ferrotitane. Globalement, on constate que le prix du scrap suit la même tendance que celle de l'éponge sur la période concernée avec une volatilité moins forte.

^j Producteur contrôlant les différentes étapes du processus de production, depuis l'éponge jusqu'aux produits finaux.

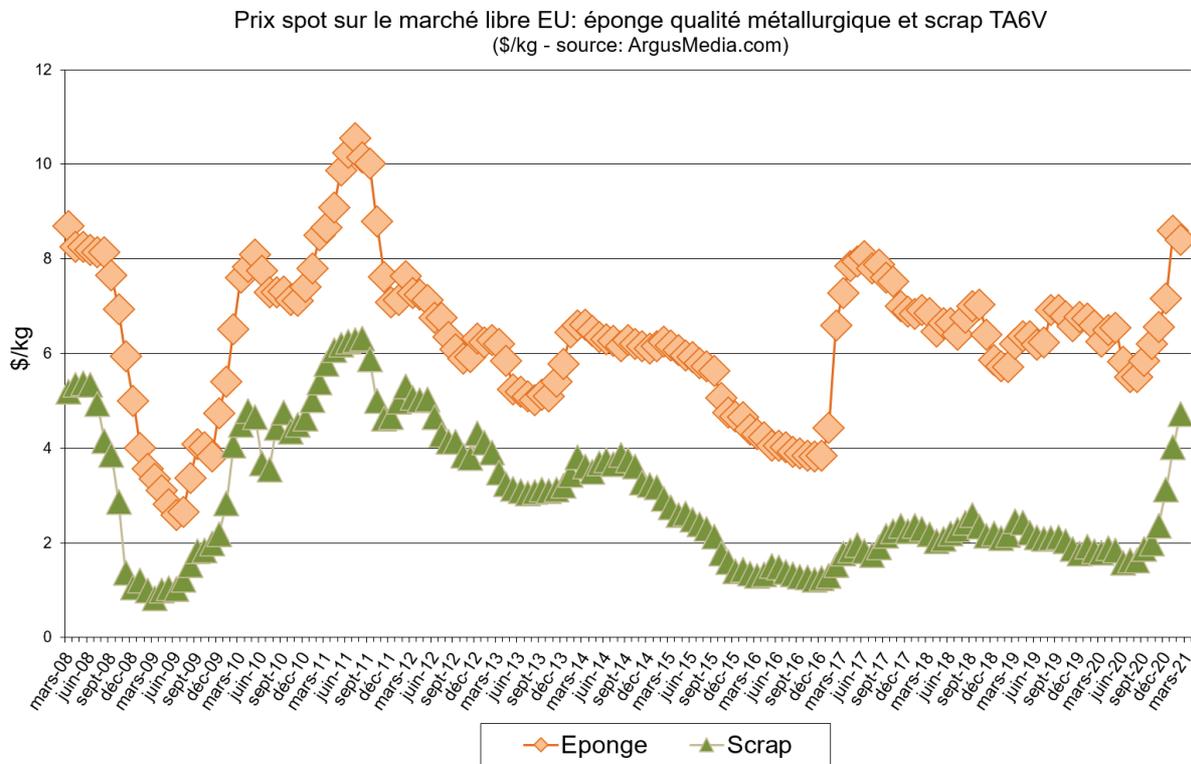


Figure 2: Prix du scrap et de l'éponge de titane sur le marché libre européen [réf.3]

⇒ Prix du ferrotitane

La Figure 3 donne l'évolution du prix du FeTi70% sur le marché libre européen depuis janvier 2008. Les données sur les années antérieures sont présentées en annexe dans la Figure 62. Cette qualité de ferrotitane étant enrichie par l'adjonction de scrap de titane, la corrélation entre les courbes de prix est forte. Le marché libre européen est principalement alimenté par les producteurs anglais, russes et ukrainiens. Dans la période hivernale, les approvisionnements d'Europe de l'Est s'interrompent car les conditions d'acheminement par voie routière deviennent trop difficiles.

Nota bene : Depuis la fin de l'année 2007, le négoce de FeTi30% a pratiquement disparu du marché libre européen. Cette qualité de ferrotitane produit principalement en Europe de l'Est, en Chine et au Brésil a pourtant été largement utilisée par les sidérurgistes en 2005 – 2007 comme source alternative au FeTi70% et à l'éponge de titane. A l'époque, cette nouvelle stratégie d'approvisionnement de la filière acier avait permis de diminuer la pression sur les prix du scrap et de l'éponge alors que la demande de la filière titane en matière première était très forte. Dès lors, une parade efficace était trouvée à l'interaction néfaste dans l'approvisionnement des matières premières communes aux deux filières industrielles. Le FeTi30% peut à nouveau redevenir une source alternative sur le marché libre européen si les prix de la qualité 70% repartent à la hausse. Le critère économique est le seuil de

rentabilité de la production du FeTi30%. On estime qu'un retournement de la demande sur le FeTi30% est possible si le prix du FeTi70% dépasse la barre des 7 à 8 \$/kg. En 2006 – 2007, les plus gros volumes de FeTi30% ont été échangés lorsque les prix se situaient aux alentours de 10 \$/kg. Sur la période, la concurrence du FeTi30% a fait chuter le prix du FeTi70% de 17 à 10 \$/kg.

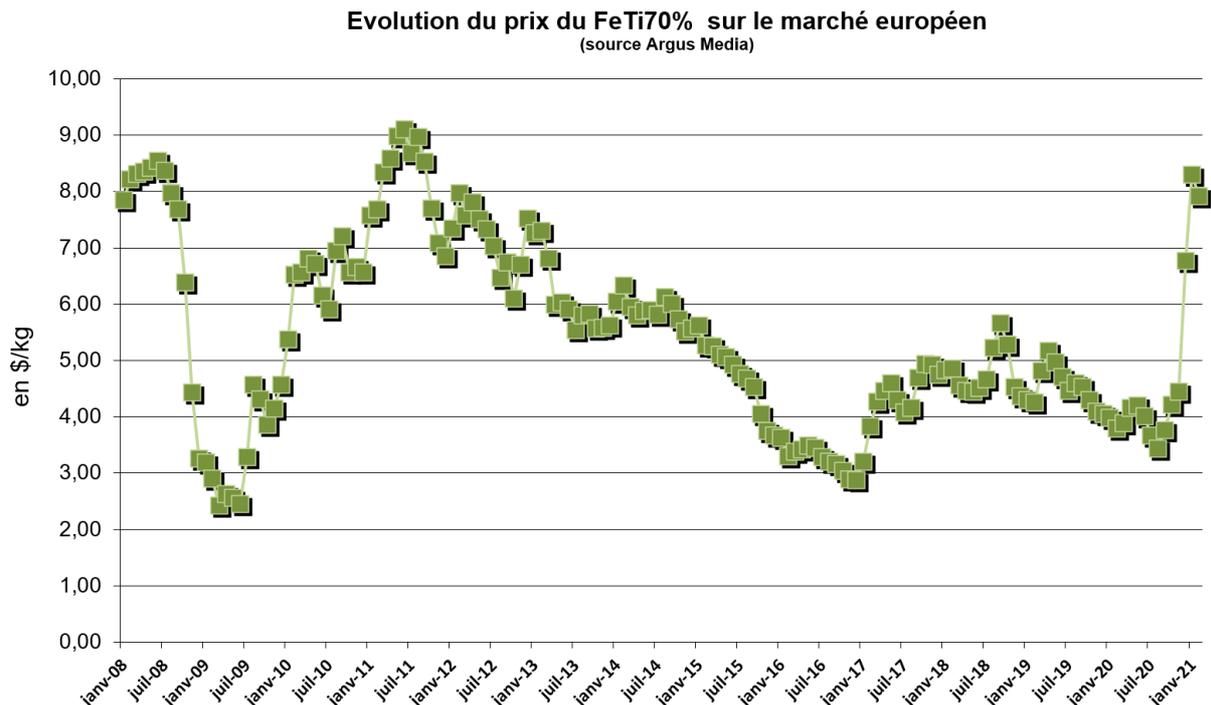


Figure 3: Prix du FeTi70% sur le marché libre européen [réf.3]

⇒ Mécanismes économiques liant le prix des matières premières

Dans le but de comprendre l'évolution des prix des matières premières de la filière titane, nous présentons dans le Tableau 14 situé en annexe des scénarios « génériques » qui illustrent les mécanismes de l'offre et de la demande. Ils sont basés sur l'analyse des prix depuis 2003 et tentent de dégager des niveaux de prix de référence selon différentes situations du marché : en phase de reprise de la demande et en phase de chute. Le Tableau 15 donné en annexe donne un aperçu des niveaux de prix qui, d'après notre analyse, régule l'équilibre de l'offre et de la demande entre l'éponge de qualité métallurgique, le scrap de titane et les ferrotitanes 30% et 70%. Cette analyse du marché peut évidemment devenir caduque avec l'émergence de nouveaux déterminants économiques comme par exemple l'entrée sur le marché de nouveaux producteurs, le développement de nouveaux procédés etc.

I.2 Marché intérieur chinois

⇒ Prix de l'éponge

La Figure 4 donne l'évolution comparative des prix pour de l'éponge de qualité métallurgique sur le marché intérieur chinois et sur le marché libre européen. Pour l'éponge chinoise, nous utilisons les cotations des éponges de qualité 99,6% et 99,7% publiées par Argus Media [réf.3] et qui correspondent à la qualité métallurgique TG100/TG110 couramment approvisionnée sur le marché libre européen.

On constate que le prix de l'éponge en Chine est globalement supérieur à celui du marché libre. Cela s'explique principalement par des coûts de production élevés (électricité, prix des matières premières, valorisation médiocre des produits dérivés) et par des investissements imposés par le gouvernement pour limiter les effets sur l'environnement et améliorer la sécurité dans les sites de production. Pour être compétitif, les chinois font baisser leur coût de production et leur marge dans un environnement économique très concurrentiel.

A plusieurs reprises, les courbes de prix se rapprochées. Ces situations sont en générale corrélées à une période de pénurie sur le marché européen.

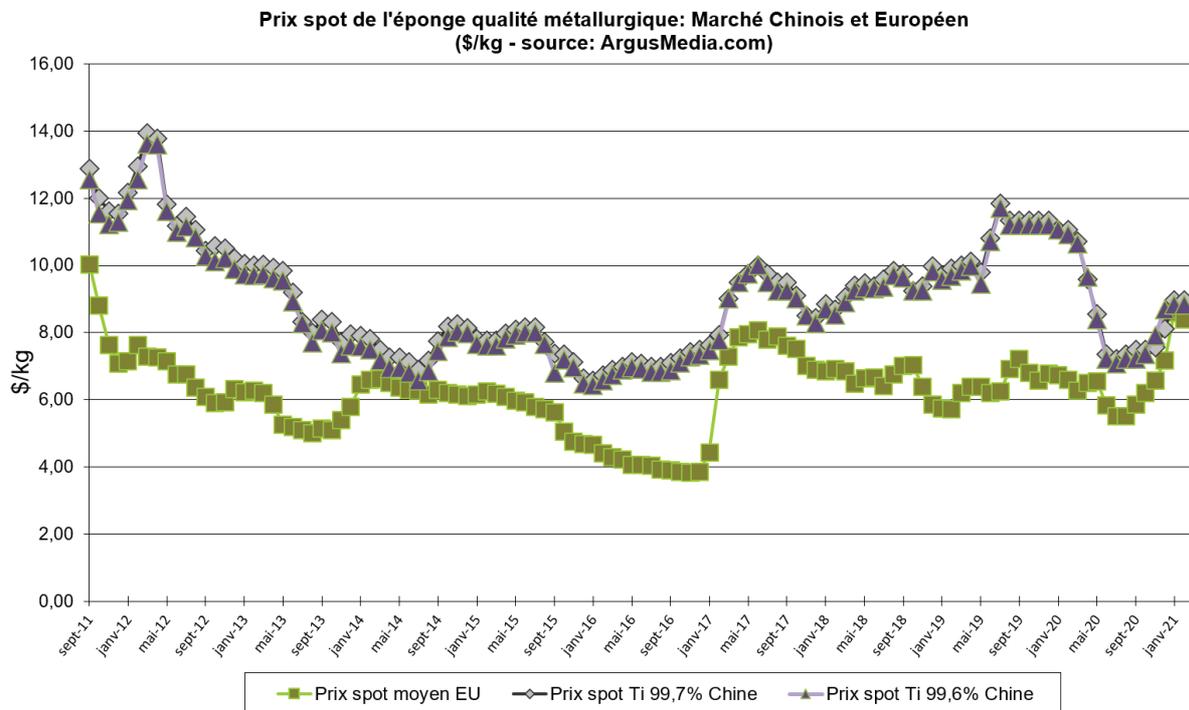


Figure 4: Prix de l'éponge sur les marchés chinois et européen [réf. 6]

⇒ Prix du ferrotitane

La Figure 5 donne l'évolution du prix du ferrotitane 70% sur les marchés intérieurs chinois, américain et sur le marché libre européen.

Début 2021, les prix du ferrotitane sur les marchés européen et américain ont flambé en raison de la pénurie de scrap et d'une reprise de la demande dans le secteur sidérurgique.

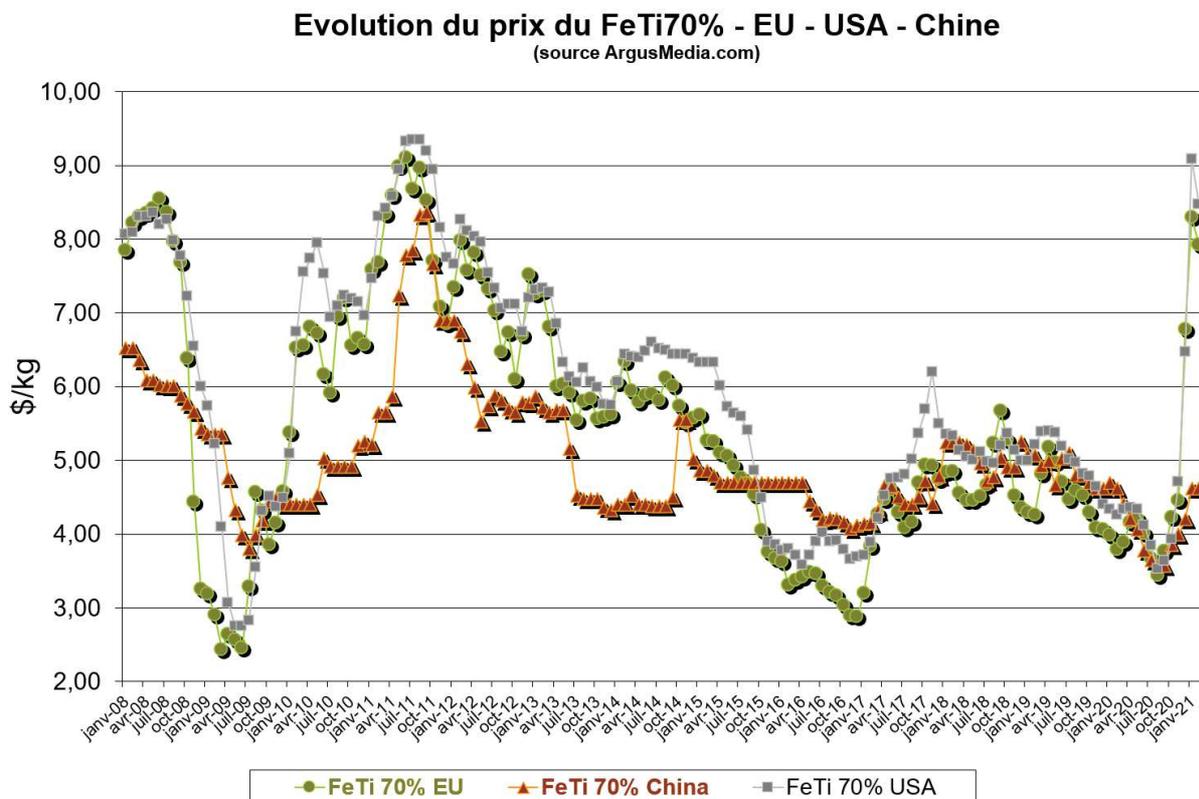


Figure 5: Prix du ferrotitane en Chine, aux USA et sur le marché libre européen [réf.3]

I.3 Marché intérieur américain

Nous présentons dans les Figure 6 l'évolution des prix de différentes qualités de scrap et de celui du ferrotitane 70% sur le marché américain. L'éponge de qualité métallurgique n'est pas cotée aux USA.

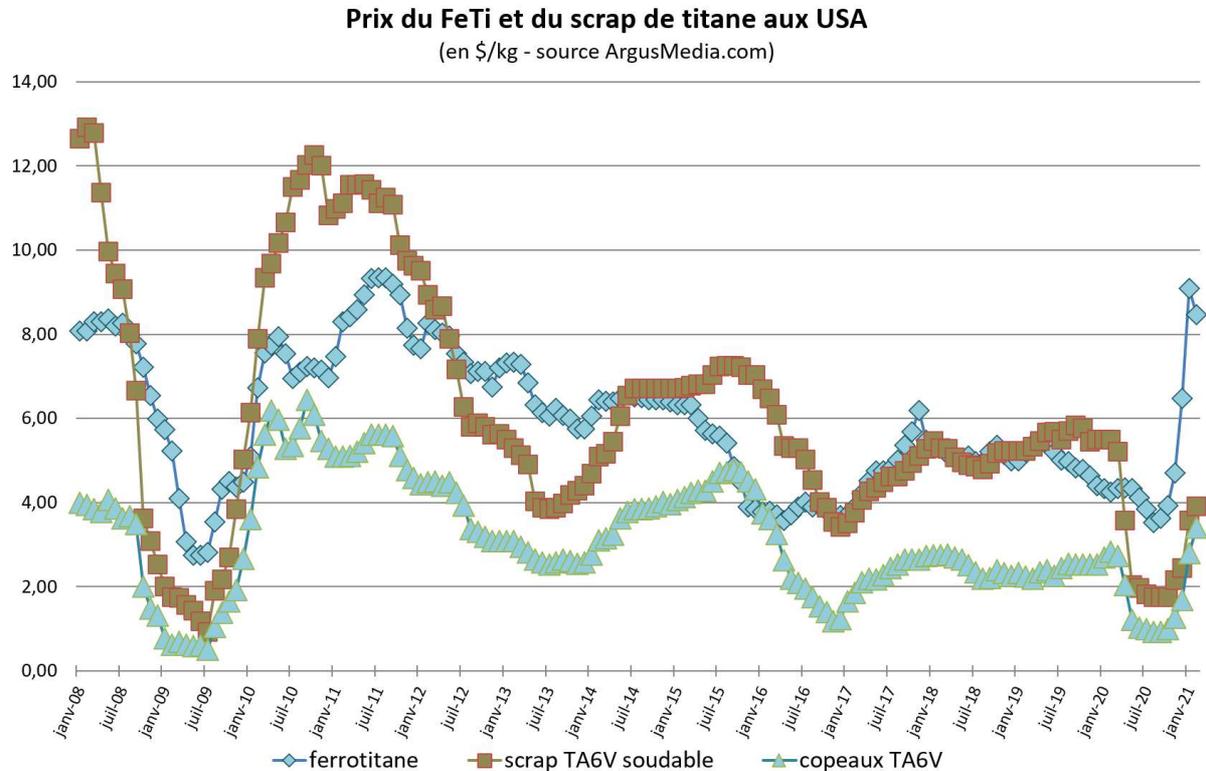


Figure 6: Prix du ferrotitane et du scrap de titane sur le marché intérieur US [réf.3]

Si l'on compare les niveaux de prix du scrap avec ceux du marché libre européen on constate que les prix sont plus élevés et que l'amplitude de variation est aussi plus importante. Cette dynamique de prix s'explique par le fait que c'est sur le sol américain que se concentrent les plus importantes capacités de recyclage de déchets titane par les techniques de fusion « foyer froid^k ».

En période de demande, les prix peuvent ainsi flamber brusquement, en particulier pour les qualités supérieures (chutes solides, déchets nettoyés et contrôlés). Pour les qualités moins nobles comme les copeaux, l'amplitude des variations de prix est plus modeste. Ces déchets sont principalement valorisés dans la production de ferrotitane 70% ce qui explique la corrélation entre les prix de ces deux matières.

^k Voir Annexe I

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	22/158

II EVOLUTION DE LA DEMANDE MONDIALE DE TITANE JUSQU'EN 2019

Nous présentons dans le Tableau 2 et les Figure 7 et Figure 8 notre estimation de la consommation mondiale de titane sur la période 2009-2019. Le Tableau 16 en annexe donne l'historique entre 2003 en 2009.

<i>X 1000 tonnes</i>	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Aéronautique commerciale	29-30	35-39	38-44	40-46	42-48	48-55	49-56	58-62	59-63	60-64	71-76
Applications industrielles	26-28	47-56	66-69	60-63	45-50	46-53	44-51	42-48	54-58	57-61	62-66
Applications militaires	8-9	7-8	7-8	6-7	6-7	8-9	9-10	10-12	11-13	11,5-14	12,5-15,5
Biens de consommation	7-9	8-10	9-12	8-10	6-9	8-10	8-10	8-10	10-11	8,5-10	9,5-11,5
Total	70-76	97-113	120-133	114-126	99-114	110-127	110-127	118-132	134-145	137 - 149	155 - 169

Tableau 2: Consommation mondiale de titane (2009-2019)

Le marché a bénéficié d'une forte croissance entre 2003 et 2008 (+14,3%/an) après les deux crises successives liées aux attentats du 11 septembre 2001 et à l'épidémie du SRAS¹ en 2003. Au 3^{ème} trimestre 2008, l'industrie subit de plein fouet les effets de la crise des *subprimes* initiée aux Etats-Unis en juillet 2007. La demande en titane a chuté en 2009 puis est repartie à la hausse jusqu'en 2011 mais à un rythme trop soutenu par rapport à l'état réel de la demande. Dès 2012, un cycle de baisse s'est initié en raison de stock important de matière accumulé lors de l'embellie de 2010-2011.

Après un nouveau point bas en 2013, la demande est repartie à la hausse mais globalement, les conséquences financières de la crise de 2008 ont été ressenties jusqu'en 2016. En moyenne, le taux de croissance de la demande mondiale de titane entre 2003 et 2019 est de 6,8%/an. Le graphe de la Figure 7 illustre la forte variation enregistrée pour le secteur aéronautique qui, jusqu'en 2008, était parti sur un rythme de croissance très soutenu de 22,4%/an pour répondre aux besoins à moyen et à long terme des nouveaux programmes d'avions.

Si l'arrivée de la crise de 2008 a effectivement eu pour conséquence de réduire les cadences de production de certains programmes et donc de diminuer les approvisionnements en titane, la chute de la consommation a également été causée par l'arrêt de la politique de surstockage de Boeing pour son programme Dreamliner 787. Entre 2015 et 2017, c'est près de 20.000 tonnes de titane qui ont été stockées dans l'attente de la mise en production de ce programme (voir chapitre III.3.1). Deux crashes mortels successifs du nouveau monocouloir B737MAX de Boeing en octobre 2018 et mars 2019 ont été à l'origine de l'interdiction de vol de cet avion. Après une réduction des cadences de production, l'avionneur a dû se résoudre à

¹ Syndrome Respiratoire Aigu Sévère

suspendre sa production en janvier 2020 au moment où la pandémie du Covid-19 a commencé à impacter l'économie mondiale avec, en particulier, l'arrêt quasi-complet du trafic aérien au premier semestre 2020.

Après la dernière crise majeure de 2008, le secteur aéronautique n'a cessé de progresser au rythme de 9,5%/an en moyenne jusqu'en 2019. La crise liée au Covid-19 bouleverse les perspectives d'évolution de la demande en titane. Les nouveaux programmes d'avion composite long-courriers, gros consommateurs de titane, sont particulièrement impactés.

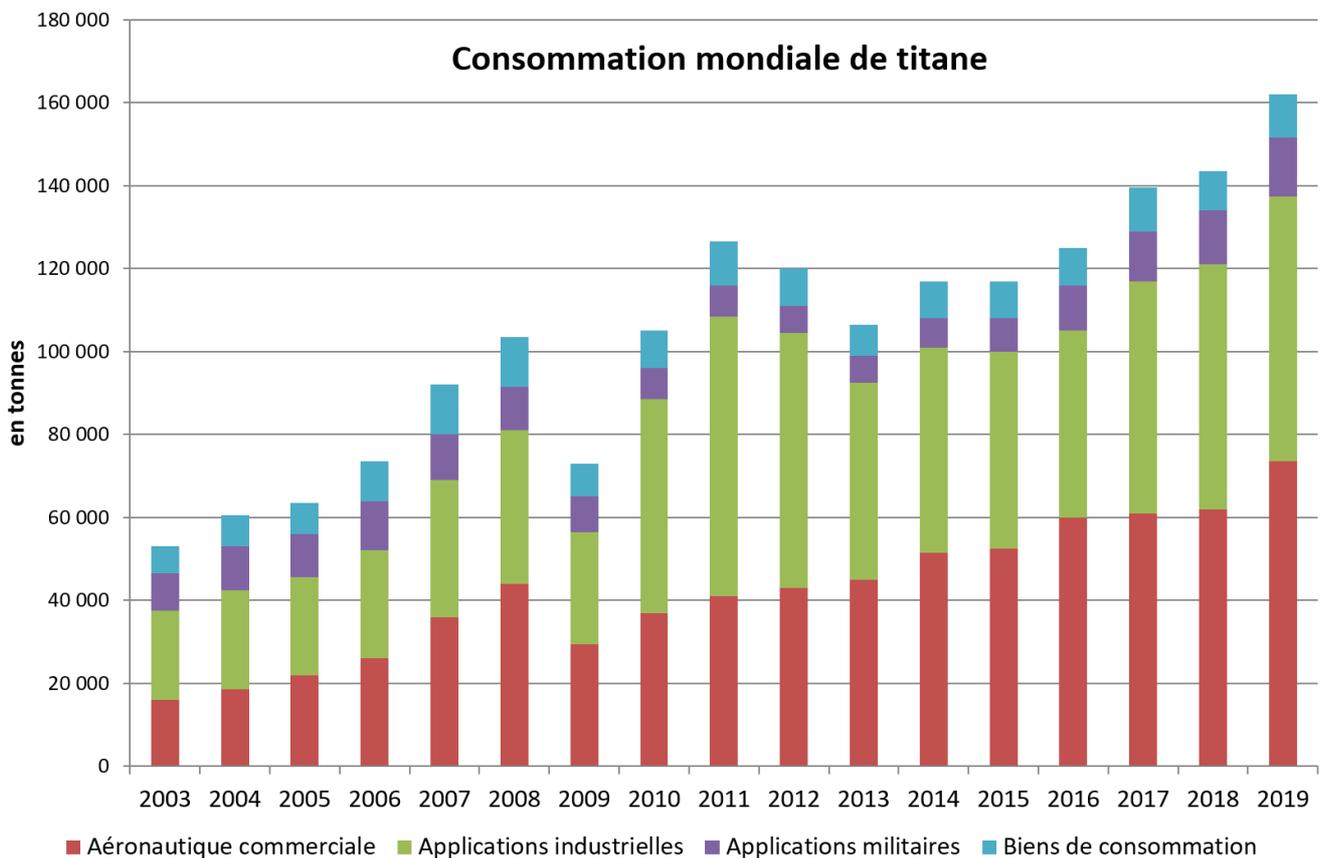


Figure 7: Evolution de la consommation mondiale de titane jusqu'en 2019 (en volume)

Répartition de la consommation mondiale de titane par secteur (en volume)

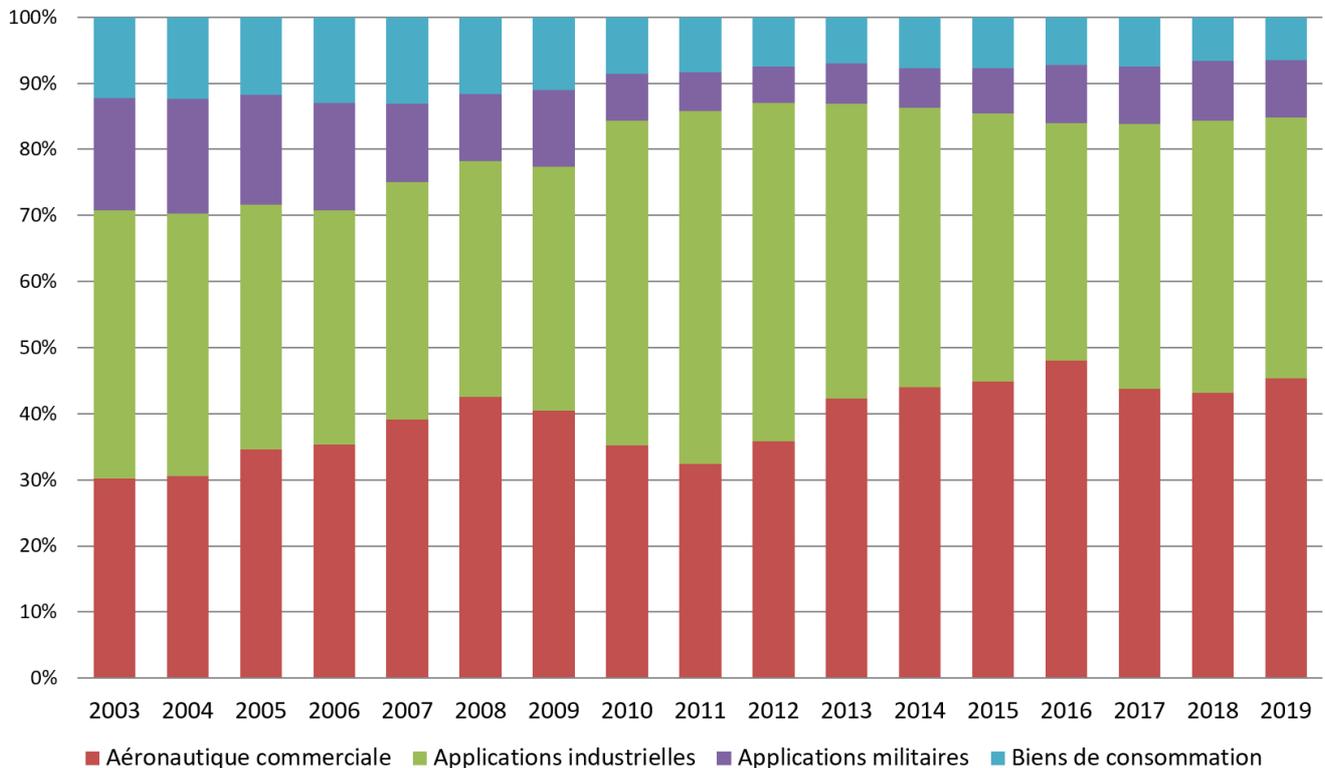


Figure 8: Evolution comparée de la consommation de titane par secteur (en volume)

Concernant le secteur « applications industrielles » (chimie, pétrochimie, énergie etc.), il a bénéficié d'une forte demande avec une progression de +12% entre 2007 et 2008. Composante importante de cette demande, le marché intérieur chinois a absorbé à lui seul environ un tiers de la consommation mondiale en 2008 puis l'arrivée de la crise des *sub-primes* a gelé bon nombre de projets d'investissement dans le domaine des équipements industriels dans toutes les régions du monde.

Le fait marquant pour ce secteur est l'émergence à partir de 2010 de « super-projets » d'usine de dessalement qui ont dopé la demande en titane sur le marché spot. Ainsi, les projets de Ras Az Zour, Yanbu III et Shoaiba en Arabie-Saoudite et Facility D au Qatar ont consommé environ plus de 15.000 t de titane entre 2010 et 2016, avec un pic record en 2011. Entre 2017 et 2019, c'est la demande sur le marché intérieur chinois qui boosté la consommation mondiale.

Dans le domaine militaire, la demande en titane a culminé en 2006 puis a décliné jusqu'en 2012 en raison de la baisse des crédits de défense aux USA. Depuis, la consommation est repartie à la hausse à partir de 2013 avec la relance des grands programmes d'équipement dans de nombreux pays, en particulier en Chine et en Russie. Entre 2013 et 2019, la croissance moyenne de la consommation de titane pour les applications défense a été de +13,6 %/an. En

proportion, le secteur défense représente malgré tout une fraction modeste de la demande totale comme l'illustre la Figure 8.

Enfin, le secteur des biens de consommation a subi deux périodes de forte baisse en 2009 et en 2013. Depuis, il oscille entre 9.000 t en 10.500 t/an. Certaines niches de marché comme le secteur médical ou les articles de luxe et sportifs haut de gamme résistent aux effets de la conjoncture.

Nous présentons dans les sections suivantes l'évolution de la demande intérieure dans les différentes zones géographiques consommatrices de titane.

II.1 Évolution de la demande aux USA

Il n'existe pas de statistiques officielles sur la consommation de titane aux États-Unis par secteur d'application. Seules les données publiées⁴ par l'*U.S. Geological Survey* (USGS) donnent une répartition approximative que nous présentons dans la Figure 9^m. Le plus important en volume est l'industrie aéronautique commerciale et militaire qui absorbe, selon les années, entre 70% et 80% de la production totale. Vient ensuite le secteur des applications industrielles, puis les autres secteurs dans un ordre d'importance variable selon les années : le médical, les applications militaires non-aéronautiques, et les biens de consommation.

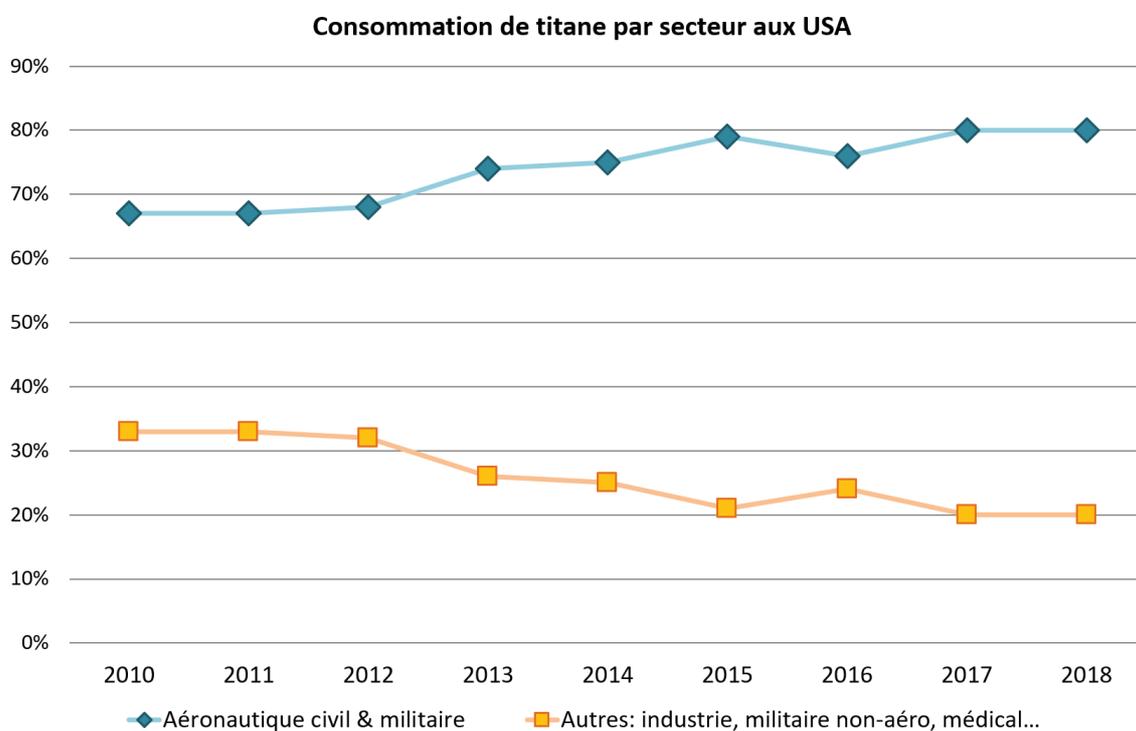


Figure 9: Consommation de titane aux USA

^m Depuis le premier trimestre 2019, les publications de l'USGS sont suspendues (voir plus loin).

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	26/158

Le Tableau 3 donne l'évolution de la consommation de titane aux USA depuis 2010. Après la chute de l'activité liée à la crise de 2008, la consommation est répartie sur un cycle avec un niveau record en 2011 tiré par les excellentes perspectives long terme de l'aéronautique.

Surévaluée, la demande a généré une situation de surstock de matière dans la filière qui a provoqué un nouveau cycle à la baisse jusqu'en 2013. En 2017, l'effet d'accordéon entre l'offre et la demande était encore perceptible avec un tassement de la consommation apparente alors que les livraisons d'avion étaient nettement à la hausse. En mars 2019, l'industrie aéronautique américaine est frappée par la crise du B737MAX qui est interdit de vol après deux accidents mortels survenus en octobre 2018 et mars 2019ⁿ. Boeing maintient pendant de longs mois les approvisionnements en titane, créant un surstock important dans ses usines et chez ses sous-traitants. La production de B737MAX est ralentie, la production d'avion parquée (jusqu'à 450 avions) puis finalement stoppée. La production ne reprendra à un rythme ralenti qu'en mai 2020 en pleine crise du Covid-19. Les effets combinés de ces deux faits marquants auront un impact considérable sur la consommation de titane dans le secteur aéronautique. Dans ce contexte critique, les publications officielles de consommation de titane de l'USGS cessent au premier trimestre 2019. Début 2021, les statistiques publiées pour 2020 ne sont que partielles.

(en tonnes)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019/2020
éponge	34.900	48.400	35.100	24.600	26.400	31.200	34.100	26.400	37.400	np ^o
scrap	29.200	30.900	38.700	36.900	36.900	52.200	55.000	62.400	52.100	np
lingot	40.300	55.900	57.300	48.400	54.000	57.200	56.200	67.800	67.600	np
½ produits	38.300	45.500	39.600	34.600	37.000	38.000	38.200	37.000	38.000	np

Tableau 3: Consommation de titane aux USA [réf.4]

Malgré les efforts de diversification vers de nouvelles applications émergentes, la filière industrielle américaine de production de titane reste très liée à la demande aéronautique et militaire. Les fonds de recherche, les investissements en outils de production et les axes de développements ont pratiquement tous pour objectif de servir au mieux ces marchés en termes de réduction des coûts de production et de sécurité d'approvisionnement.

Pour le secteur Défense, les dispositifs protectionnistes ou plus généralement de « préférence nationale » comme l'amendement Berry^p assurent par ailleurs efficacement aux producteurs nationaux la rente des marchés d'armement. Soldé en 2005, le stock stratégique de

ⁿ voir III.3.1

^o Non publié

^p Aux USA, l'amendement Berry garantit la préférence nationale aux fournisseurs d'équipements et de systèmes pour les besoins de la Défense.

titane (*US National Titanium Stockpile*) n'a pas été reconstitué malgré les demandes répétées de l'industrie à l'administration américaine. Pour mémoire, ce stock a culminé à 33.400 t entre 1985 et 1995. La crise du Covid-19 et la disparition de la dernière usine de production d'éponge américaine (usine de Timet/PCC à Henderson, Nevada – voir VIII.1) sembla avoir motivé une décision gouvernementale en faveur de son redémarrage. Contrairement au précédent stock, la préférence serait donnée à l'achat de lingots plutôt que l'éponge qui finit par s'oxyder avec le temps.

Les Figure 10 et Figure 11 mettent en évidence l'augmentation significative des stocks industriels de matières premières depuis plus d'une dizaine d'année aux USA alors que la production de lingot n'a pas cru aussi vite. L'évolution est particulièrement forte pour l'éponge vis-à-vis de laquelle les USA deviendront totalement dépendants de son importation à partir de 2020 (voir II.4). Comparativement aux autres pays, les Etats-Unis recyclent massivement le scrap de titane pour la fabrication de lingot grâce à leur importante capacité de fusion à foyer froid (voir annexe XIII). La Figure 12 donne le ratio d'emploi des matières premières : selon les années, la proportion de scrap utilisée se situe entre 40% et 60%.

Grace aux capacités de retraitement disponibles de ce pays, non seulement les déchets de titane générés localement sont revalorisés sur place mais de grandes quantités sont également importés et traités aux USA (voir ci-dessous). Il convient de noter que les publications officielles de l'USGS sur la production et la consommation aux USA sont interrompues depuis 2019.

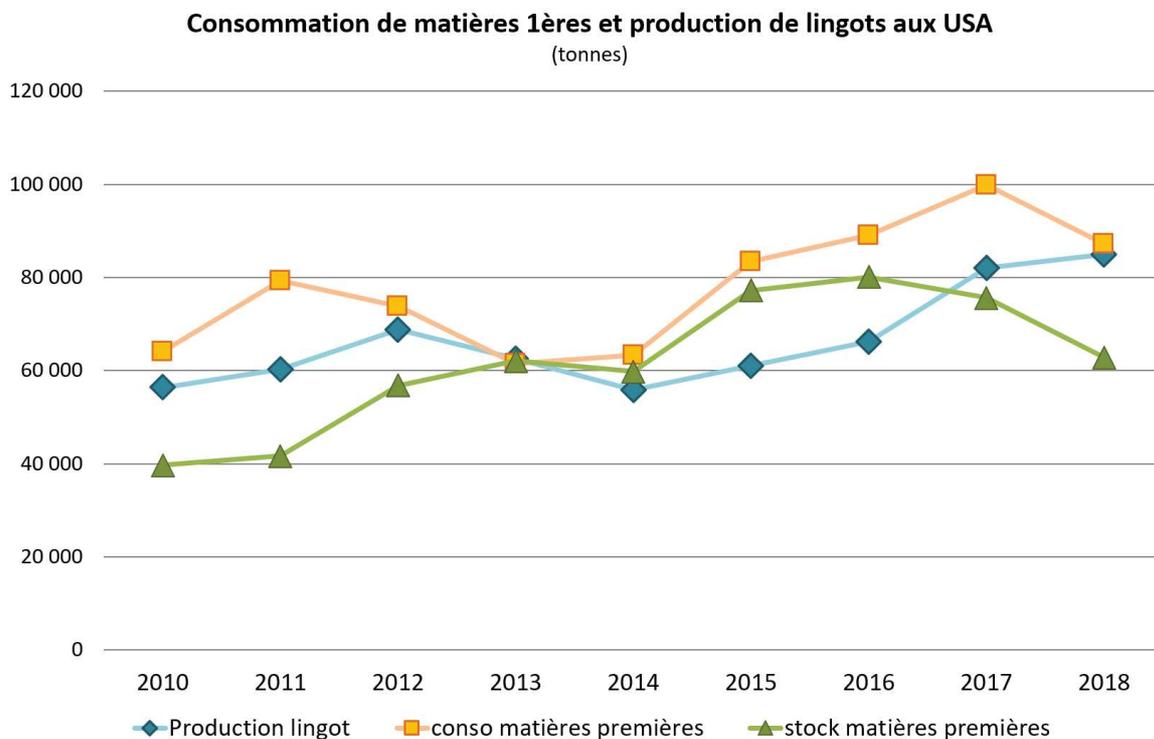


Figure 10: Consommation et stock de mat. 1ères et production de lingots aux USA [réf.4]

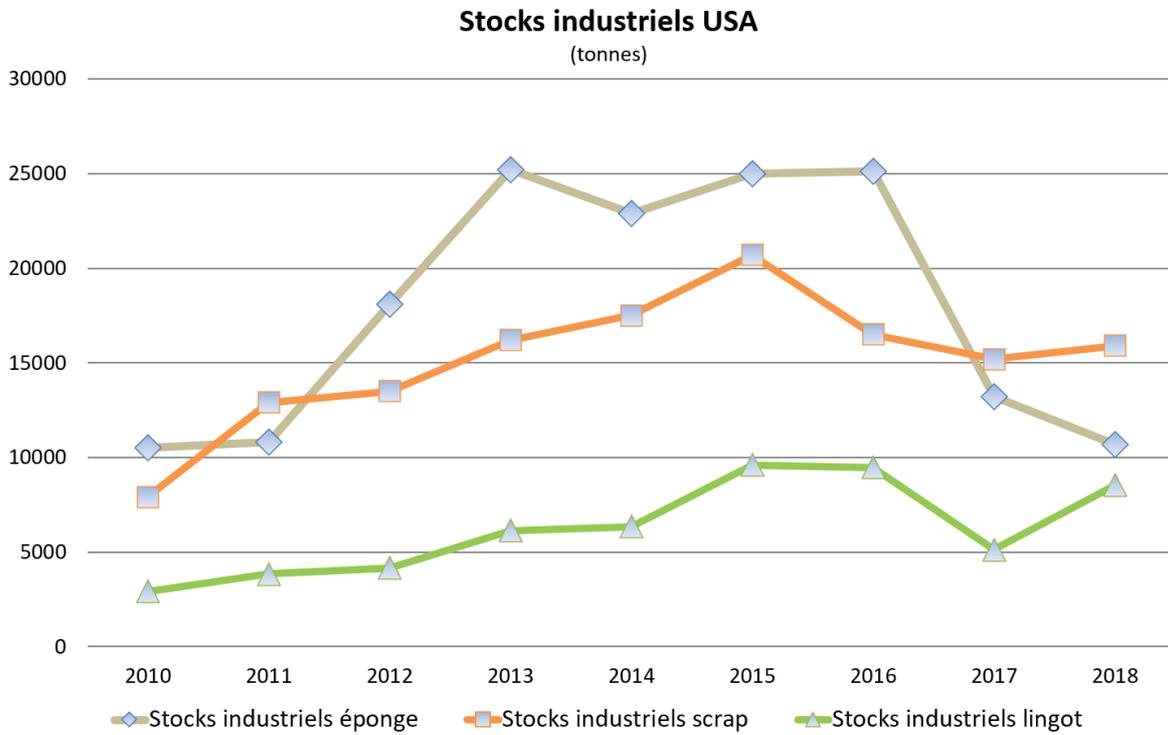


Figure 11: Stocks industriels de matières 1^{ères} et de lingots aux USA [réf.4]

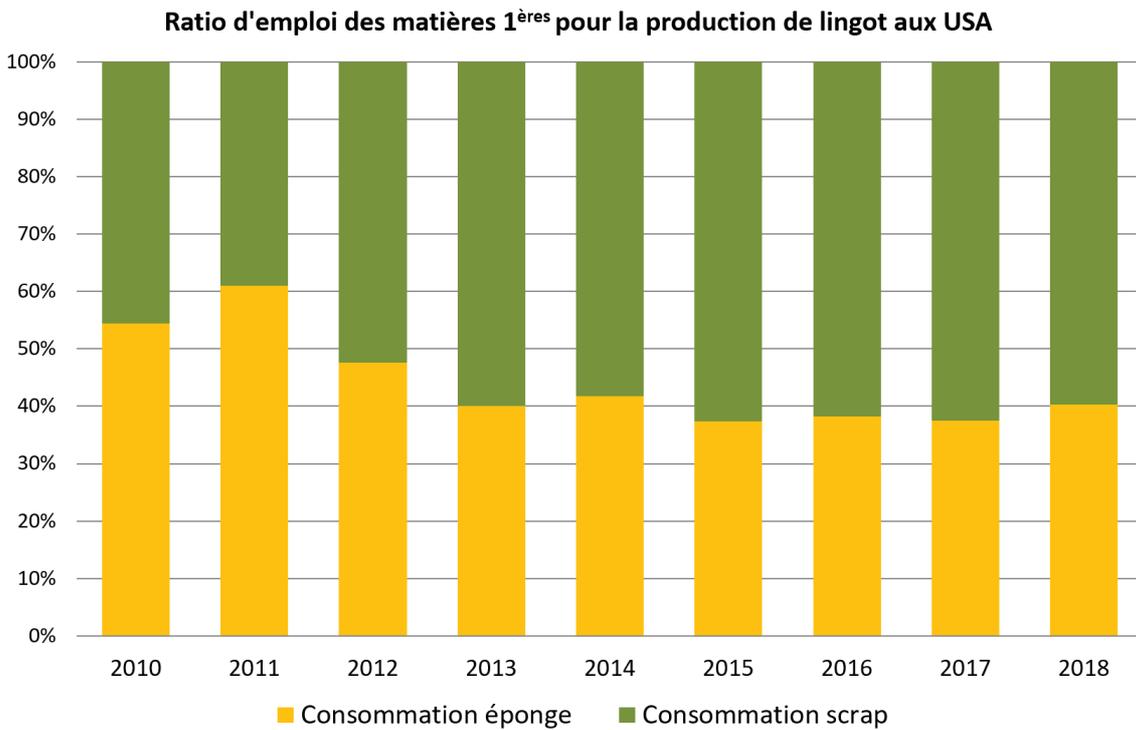


Figure 12: Ratio d'emploi éponge/scrap pour la production de lingot aux USA [réf.4]

⇒ Import – Export

Les données d'import – export des USA révèlent les échanges importants concernant les matières premières :

- L'importation massive d'éponge de titane pour compenser l'insuffisance de la production nationale. Jusqu'en 2012, le Japon et le Kazakhstan étaient les deux principales sources d'approvisionnement. A partir de 2013, l'importation d'éponge kazakhe a quasiment cessé car le producteur UKTMP s'est intégré verticalement (voir Chapitre IX). L'arrêt de la production d'éponge aux USA en 2020 et les conséquences économiques de la crise du Covid-19 ont relancé le besoin de sécuriser les importations d'éponge ;
- Le scrap de titane principalement importé d'Europe et du Japon à des fins de recyclage dans les fours de fusion à foyer froid des producteurs de lingot ;
- Le scrap de titane principalement exporté vers l'Europe pour de l'enrichissement de ferrotitane et du recyclage dans la production de lingot.

Les données relatives à l'import/export de lingots et de demi-produits titane ne permettent pas de tirer de conclusion sur la part de matière effectivement consommée sur le marché intérieur américain. En effet, les produits peuvent être en simple transit entre deux sites de transformation. En 2019, les données publiées par l'USGS ne sont que partielles.

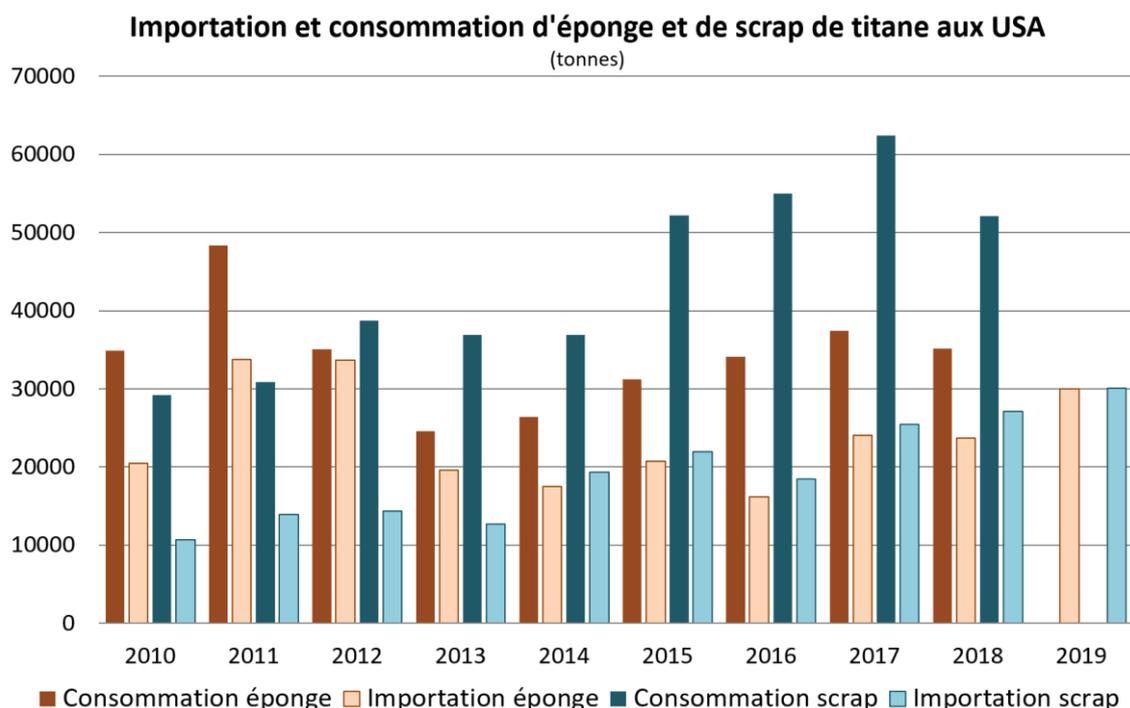


Figure 13: Importation et consommation de matières premières aux USA

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	30/158

II.2 Évolution de la demande en CEI

Après la chute du mur de Berlin, la demande intérieure en CEI a commencé à reprendre de la vigueur au début des années 2000 et a atteint un pic en 2007 avec une consommation de 9.000 tonnes de titane. Sur la période 2008 – 2010, cette demande a été fortement affectée par la crise financière des *subprimes* puis elle est à nouveau repartie à la hausse jusqu'en 2014 comme l'illustre la Figure 14. Stable aux alentours de 10.000 t/an jusqu'en 2019, nous estimons que la consommation de titane sur le marché intérieur va suivre la même tendance que dans le reste du monde et chuter de l'ordre de -30%. Les chiffres de 2010 à 2018 sont issus du producteur russe VSMPO⁵ qui contrôle la quasi-totalité des filières d'approvisionnement en CEI. Ceux de 2019 et 2020 sont des estimations.

Le redémarrage de l'activité industrielle russe au début des années 2000 fait partie d'un plan de relance piloté par le Kremlin. Le producteur de titane russe VSMPO – AVISMA est un acteur stratégique pour les secteurs de pointe comme l'aéronautique, l'armement, le naval, l'énergie etc. A ce titre, Rosoboronexport, l'exportateur d'armements russe (entreprise d'État), détient 66 % du capital social de VSMPO-AVISMA.

Dans le secteur aéronautique, la reconstruction des capacités de production d'avions est motivée par le besoin de renouvellement de la flotte aérienne et les ventes à l'export. Le tissu industriel a été réorganisé autour de la création de deux entités : l'une concerne les constructeurs d'avions civils et militaires⁹ qui ont été rassemblés dans le groupe « UAC – United Aircraft Company » et l'autre concerne les fabricants de moteurs qui ont été regroupés dans le consortium « JSC – United Engine Corporation ». Le secteur aéronautique emploie au total plus de 350.000 personnes. Les programmes aéronautiques de la CEI sont présentés dans les paragraphes III.3.3 (avions de ligne), III.4.5 (avions régionaux) et IV.2 (avions militaires).

Du côté des applications industrielles, le secteur naval est particulièrement actif. Le nucléaire, la chimie et le médical consomme également régulièrement du titane.

L'activité industrielle russe de production de titane est organisée autour d'une « zone économique spéciale » (SEZ) appelée « Titanium Valley » située à Verkhniaïa Salda dans l'Oural. La SEZ regroupe des acteurs nationaux et étrangers du secteur comme Ural Boeing Manufacturing, OAK, Micromet ou Figeac Aero. Elle profite de conditions économiques et d'infrastructures privilégiées : taxe sur les revenus réduite à 2%, exonération de droit de douane et de TVA sur les produits importés etc.

⁹ Soukhoï, MiG, Tupolev, Iliouchine, Yakovlev, Beriev et Irkout

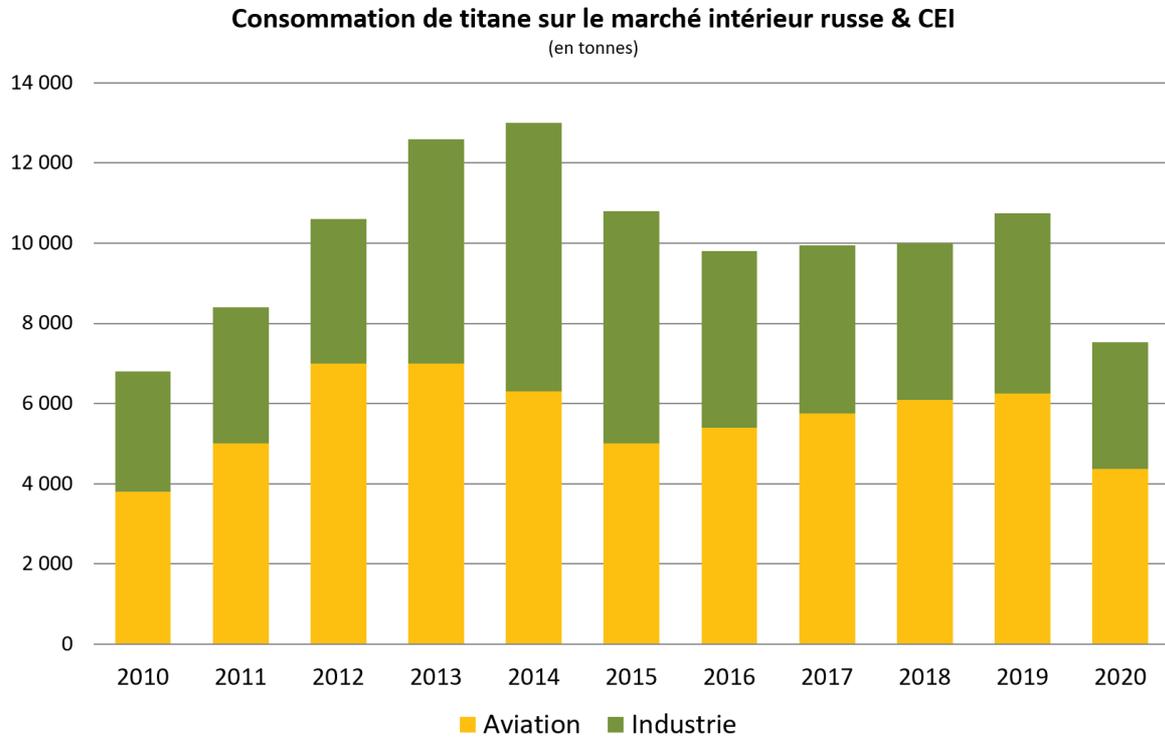


Figure 14: Évolution de la consommation de titane sur le marché intérieur CEI [réf.5]

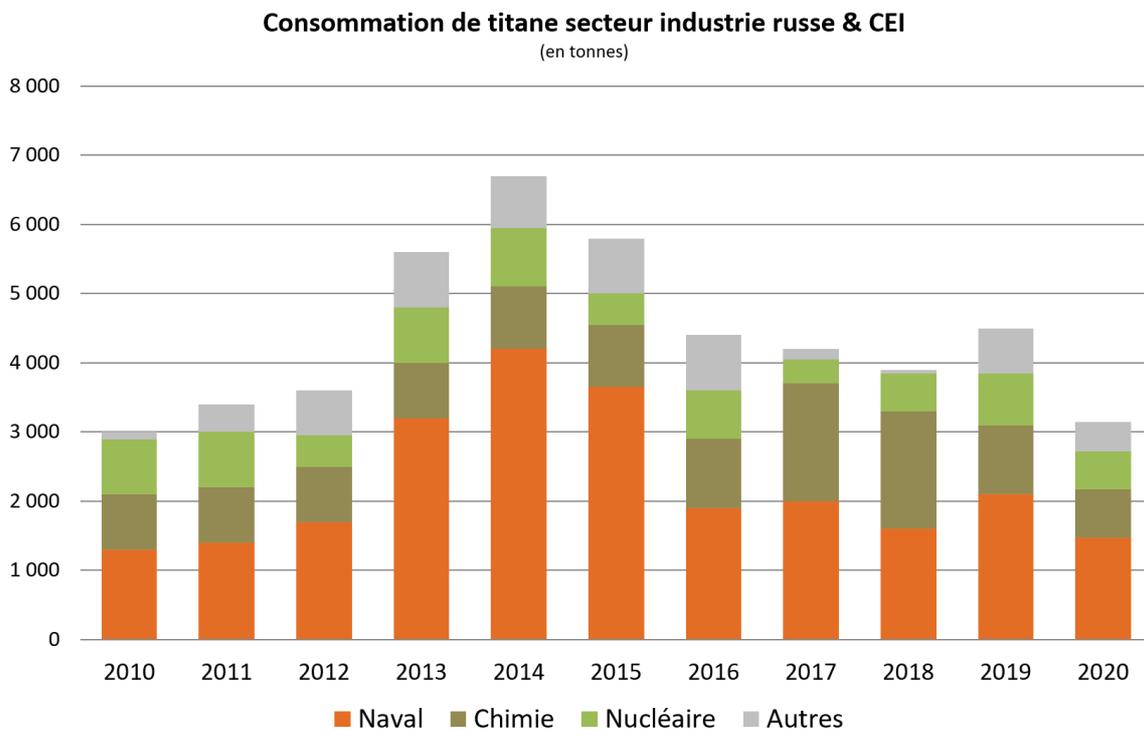


Figure 15: Évolution de la consommation de titane du secteur industriel en CEI [réf.5]

II.3 Évolution de la demande en Chine

Nous présentons dans le Tableau 4 l'évolution de la consommation globale de titane sur le marché intérieur chinois⁶ entre 2010 et 2019.

(en tonnes)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Consommation	37.054	49.392	50.331	41.338	44.468	43.717	44.156	55.130	57.441	68.850

Tableau 4: Consommation de titane sur le marché intérieur chinois [réf.6]

En Chine, le titane est très majoritairement consommé dans le domaine de l'industrie (voir Figure 16). Les autres utilisations sont :

- Les biens de consommation (sport & loisir, médical) ;
- Le secteur aéronautique & espace ;
- Les marchés de niche : la production d'énergie, le dessalement, la construction navale et les technologies marines, la défense etc.

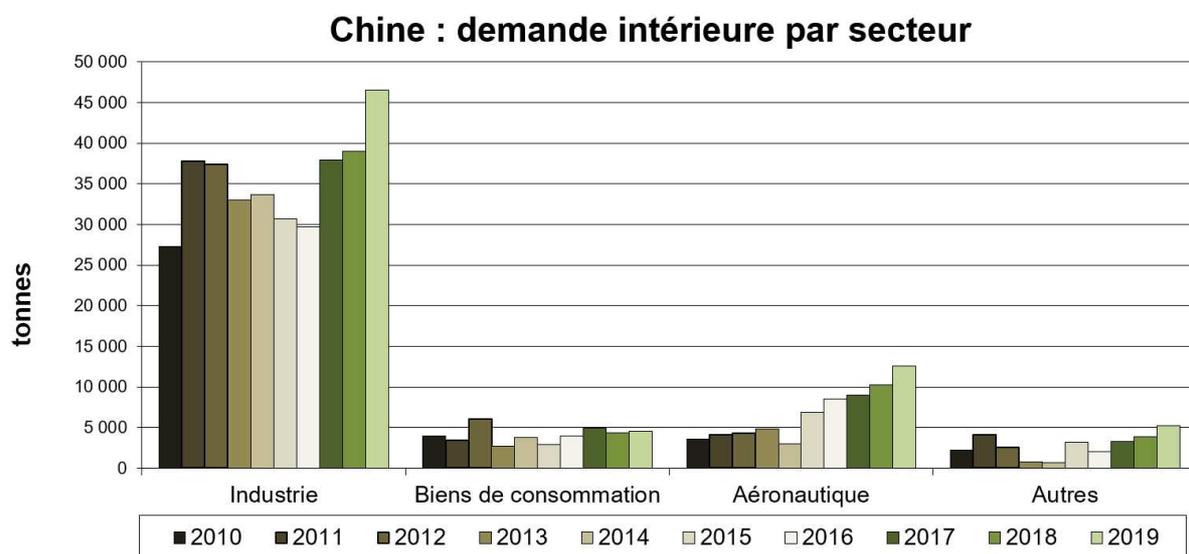


Figure 16: Consommation de titane sur le marché intérieur chinois par secteur 2010-2019 [réf.6]

Le secteur « chimie » est le premier marché d'application en Chine. Il représente à lui seul près de la moitié de la consommation de titane. Le secteur « industrie » qui contient la chimie, concentre environ les 2/3 de la demande intérieure chinoise et représente environ la même proportion de la consommation mondiale de titane pour ce secteur.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	33/158

La consommation de titane en Chine est donc très liée à l'effort d'industrialisation du pays en particulier pour la transformation des ressources minérales et organiques. Plus modeste en volume, la demande aérospatiale est stratégique pour le gouvernement chinois. Elle était de 12.600 t en 2019 soit 8,3% du marché intérieur. Outre l'objectif affiché de créer un concurrent chinois à Airbus et Boeing, le gouvernement de Pékin a pour ambition de faire émerger des champions nationaux capables de concurrencer, en qualité et en technicité, les meilleurs producteurs de titane.

La demande intérieure chinoise se caractérise par une segmentation en :

- Produits à faible et moyenne valeur ajoutée dans les secteurs de la chimie et de la métallurgie ;
- Produits à haute valeur ajoutée dans l'aéronautique, le naval, le médical et la défense.

Le titane est cité dans la liste des matériaux stratégiques dans le document de référence pour les orientations industrielles de la Commission des réformes et du développement national (*National Development & Reform Commission*). Les principaux programmes nationaux concernés par les progrès de la filière titane sont : l'aviation civile, le programme de la station spatiale, la construction navale, l'énergie nucléaire et les programmes militaires. Par ailleurs, le gouvernement prône une « intégration civile – militaire » pour constituer une « base industrielle et technologique de défense » couvrant l'ensemble des besoins nationaux. La demande exprimée au tissu industriel chinois est de développer des capacités suivantes pour réduire la dépendance avec les importations :

- Produits plats en forte épaisseur et grandes dimensions ;
- Pièces moulées de grande dimension ;
- Barres et fil pour fixations aéronautiques.

La qualité des produits et la capacité à assurer la régularité du niveau de qualité est un objectif prioritaire en particulier pour répondre aux exigences militaires. Le gouvernement incite l'industrie à innover et développer de nouvelles solutions plutôt que d'imiter les producteurs historiques et promeut l'embauche de talents étrangers pour accélérer la montée en compétence. Concernant l'éponge de titane, le constat d'échec à développer une capacité de production d'éponge de qualité aéronautique remet en cause les choix technologiques des producteurs actuels. L'orientation donnée à l'industrie est d'investir dans les technologies étrangères pour atteindre la qualité de production aéronautique depuis l'éponge jusqu'au produits finis et assurer la stabilité de lot en lot.

En amont de la filière, le gouvernement se donne comme objectif de bâtir une stratégie pour sécuriser l'approvisionnement en matières premières (minerais) de haute qualité dans le cadre d'accord long terme avec des pays africains et pays géographiquement proches de la Chine.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	34/158

⇒ Stock stratégique

Comparativement aux autres pays, la demande intérieure chinoise a bien résisté aux effets de la crise financière des *subprimes* jusqu'en 2012. Cette apparente stabilité est en fait le résultat de la mise en place à partir de novembre 2008 d'une politique de soutien à l'industrie par le gouvernement chinois. Parmi les mesures prises, le « State Reserve Bureau » (SRB) a créé un stock stratégique de 20.000 tonnes titane entre fin 2008 et le premier semestre 2010.

Constitué d'éponge et de lingots de titane, cette énorme commande financée par l'État a permis de soutenir les industries en amont et en aval de la filière. L'opération a été renouvelée en novembre 2013 puis en octobre 2014 dans une relative discrétion et sans annonce officielle. La commande a porté sur un volume de 8.700 t puis de 10.000 t de lingot de titane. Fin 2016, le stock stratégique chinois est estimé à environ 20.000 t de titane. La finalité de cette réserve de matière n'est pas déclarée mais elle pourrait être destinée à un usage militaire.

Fin 2020, l'état de situation du stock chinois de titane n'est pas connu.

⇒ Import – Export

Les statistiques aux frontières chinoises [réf.6] présentées dans la Figure 17 montrent la relative autosuffisance de la Chine vis-à-vis de ses besoins en titane et une contribution croissante de la Chine dans l'offre internationale.

A l'export, les matières concernées sont principalement les barres et les tôles d'épaisseur supérieure à 0,8 mm. Les exportations d'éponge^r sont en décroissance depuis 2014 en raison probablement d'un manque de compétitivité. Le pic exceptionnel de 2011 est lié à la forte demande dans le domaine du dessalement.

Au niveau des importations, la Chine s'approvisionne à l'étranger en produits dont elle maîtrise mal les techniques de production et la qualité : barres et fils pour fixations, des brames épaisses et larges pour la construction navale et des tubes sans soudure pour le nucléaire.

En général, l'éponge est importée pour les applications exigeant un haut niveau de qualité comme le spatial, le militaire et le nucléaire.

^r Pour sa production d'éponge, la Chine importe du minerai de titane pour compléter la production locale dont la qualité ne permet pas de satisfaire toutes les exigences de production.

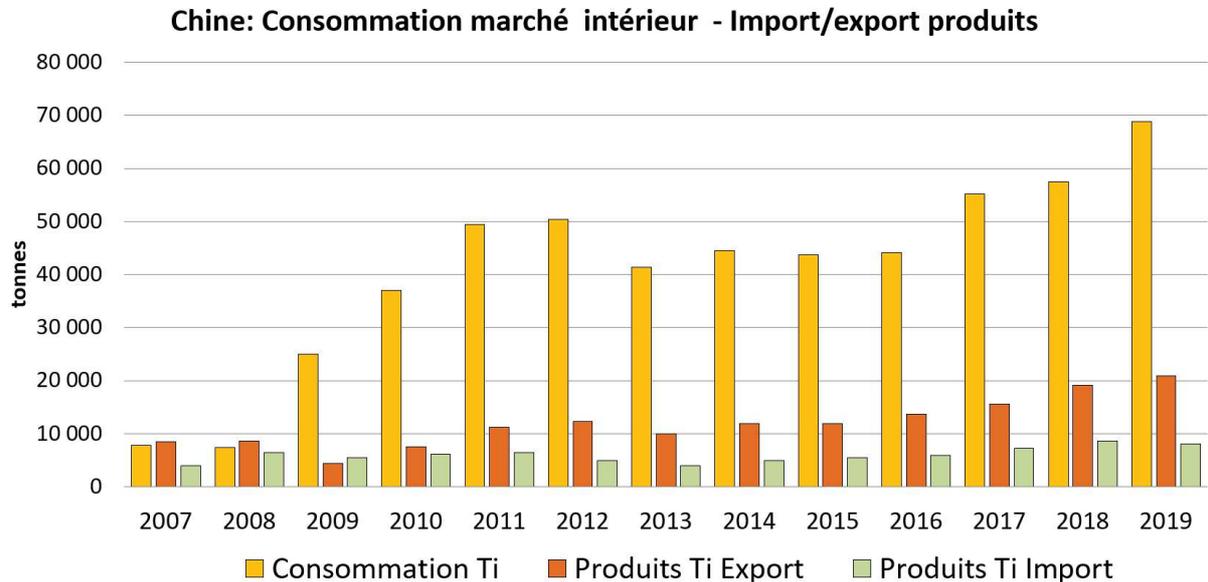


Figure 17: Import – Export de produits en titane comparé à la consommation intérieure en Chine [réf.6]

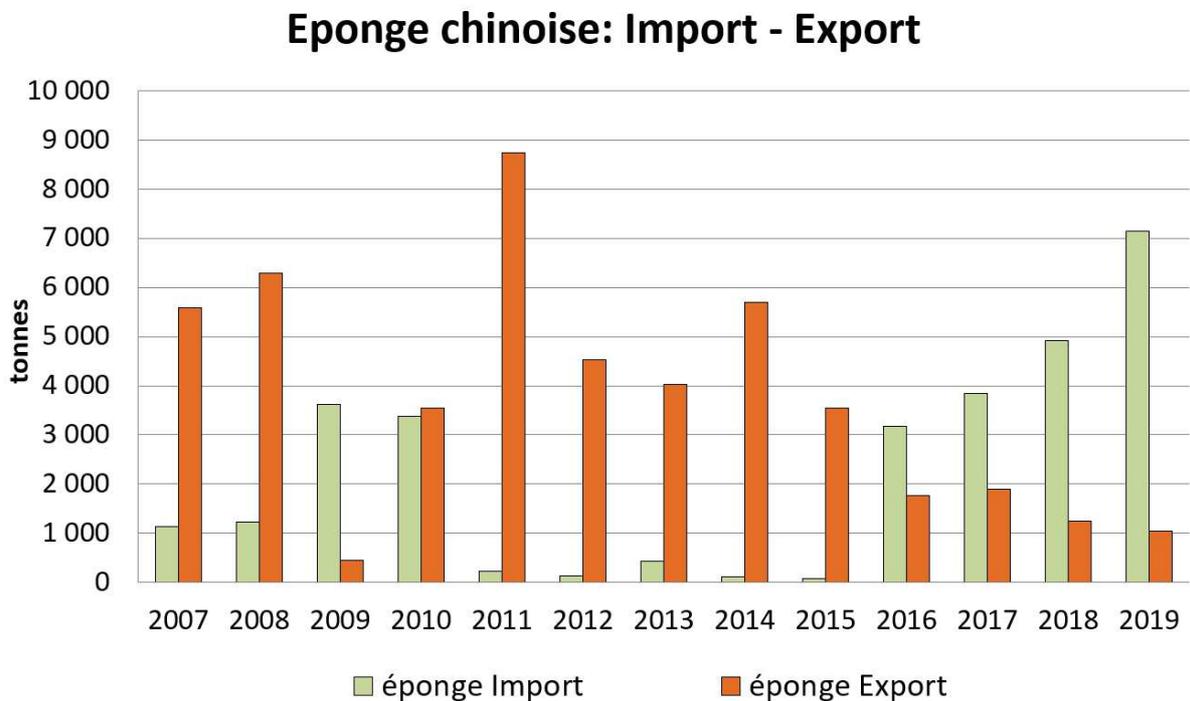


Figure 18: Import-Export d'éponge de titane en Chine [réf.6]

II.4 Évolution de la demande au Japon

La Figure 19 donne la répartition par secteur de la consommation de titane sur le marché intérieur japonais⁷. Ce graphe met en évidence la prédominance des applications « industrielles » avec, en tête, le secteur de la chimie.

Dans le panorama mondial, c'est au Japon que la diversification vers les marchés émergents est la plus marquée grâce à une activité de R&D importante pour développer de nouveaux produits en titane dans des domaines comme l'automobile, l'architecture, les biens de consommation etc. La dernière application émergente est la pile à combustible pour la voiture électrique Mirai de Toyota dont le succès commercial ne se révèle pas être au niveau espéré.

Globalement, la demande intérieure japonaise a durement été impactée par la crise de 2008 avec un véritable effondrement de la consommation en titane en 2009 (-58%). Cette année-là, la consommation japonaise est repassée en dessous de celle de 1995. Entre 2009 et 2019, elle a oscillé entre 4.000 et 6.000 t/an dans un contexte de marché intérieur morose. Tous les secteurs de la demande ont suivi la même tendance à l'exception de l'aéronautique qui bénéficie d'une politique gouvernementale de soutien au développement et de grands investissements industriels dans le domaine de la fabrication de pièces aéronautiques. Entre 2016 et 2019, ce secteur a atteint 1.000 t/an.

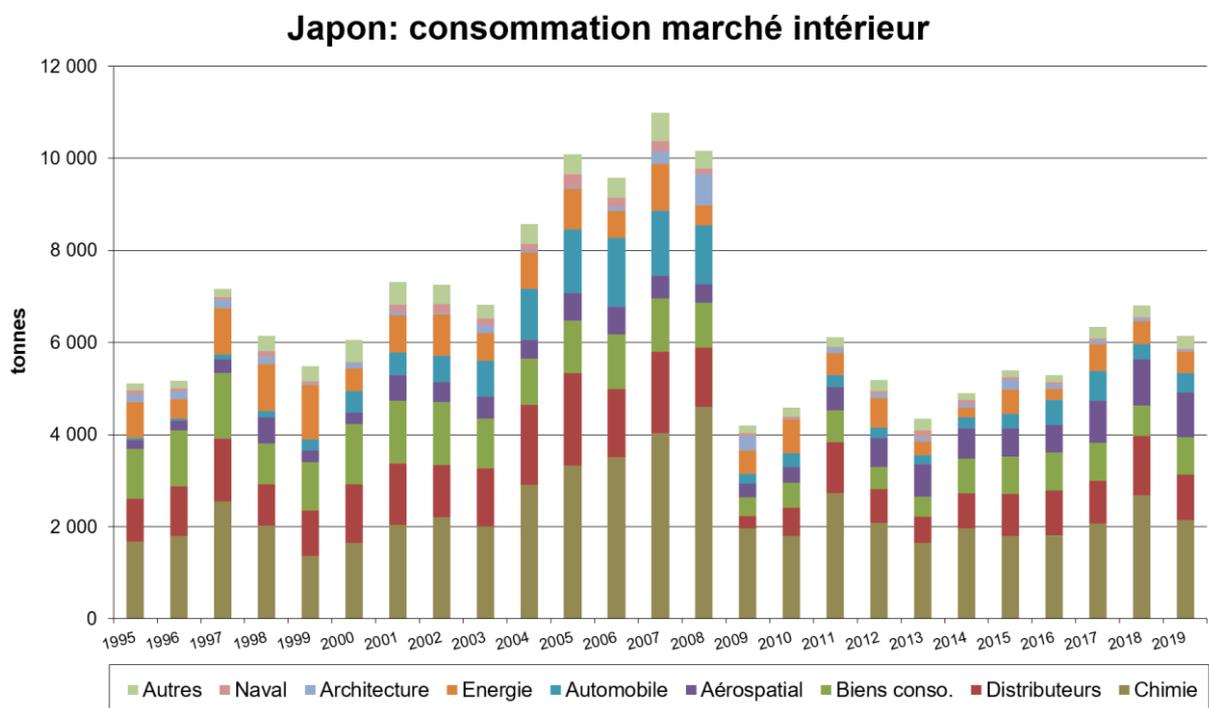


Figure 19: Consommation de titane au Japon par secteur 1995 – 2019 [réf. 7]

⇒ Import – Export

La Figure 20 illustre l'importance de l'exportation dans l'économie du titane au Japon. Historiquement consommatrice de 40 à 50% de la production annuelle, la part de l'exportation des produits titane a bondi en 2009 car la crise a frappé plus durement le marché intérieur que la demande internationale. Dès lors, la part des exportations est restée majoritaire par rapport la demande intérieure.

Le Japon est également un gros exportateur d'éponge de titane avec environ 1/3 de sa production annuelle exportée. Comme l'illustre la Figure 21, ce pays fournit principalement les USA et l'Europe. En contrepartie, le Japon importe de l'éponge, d'Ukraine, du Kazakhstan, de Russie et de Chine et des produits titane principalement des USA

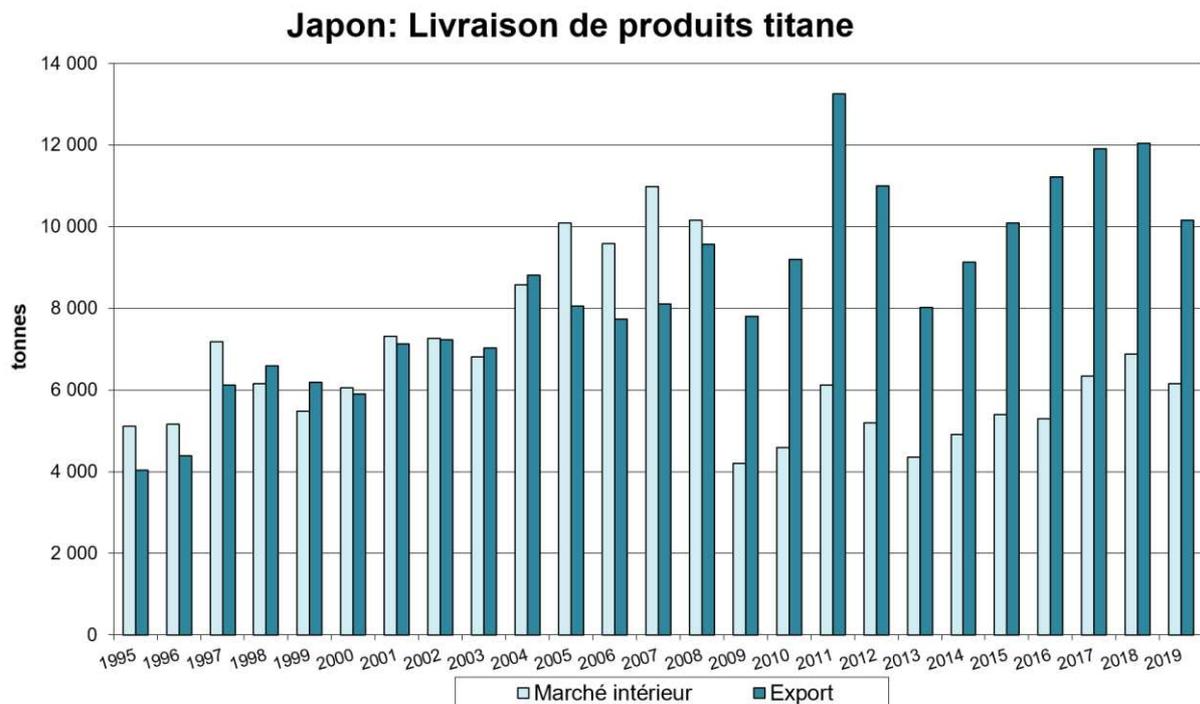


Figure 20: Comparaison consommation intérieure/export au Japon [réf. 7]

Japon: Exportation d'éponge & lingots

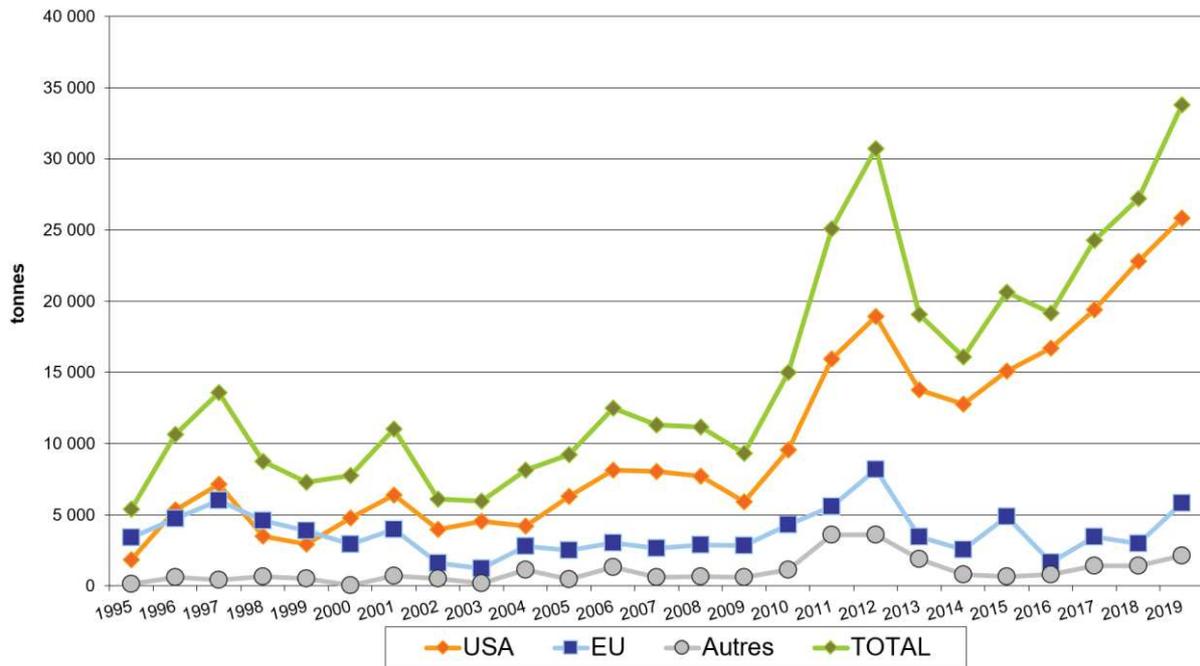


Figure 21: Exportations d'éponge du Japon [réf. 7]

II.5 Évolution de la demande en Europe

Une estimation de l'évolution de la demande en titane sur le marché intérieur européen est présentée dans le Tableau 5. Aucune statistique officielle n'étant publiée, les chiffres présentés ci-dessous ont été calculés par soustraction entre la production mondiale de titane et la consommation des USA, du Japon, de la Chine et de la CEI.

(x1000 tonnes)	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Applications industrielles	13	9	9	9	6	5	3,3	6,6	7	6	8,5	8,5
Aéronautique commerciale	10	9,5	11	10	12	14	15	14	18,5	19	19,5	20
Applications militaires	0,9	0,7	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,5	0,7	0,7
Biens de consommation	1	0,7	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5
TOTAL	24,9	19,9	20,9	19,7	18,7	19,7	19,5	23	26,5	25,8	29,1	29,7

Tableau 5: Évolution de la consommation de titane en Europe

Sans capacités de production d'éponge et avec des moyens de fusion limités, l'Europe est malgré tout un acteur important au niveau de la demande mondiale. Avec une excellente

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	39/158

maîtrise technique et scientifique des procédés de mise en forme et de transformation, l'Europe contribue activement à l'utilisation du titane dans tous les secteurs industriels et travaille à l'émergence de nouvelles applications. L'existence de réseaux associatifs structurés et entreprenants, ou se mêlent industriels, universitaires et centres techniques, est l'une des clefs de ce succès. Il résulte de cette ouverture relativement large sur les domaines d'application une répartition de consommation par secteur dominée par l'aéronautique et les applications industrielles qui représentent la majorité de la consommation européenne. Les effets de la crise de 2008 ont été perceptibles jusqu'en 2017. Seul le secteur aéronautique a montré des signes continus de croissance depuis 2011. L'embellie de la consommation jusqu'en 2019 est brutalement interrompue par la crise économique induite par la pandémie de Covid-19.

⇒ Import – Export

La dépendance vis-à-vis des besoins en titane se traduit par des importations massives^{8,9,10,11} de matière en provenance des principaux pays producteurs (USA, Russie, Japon, + Kazakhstan pour l'éponge) qui placent l'Europe à la première place des pays importateurs. Le titane importé sous la forme d'éponge, de lingot et de demi-produits est transformé dans les usines européennes et intégré en assemblage final ou réexporté. Le Tableau 6 et le Tableau 7 donnent une synthèse des quantités échangées aux frontières.

Import. (en tonnes)	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Éponge & Poudre	16.000	23.418	38.605	34.982	34.848	32.609	31.282	33.521	35.556	36.396
Plaques	6.140	9.063	14.373	12.511	11.292	11.702	14.220	14.062	17.253	19.329
Barres	5.863	6.906	13.951	14.907	16.210	17.034	17.779	18.275	20.465	24.538
Tubes	1.867	1.408	1.210	1.603	1.692	1.647	2.314	2.403	2.302	2.646
Autres	2.606	3.312	4.890	7.371	6.036	5.835	6.176	6.893	6.883	13.699

Tableau 6: Importation d'éponge et de produits en titane en Europe [réf.8,9,10,11]

Export. (en tonnes)	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Éponge & Poudre	5.787	10.244	9.955	8.617	8.363	7.947	8.476	8.554	10.088	11.165
Plaques	1.387	2.084	3.639	3.604	3.895	3.080	3.516	3.791	4.778	4.301
Barres	3.014	3.872	5.272	6.558	6.540	7.341	7.527	8.321	9.266	11.119
Tubes	1.810	1.223	3.639	1.537	2.360	1.662	1.555	1.950	2.361	1.451
Autres	2.362	2.434	6.496	6.733	6.951	3.872	3.169	4.132	3.907	4.203

Tableau 7: Exportation d'éponge et de produits en titane depuis l'Europe [réf.8,9,10,11]

Nota bene : Les valeurs données dans les tableaux ci-dessus sont les quantités de matière importées en Europe depuis l'étranger, exportées depuis l'Europe vers l'étranger et au sein de l'Union Européenne.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	40/158

III PERSPECTIVES POUR LE MARCHE AERONAUTIQUE

Le titane est un matériau de choix pour les concepteurs d'aéronefs car c'est un métal qui présente des caractéristiques mécaniques spécifiques^s attractives (en particulier en résistance et en fatigue mécanique) tout en bénéficiant d'un bon comportement à la corrosion. Son emploi requiert toutefois des précautions de conception et de mise en œuvre, comme la sensibilité à l'effet d'entaille et le mauvais comportement tribologique. Présent dans les pièces structurales et dans les moteurs de tous les avions modernes, le titane a un domaine d'emploi en température qui lui permet de concurrencer les aciers et les alliages d'aluminium jusqu'à environ 600°C. Dans cette compétition, si le titane présente de nombreux avantages techniques, il est toutefois fortement pénalisé par son prix et par ses conditions d'approvisionnement. Les orientations technologiques sur les dernières générations de turboréacteurs introduisent par ailleurs de nouvelles solutions matériaux qui concurrencent les alliages de titane : les composites pour les aubes de soufflante, les aluminures de titane, les superalliages base nickel etc.

Pour la partie structurale, les nouvelles générations d'avions de ligne (B787, A350) ont durci les critères de sélection pour les matériaux en imposant des limites plus contraignantes sur les performances spécifiques. L'aluminium, matériau de choix pour les cellules d'avion, est ainsi remplacé par les composites à matrice organique (CMO), plus légers et plus résistants à la corrosion. La Figure 63 donnée en annexe illustre la part prépondérante des CMO dans ces avions. Déjà bien positionné par ses caractéristiques performance/poids, le titane gagne un nouvel atout déterminant dans la compétition avec les autres métaux aéronautiques : il est compatible chimiquement (comportement à la corrosion) et thermiquement (dilatation) avec les CMO employés pour ces nouveaux avions. Le volume de titane consommé dans le secteur aéronautique a augmenté significativement ces 10 dernières années depuis le lancement en production du B787 puis de l'A350.

Alors que les perspectives aéronautiques semblaient solidement ancrées dans des hypothèses de croissance forte et continue tirées à la fois par une augmentation du trafic aérien dans les marchés émergents et aussi par un besoin de renouvellement des flottes d'avion dans les pays développés, la crise du Covid-19 a brutalement remis en cause ce scénario à court, moyen et long terme.

La Figure 22 donne la prévision de la consommation de titane pour l'ensemble du secteur aéronautique commercial. Ce graphe est basé sur les données qui sont détaillées dans les sections suivantes.

^s Performance mécanique rapportée à la densité

Aéronautique: consommation mondiale de titane

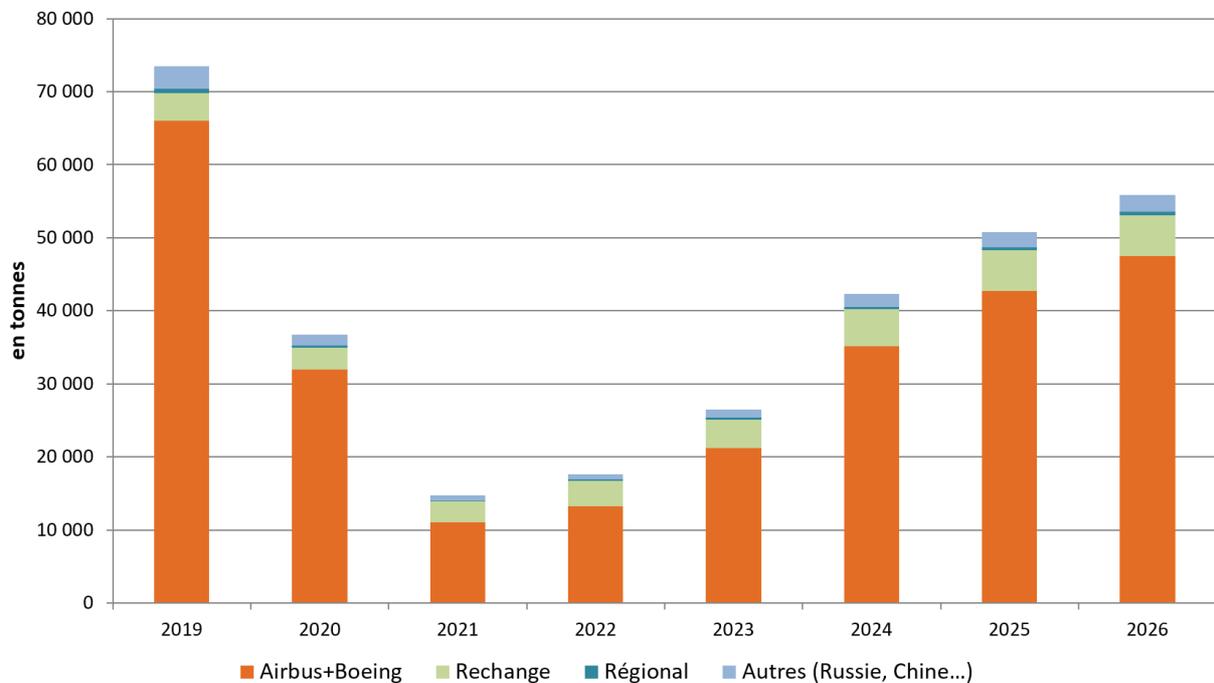


Figure 22: Évolution de la consommation de titane dans le secteur aéronautique

III.1 Impact de la pandémie du Covid-19 sur le secteur aéronautique

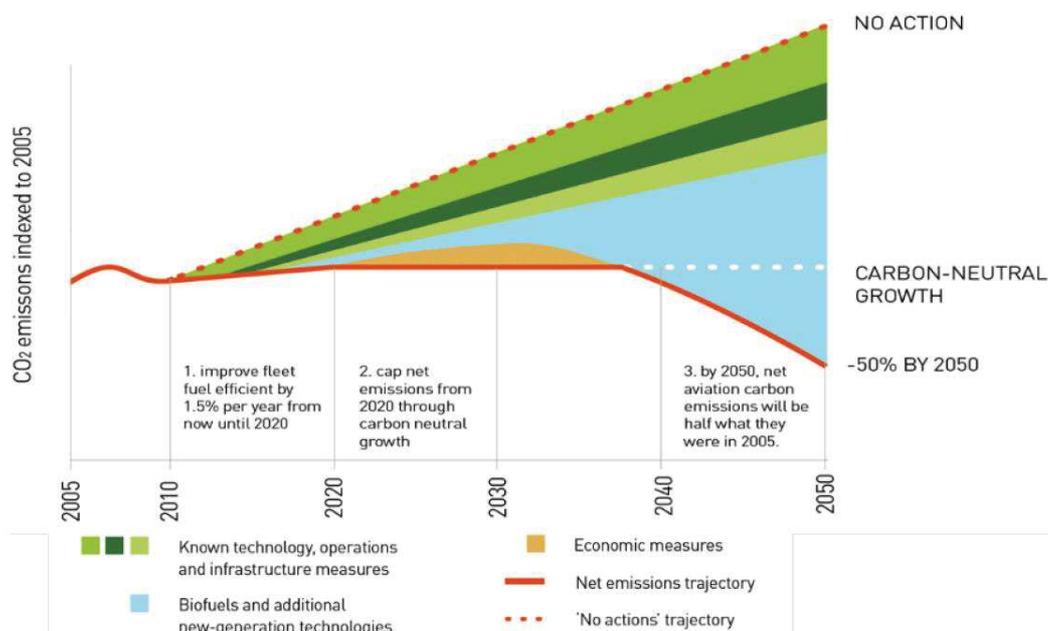
La pandémie de Covid-19 a eu des conséquences immédiates sur l'activité du secteur aéronautique en raison des restrictions imposées pour des raisons sanitaires sur les déplacements des populations. Le trafic aérien a ainsi chuté de -67% entre 2019 et 2020¹² et les usines de production ont subi, comme les autres secteurs d'activité, les conséquences des confinements successifs sur l'organisation industrielle. Globalement, les livraisons aéronautiques mondiales ont chuté de -43% entre 2019 et 2020¹³ alors que les chiffres de 2019 incluaient déjà la baisse d'activité de Boeing de -53% causée par l'arrêt des livraisons du B737MAX.

Bien que le nombre global de vols ait chuté en 2020, les trajets domestiques favorisant les monocouloirs type A320 et B737 ont comparativement mieux résisté avec 77% du nombre total de vol en 2020 contre seulement 23% pour les trajets longues distances pénalisés par la fermeture des frontières et les restrictions sur les voyages d'affaires. Cette tendance court terme préfigure, selon plusieurs analystes, une évolution à moyen terme de la demande aéronautique avec une révision à la baisse du besoin en avion long-courriers et une disparition déjà programmée des gros porteurs type A380 et B747. Les raisons de ce changement du trafic se trouveraient d'un part dans un changement de comportement des usagers, réticents à perpétrer des habitudes consommatrices voire prônant la honte de prendre l'avion (« avihonte », un

mouvement né en Suède en 2019) et d'autre part dans des causes plus structurelles avec la régionalisation des trajets et la fin des réseaux en étoile. Alors que la pandémie de Covid-19 n'est pas encore maîtrisée au moment où ces lignes sont écrites (mars 2021), il est difficile de déterminer avec certitude à quel échéance les effets de la crise s'estomperont. Selon les premières estimations, l'effet conjoncturel finirait de disparaître au mieux en 2023 et laisserait place à un évolution à moyen terme favorisant :

- Les avions monocouloirs les plus récents, économes en carburant et en entretien, à l'image de l'A320neo l'avion le plus populaire de sa catégorie ;
- Le retrait accéléré du service pour les avions les moins récents ;
- La conversion d'avions long-courrier en avion-cargo pour répondre à l'augmentation du fret aérien en lien avec la croissance des achats en ligne ;
- L'accélération des programmes de transformation de l'industrie aéronautique en faveur d'une réduction de l'émission de CO₂ et un meilleur respect de l'environnement.

Ce dernier point est particulièrement important car il fait écho aux orientations de politique industrielle dans le cadre des plans de relance mis en place dans les pays développés. Dans le secteur aéronautique, le document de référence¹⁴ de l'International Air Transport Association (IATA) décrivant la feuille de route technologique pour l'aviation à l'horizon 2050 donne les grandes orientations et fixe les objectifs de réduction des émissions de CO₂ présentés dans la Figure 23.



Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	43/158

III.2 Feuille de route de l'aéronautique à l'horizon 2050 (IATA)

Le rapport de l'IATA [ref. 14] présentant la feuille technologique de l'aviation à l'horizon 2050, donne une vision des grands axes de progrès dans les domaines de la propulsion et des structures aéronautiques. En cohérence avec les objectifs environnementaux et la prise en compte du changement climatique, ces axes privilégient en particulier la réduction de l'impact carbone tant au niveau de la fabrication des avions que de leur exploitation. Les principales conclusions sont présentées ci-dessous :

- A l'horizon 2035, les concepts d'avions copient les concepts actuels (fuselage tubulaire et ailes, propulsion par moteurs à réaction, carburant fossile/kérozène) en améliorant de manière incrémentale ces technologies ;
- A partir de 2035, de nouvelles approches révolutionne les concepts traditionnels et introduisent des technologies de rupture tant pour la propulsion que pour les structures.

⇒ Technologies actuelles et évolution incrémentale (jusqu'en 2035)

Les évolutions technologiques actuelles sont principalement basées sur une recherche de réduction de la consommation de carburant avec un objectif de l'ordre -15% à -25%. Une nouvelle génération d'avion remplace la précédente à un rythme de 15 à 20 ans environ. Compte tenu des récentes introductions d'avions à fuselage composite (A350, B787) et des nouvelles motorisations dans la période 2014 – 2020 (A320neo, B737MAX), le prochain saut incrémental peut être espéré vers 2030 avec une baisse de la consommation de carburants de -15 à -20%. Au-delà, il semble peu probable que des gains significatifs puissent être espérés à l'horizon 2035 en restant sur ces configurations d'aéronefs.

⇒ Technologies de rupture (à partir de 2035)

A partir de 2035, l'IATA prévoit l'introduction de nouvelles configurations d'avions. Au niveau structure, les concepts prometteurs sont les ailes volantes (*Blended Wing Body – BWB*, voir Figure 24), les avions à ailes haubanées (*Strud Braced Wing – SBW*), les fuselages dédoublés (« *double-bubble* » fuselage, voir Figure 25) et les concepts d'ailes en caisson (*boxed-wing aircraft*).



Figure 24: Démonstrateur d'aile volante MAVERIC de type BWB (source : Airbus)



Figure 25: Concept de fuselage dédoublé (source : NASA)

Au niveau des systèmes de propulsion, les concepts les plus prometteurs sont ceux à architecture ouverte tels les turboréacteurs de type « soufflante non carénée » (*open rotors*, voir Figure 26), les concepts de design de fuselage favorisant l'écoulement et l'ingestion de couches limites par les turboréacteurs (*Boundary Layer Ingestion Propulsion*, voir Figure 27) ainsi que les avions à propulsion électrique.



Figure 26: Concept de soufflante non carénée (source : Safran)

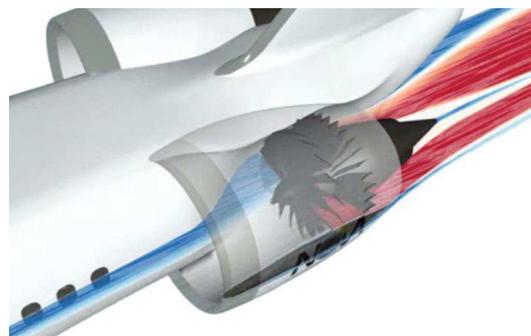


Figure 27: Concept favorisant l'ingestion des couches limites (source : ONERA)

En raison de leur poids, les technologies actuelles de batteries limitent les possibilités en termes de durée de vol et de capacité d'emport des avions électriques. Des concepts d'aéronefs à propulsion 100% électriques et d'autres à propulsion hybride électrique/carburant sont actuellement en service et d'autres en développement. Comme pour les voitures, ils exploitent l'avantage de la grande efficacité énergétique de l'électrique et utilisent les batteries

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	45/158

comme des sources secondaires d'énergie pour les pics de puissance. Différents acteurs industriels ainsi que des startups spécialisées travaillent sur des concepts à faible capacité d'emport, typiquement 15 à 20 sièges, jusqu'à des avions régionaux de 50 à 100 sièges. Les premiers prototypes de ces avions pourraient voir le jour à l'horizon 2035.

Pour conclure, le rapport de l'IATA présente deux technologies disruptives, l'une pour les distances intracontinentales inférieurs à 1.000 kms et l'autre pour les longues distances.

La première est un concept de train électromagnétique supersonique en lévitation dans un tube à basse pression transportant passagers et/ou fret à grande vitesse (voir Figure 28). Ce train pourrait concurrencer les avions et les trains à grande vitesse sur des parcours intracontinentaux. Pour les longues distances, c'est la renaissance des programmes supersoniques qui est attendue dans la décennie 2020 – 2030, dans un premier temps pour les avions d'affaires puis pour les lignes commerciales. Néanmoins, les systèmes de propulsion devront démontrer leur compatibilité avec les objectifs bas carbone de l'aéronautique.



Figure 28: Train électromagnétique supersonique (source : Hyperloop TT)

⇒ Place du titane dans ces nouvelles technologies

Les caractéristiques du titane (performances mécaniques spécifiques, amagnétisme, élasticité etc.) en font un matériau métallique de choix pour les systèmes à haute performance. Les futures technologies de transport, qu'elles soient aériennes ou terrestres, dépasseront les limites des machines actuelles avec un objectif commun de réduire les temps de transport. A ce titre, il sera nécessaire de trouver des voies d'allègement des structures tout en augmentant les niveaux de sollicitation de celles-ci. Le degré de maturité des systèmes de transport du futur est encore trop faible pour quantifier le potentiel d'emploi du titane, néanmoins les premiers prototypes de projets exploratoires font souvent appel au titane.

Le prototype de train supersonique Hyperloop cité ci-dessus adopte par exemple le titane pour son système de frein, et pour le support de carénage avant. Dans le domaine des avions supersoniques, le Boeing 2707 (voir Figure 29) qui devait concurrencer le Concorde était construit autour d'une cellule en titane et d'une voilure à géométrie variable. Plus rapide que le Concorde, cet avion était conçu pour transporter jusqu'à 300 passagers à une vitesse proche de Mach 2,7. Seul le titane pouvait survivre aux frottements avec l'air au-delà de Mach 2,2. L'autre concurrent russe, le Tupolev 144, adoptait comme le Concorde une cellule en

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	46/158

aluminium en raison de sa vitesse de croisière de « seulement » Mach 2,2. En revanche, les pièces en titane comme les bords d'attaque, boucliers thermiques, élevons et palonniers représentaient jusqu'à 15% du poids total de l'avion.



Figure 29: Boeing 2707 (source : Boeing - archives Air & Cosmos)



Figure 30: Tupolev 144 (source : Wikipedia)

III.3 Avions de ligne en 2021 (capacité supérieure à 100 sièges)

Sur le segment des avions de ligne de plus de 100 sièges, les constructeurs Airbus et Boeing se partagent actuellement l'essentiel du marché mondial^t. Nous présentons dans la Figure 64 donnée en annexe, l'historique de productions annuelles des deux avionneurs entre 1994 et fin décembre 2020. En mai 2017, deux nouveaux avions de ligne ont fait leur premier vol : le C919 du nouvel entrant chinois COMAC et l'Irkut MS21 du consortium russe OAK. Leur mise en service est attendue respectivement en 2021 et 2022 (voir paragraphes III.3.2 et III.3.3).

Les avions de plus de 100 sièges représentent la plus forte demande aéronautique qui est estimée, au total, entre 39.210 et 48.400 appareils pour les 20 prochaines années^{15,16}, soutenue par une perspective de croissance moyenne du trafic aérien mondial de l'ordre de

^t Une part minime du marché est servie par le russe Tupolev

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	47/158

4%/an. Globalement stable à long terme, les perspectives à 10 ans ont été revues à la baisse de -11% avec une demande de 18.350 avions à l’horizon 2030. Comme indiqué précédemment, une accélération des remplacements d’avion au profit des nouvelles générations plus économes en carburant et en entretien devrait avoir lieu dans les prochaines années.

La flotte en service à l’horizon 2039 devrait atteindre 48.400 avions en comparaison des 25.900 appareils actuellement en service. La plus forte croissance est attendue en Asie qui, à terme, comptera pour 40% de la flotte mondiale contre 30% en 2020.

Le segment des monocouloirs (familles A320neo et B737MAX) concentre entre 66% et 76% de la demande en avions neufs avec 32.270 à 38.360 appareils. C’est ce segment de la demande qui devrait redémarrer le plus tôt après la crise du Covid-19 grâce à la reprise des vols intérieurs et courtes distances.

Pour les avions long-courriers, le besoin est estimé entre 7.480 et 9.450 appareils sur les 20 prochaines années tandis que pour les gros porteurs il serait compris entre 850 et 930 avions neufs et serait complété par 1.500 à 1.630 conversions d’avions de ligne.

⇒ Avions parkés et retrait accéléré du service

Avant la crise du Covid-19, le taux de croissance annuel moyen du trafic était nettement supérieur à celui projeté maintenant sur le long-terme avec 6,5%/an. Ces conditions stimulaient la prise de commande d’avions neufs et maintenaient également en service des avions moins récents pour ajuster la flotte en activité à la demande. Avec l’arrêt du trafic et les perspectives revues à la baisse, une grande partie des avions parkés des plus anciens ne volera probablement jamais. De plus, la pression sur les coûts d’exploitation plaide en faveur de leur remplacement.

III.3.1 Airbus & Boeing

Globalement, le duopole Airbus/Boeing concentre plus de 85% des livraisons d’avion commerciaux, les 15% restants se répartissant sur les 6 autres avionneurs dont l’activité est décrite dans les paragraphes suivants. Dans le panorama aéronautique mondial, Airbus est devenu en 2020 de loin le plus grand constructeur d’avion avec 556 livraisons soit plus des 2/3 des livraisons d’avions commerciaux dans un contexte global de baisse des livraisons supérieure à -40%. L’historique de la production annuelle d’avion, des prises de commande et du nombre d’avion restant à livrer (*backlog*) pour Airbus et Boeing est donné dans les Figure 64, Figure 65 et Figure 66 en annexe.

Deux accidents mortels en octobre 2018 et mars 2019 sur B737MAX ont significativement impacté l’activité de Boeing avec une interdiction de vol de 20 mois entre mars 2019 et décembre 2020 et un arrêt des livraisons sur la même période. La production a totalement cessé entre janvier 2020 et mai 2020 et celle accumulée entre mars 2019 et janvier 2020 a été parkée en attendant la reprise des livraisons (450 avions).

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	48/158

Alors qu’Airbus finissait l’année 2019 avec une augmentation de +7% de ses livraisons, celles de Boeing ont chuté de -53%. L’effet s’est fait sentir encore plus durement sur le carnet de commande avec une chute de -94% pour Boeing alors qu’Airbus progressait de +2,8%.

La pandémie du Covid-19, survenue fin 2019 et encore en cours au moment de la rédaction de ce rapport, a plongé le secteur aéronautique dans une crise sans précédent depuis le début de son histoire. Les contraintes de confinement ont eu pour effet de ralentir des cadences de production pour Airbus qui a vu ses livraisons chuter de -34%. Côté Boeing, l’identification de problème de structure sur le B787 a obligé l’avionneur à ralentir sa production en décembre 2020. Au final, le cumul des contraintes liées au Covid-19 et des problèmes techniques sur B737MAX et B787 ont abouti à une baisse des livraisons de -59% en 2020 pour Boeing. En 2 ans, l’avionneur américain a ainsi vu ses livraisons s’effondrer de -80%. Au niveau du carnet de commande, le bilan fin 2020 des commandes nettes pour Boeing a été, pour la première fois de son histoire, négatif avec -471 commandes alors qu’Airbus finissait l’année avec 268 commandes nettes.

Airbus a intégré dans sa gamme d’avion les programmes CSeries rachetés à Bombardier en deux étapes en janvier 2019 puis février 2020. L’avionneur européen a ainsi enrichi son offre avec cet avion rebaptisé A220 dans le segment des avions de 110 à 135 sièges.

Le Tableau 8 ci-dessous donne un aperçu des estimations de cadence de production d’Airbus en 2020, la comparaison avec les livraisons cette année-là et les tendances pour l’évolution des cadences de production pour l’année 2021.

Airbus	Production 2020	Livraison 2020	Stock	Backlog (fin 2020)	Tendance 2021
A320	480 (40 avions/mois)	446	bas	5.885 avions 12 ans à 40 avions/mois 8 ans à 60 avions/mois	
A350	60 (5 avions/mois)	59	bas	509 avions 8,5 ans à 5 avions/mois	
A330	24 (2 avions/mois)	19	bas	298 avions 12 ans à 2 avions/mois 8 ans à 3 avions/mois	
A380	6 (0,5 avions/mois)	4	bas	5 avions	Fin en 2022

Tableau 8: Cadences de production d’Airbus

Début 2021, la cadence de production de l’A320 est de 40 avions/mois ce qui correspond au niveau qui avait cours en 2015. Selon les prévisions actuelles, les cadences augmenteront à 47 avions/mois en juillet 2021, puis à 51 avions/mois en janvier 2022, 57 avions/mois en juillet 2022 et jusqu’à 61 avions/mois en janvier 2023. A ce rythme, Airbus retrouverait donc son niveau de production d’avant le Covid-19 (60 avions/mois) au bout de 3 ans. Pour l’A220, la cadence de production de 4 avions/mois est maintenue.

Les perspectives de retour aux niveaux d’avant la crise pour les long-courriers sont moins bonnes en raison des incertitudes sur le retour à la normale du trafic international et aux

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	49/158

conséquences de la crise sur les habitudes des passagers, tant pour le tourisme que pour les voyages d'affaires. Pour l'A330, la cadence de 2 avions/mois adoptée en 2020 devrait être maintenue dans les années à venir ou, au plus augmentée à 3 avions/mois pour retrouver la cadence d'avant la crise. Le programme A350 a vu ses cadences réduites de moitié en 2020 à 5 avions/mois en comparaison de son niveau d'avant la crise (9,5 à 10 avions/mois). Dans le segment des jumbo jet, l'arrêt de production de l'A380 a été décidé pour fin 2022. Le carnet de commande de l'avion compte encore 5 avions à livrer à un rythme de 0,5 avions/mois.

Du côté de Boeing la situation est plus difficile en raison des effets combinés du Covid-19 et des problèmes techniques sur ses deux principaux programmes, le B737MAX et le B787, qui se traduisent également par des annulations de commandes.

Le Tableau 9 ci-dessous présente les estimations de cadence de production de Boeing en 2020, la comparaison avec les livraisons cette année-là et les tendances pour l'évolution des cadences de production pour l'année 2021.

La situation que doit gérer Boeing pour le 737MAX est complexe. Bien que les livraisons des avions aient été suspendues entre mars 2019 et décembre 2020, période pendant laquelle l'avion était interdit de vol, Boeing a maintenu la production jusqu'à début janvier 2020. L'avionneur a finalement arrêté ses chaînes d'assemblage entre janvier et mai 2020 puis les a relancées au rythme réduit de 5 avions/mois à partir de là. La production stockée représentait 450 avions fin 2020. Ce stock doit être écoulé en priorité ce qui limite le potentiel de montée en cadence des lignes d'assemblage. Le rythme de production du B737MAX devrait monter progressivement jusqu'au mieux 31 avions/mois en 2022, soit la moitié du niveau d'avant Covid-19 (63 avions/mois).

Pendant l'arrêt des livraisons du B737MAX, Boeing a mis l'effort sur le B787 pour faire rentrer du chiffre d'affaires. Le rythme de 14 avions/mois a été maintenu jusqu'à décembre 2020. La baisse du niveau de carnet de commande et les incertitudes sur les perspectives pour les long-courriers ont obligé Boeing à réduire les cadences à 6 avions/mois en 2021. En fonction de l'évolution des prises de commande, cette cadence pourrait encore être revue à la baisse.

Pour le B777, Boeing a baissé la cadence de production de 2,5 à 2 avions/mois début 2021 en attendant la sortie de crise. Les prévisions pour le B767 sont comparables avec une baisse potentielle de 3 à 2 avions/mois en raison d'un carnet de commande bas. L'arrêt de production du B747 est prévu pour 2022 à un rythme de 0,5 avions/mois.

Boeing	Production 2020	Livraison 2020	Stock	Backlog (fin 2020)	Tendance 2021
B737	40 (5 avions/mois est.) Depuis mai 2020	43	450	4.031 avions Corrigé -> 3.581 avions 30 ans à 10 avions/mois 10 ans à 30 avions/mois	Trade off (stock/production)
B787	168 (14 avions/mois)	53	115 ?	513 avions Corrigé -> 398 avions 7 ans à 6 avions/mois	Baisse à 6 avions/mois en 2021
B777	30 (2,5 avions/mois)	26	bas	367 avions 12 ans à 2,5 avions/mois 15 ans à 2 avions/mois	Baisse à 2 avions/mois en 2021
B767	36 (3 avions/mois)	30	bas	75 avions 2 ans à 3 avions/mois	Ou Baisse ?
B747-8	6 (0,5 avions/mois)	5	bas	11 avions 1 ans à 0,5 avions/mois	Fin en 2022

Tableau 9: Cadences de production de Boeing

Des ajustements importants sont nécessaires sur le calcul du besoin théorique de titane basé sur les cadences de production. En effet, le besoin en approvisionnement doit prendre en compte une situation de surstock dans l'ensemble de la chaîne de valeur de Boeing et de son réseau de sous-traitant. La Figure 31 donne les prévisions d'évolution de la consommation de titane pour Airbus et Boeing en tenant compte de la résorption de ce surstock en 2021 et 2022.

Aéronautique: consommation titane Airbus+Boeing

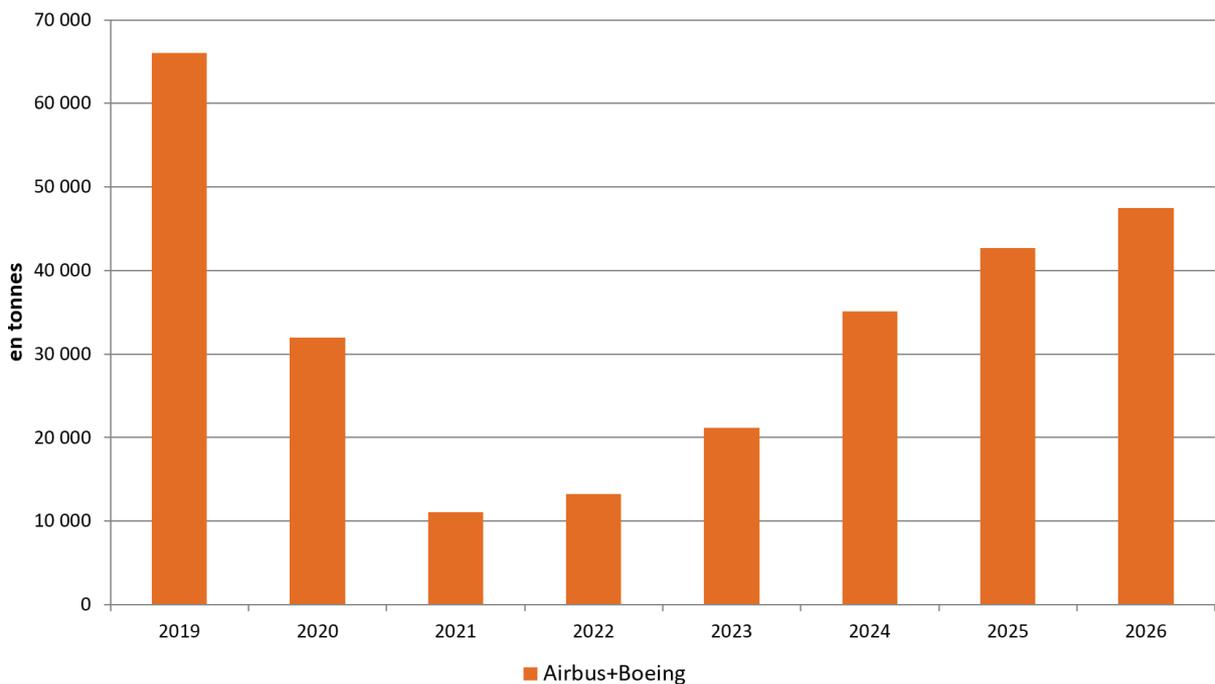


Figure 31: Consommation de titane pour Airbus et Boeing

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	51/158

III.3.2 COMAC (Chine)

Le gouvernement chinois a confié au groupement industriel COMAC (Commercial Aircraft Corp. Of China) les missions de Recherches & Développements, fabrication et commercialisation des futures familles d'avions chinois. Le programme de COMAC a démarré avec l'avion régional ARJ21 (voir paragraphe III.4.4) puis se poursuit avec le premier avion de ligne chinois moyen-courrier le C919^u dont le premier vol a eu lieu en mai 2017.

Cet avion accueillera, en fonction des versions, 168 à 190 sièges afin de concurrencer la gamme des moyen-courriers A320 et B737. Le programme C919 a été officiellement lancé par le gouvernement chinois en mai 2008 avec comme objectif initial de réaliser un premier vol en 2014 et une entrée en service en 2016. Finalement, le programme a pris 3 ans de retard. La chaîne d'assemblage située à Pudong (proche de Shanghai) a débuté fin 2009. Elle est dimensionnée pour produire quelques dizaines d'exemplaires d'avions par an (C919 et ARJ21). Les 6 premiers prototypes de test du C919 ont été assemblés fin 2019 dans la perspective d'une mise en service de l'avion en 2021. La première certification a été attribuée en novembre 2020 par l'autorité chinoise CAAC. L'exploitation commerciale devrait intervenir en Chine fin 2021 ou en début d'année 2022. Ainsi, l'avionneur chinois prévoit de livrer le premier exemplaire du C919 en 2021 puis d'augmenter progressivement les cadences jusqu'à 50 avions/an à partir de 2026 (voir Tableau 10).

Compte-tenu du niveau de technicité encore insuffisant du tissu industriel chinois de l'aéronautique, un appel d'offre international a été lancé pour trouver des partenaires et fournisseurs étrangers pour les moteurs, équipements et pièces détachées. COMAC a retenu de nombreux fournisseurs d'équipements déjà partenaires d'Airbus et Boeing pour la production de la première génération de C919 mais l'objectif du chinois est d'acquérir à moyen terme la totalité de la technologie aéronautique. Par exemple, les moteurs et les nacelles de l'avion chinois qui seront sous-traités dans un premier temps à Safran/GE (CFM International pour le moteur et Nexcelle pour la nacelle, voir la Figure 67 en annexe) ont vocation à passer, à terme, sous maîtrise industrielle chinoise.

Le C919 totalisait 815 commandes fin 2020 dont 305 fermes. Elles ont été passées par des compagnies aériennes chinoises dont le besoin est estimé à plus de 8.600 avions d'ici à 2039. Sur ce total, COMAC ambitionne de fabriquer 2.000 avions d'ici à 2040 soit en moyenne 100 avions/an.

Pour gagner des parts de marché en Chine, Airbus a délocalisé une ligne d'assemblage située à Tianjin. Ce site, opérationnel depuis 2009, aurait dû produire 160 avions en 2020 soit environ 13 avions/mois. La crise du Covid-19 a obligé Airbus à stopper la ligne d'assemblage qui n'a rouvert qu'en février 2020. Le site assemble également l'A330 depuis 2017 et devrait accueillir celui de l'A350XWB à partir du premier trimestres 2021.

^u Le « 9 » est symbole de longévité et le « 19 » rappelle la capacité de 190 sièges de l'avion.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	52/158

De son côté Boeing a inauguré en décembre 2018 une usine d'assemblage de B737 à Zhoushan (sud de Shanga) dont la capacité est de 100 avions/an.

Le développement de l'industrie aéronautique chinoise profitera donc, dans un premier temps, aux producteurs historiques qui sont seuls capables de fournir à la Chine les produits titane de haute technologie nécessaires à la réalisation de ses programmes. En affaiblissant ses concurrents occidentaux, la crise du Covid-19 offre à ce pays l'opportunité de réduire son retard d'au moins 4 années.

Basée sur des technologies modernes, la conception du C919 ne porte pas de rupture technologique pouvant induire des consommations de titane significativement plus élevées que celles de ses concurrents actuels. Les prévisions de cadence de production du programme C919 sont présentées dans le Tableau 10.

C919	2021	2022	2023	2024	2025	2026+
Avion/an	1	4	10	20	30	50

Tableau 10: Prévision de cadences de production annuelles du C919

En mai 2017, COMAC et le consortium aéronautique russe UAC ont annoncé la création de la joint-venture CRAIC (China-Russia Commercial Aircraft International Co.) dont l'objet est la gouvernance du futur programme d'avion « à fuselage large » baptisé CR929. Cet avion biréacteur long-courrier à double couloir accueillera 280 sièges dans sa version première version baptisée CR929-600. Conçu avec un fuselage composite, il concurrencera l'A350 et le B787, voire également l'A330. Des versions plus courtes et plus longues de l'avion devraient également voir le jour ainsi qu'une version d'avion d'affaires, une autre pour le transport d'officiels et un avion-cargo.

Prévu au début pour une mise en service en 2021, la commercialisation est maintenant annoncée pour 2023, voire 2028/2029 selon les sources. Des désaccords entre la Russie et la Chine ont retardé le projet. La Russie ne voulant pas partager son savoir-faire aéronautique avec la Chine, elle a favorisé la relance du programme Il-96-400M, un gros porteur capable d'accueillir 400 passagers (voir paragraphe III.3.3). CRAIC estime que son gros porteur pourrait bénéficier de 989 commandes sur un marché de 10.000 avions jusqu'à l'horizon 2045. Le marché chinois est particulièrement ciblé avec un espoir de 270 commandes sur un besoin total estimé à 818 appareils selon CRAIC.

III.3.3 UAC (Russie)

Après la chute de l'Union Soviétique, le tissu militaro-industriel aéronautique russe a été fédéré au sein de l'organisation *United Aircraft Corporation (UAC)* afin de relancer les capacités de production sur tous les segments de la demande (voir également le paragraphe III.4.5).

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	53/158

Ainsi, la Russie a lancé son programme de nouvel avion de ligne l'Irkout MC-21, un biréacteur moyen-courrier destiné à remplacer les Toupolev Tu-204, Tu-154 B et M sur les marchés d'Europe de l'Est, de la Chine et de l'Inde. Assemblé sur le site d'Irkoutsk, le fabricant d'avions militaires Yack et Soukhoï, l'avion sera commercialisé en trois versions de 132 à 211 sièges (versions M C-21-200, MC-21-300 et MC-21-400). Il est propulsé par un moteur Pratt & Whitney PW1400G Pure Power et un moteur russe PD-14 développé par le constructeur Aviadvigatel OJSC qui motorise déjà, entre autres, les modèles Tu-204, Tu 214 et II-96.

Le premier vol du MC-21 a eu lieu en mai 2017 et sa mise en service est espérée en 2021 avec la certification et après deux ans de retard sur le planning initial. Le premier vol de l'avion équipé des moteurs russes a eu lieu en décembre 2020. Le PD-14 adopte une soufflante à aubes larges et creuses en titane. Il équipera la moitié des 630 premiers MC-21 de série dont la production devrait débiter en 2022 si la certification est accordée. Irkout indique avoir enregistré 175 commandes fermes et 100 intentions de commandes.

Sur le segment des avions long-courrier, l'UAC a travaillé sur un gros porteur quadrimoteur l'Il-96-400M en modernisant l'architecture de l'Ilyushin II-96 né pendant l'ère soviétique et construit à seulement 30 exemplaires. Prévu pour accueillir entre 305 et 402 passagers, il peut concurrencer l'A330-300. Le premier vol est prévu en 2021. Selon les rumeurs, le lancement de ce programme aurait été motivé par les retards sur le projet sino-russe d'avion gros porteur CR929. L'UAC ambitionne de construire l'Il-96-400M d'ici à 2025 à un rythme de 2,5 avions/an. Seule ombre au tableau, cet avion n'a enregistré aucune commande en janvier 2021.

III.4 Avions régionaux en 2021 (avion jusqu'à 130 à 149 sièges)

La crise du Covid-19 a un impact significatif sur les prévisions de croissance du marché des avions régionaux (avions jusqu'à 150 sièges). Selon le constructeur brésil Embraer¹⁷, le trafic aérien augmentera de seulement +2,6%/an sur la période 2020-2030 à comparer aux +4,4%/an d'avant la crise¹⁸. Le retour au niveau de 2019 n'est pas attendu avant 2024 (voir Figure 32), néanmoins Embraer estime que le trafic régional reprendra un an avant les vols internationaux.

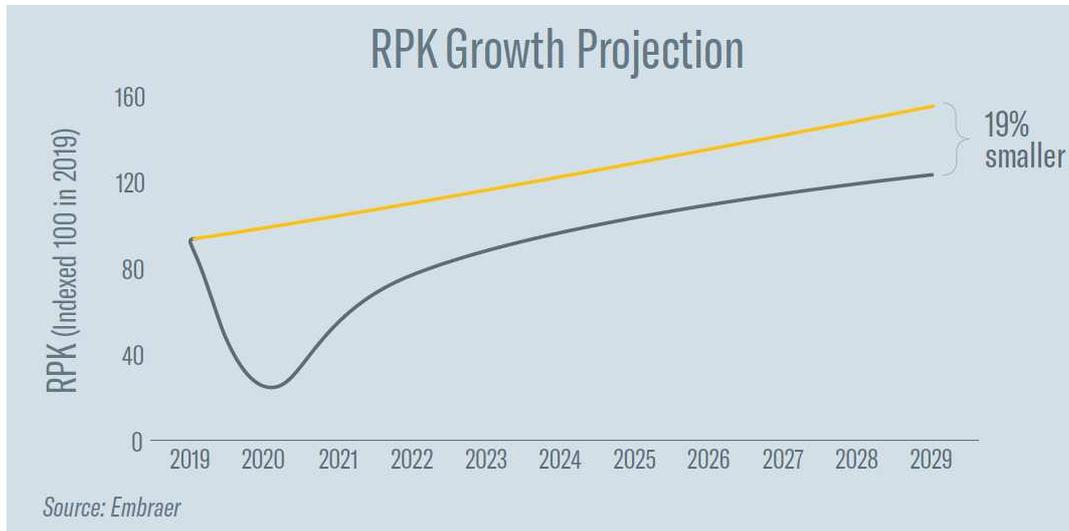


Figure 32: Préviction de croissance du trafic aérien avant et après Covid-19 [ref.17].

Embraer estime que la demande en avions neufs pour les 10 prochaines années sera de 5.500 appareils, 75% pour le remplacement de la flotte actuelle estimée à 8.660 avions et 25% pour répondre l'accroissement du trafic. La demande en avions à réaction (jets) domine avec 4.420 appareils devant celle des avions turbopropulsés avec 1.080. Le plus gros marché des turbopropulsés est en Chine avec 50% de la demande tandis que la demande en jets se répartie entre les USA (34%), la Chine (27%), l'Europe (17%), l'Amérique latine (8,5%) et la CEI (7%).

La flotte d'avion régionaux actuellement en service est d'environ 8.660 avions. Globalement, les perspectives à 10 ans se traduisent par une demande de 550 avions/an jusqu'en 2030. Le segment de marché est actuellement occupé par les constructeurs Airbus^v, le brésilien Embraer, le japonais Mitsubishi Heavy Industries^w (MHI), le russe Antonov et depuis peu le chinois COMAC (ACAC).

La Figure 33 donne une estimation globale des besoins en titane pour l'ensemble des programmes d'avions régionaux, sur la base des données détaillées dans les paragraphes suivants.

^v Depuis la prise de participation majoritaire dans le capital du canadien Bombardier en juillet 2018 et la valorisation de la gamme d'avions C-Series dans celle d'Airbus sous l'appellation A220-100 et -300.

^w Depuis le rachat du programme CRJ de Bombardier en juin 2020.

Aéronautique: consommation de titane pour les avions régionaux

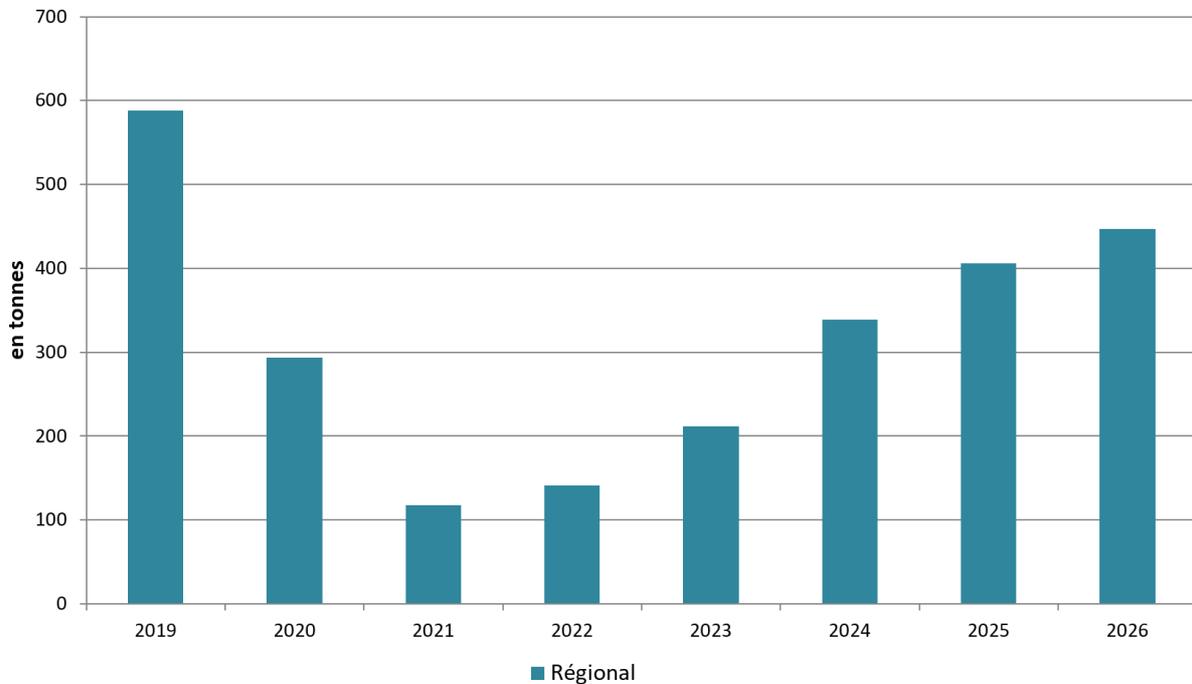


Figure 33: Prédiction de la consommation en titane des programmes d'avions régionaux

III.4.1 Embraer (Brésil)

L'évolution du besoin vers des avions de plus grande capacité a eu pour effet de tarir le carnet de commande des avions de 30 à 50 sièges couvert par la gamme des ERJ 135, 140 et 145 du constructeur brésilien Embraer. La production s'est arrêtée en 2011, quatre ans avant l'échéance prévue par Embraer. Pour la gamme 60 à 90 sièges (Embraer-170, Embraer-175), le carnet de commande pour l'Embraer-170 s'est tari en 2017 après 191 appareils livrés au total tandis que l'Embraer-175 dispose encore d'un carnet de commande de 153 appareils fin 2020. Enfin, pour les plus gros avions E-190 et E-195 offrant une capacité de 98 à 122 sièges, le constructeur brésilien n'a quasiment plus d'avion en commande.

Pour répondre à l'évolution de la demande aéronautique, Embraer a introduit en 2011 la famille d'avions E-jet E2 pour renouveler son offre. Le E175-E2 a remplacé l'E-175 dans la gamme des 80 sièges, le E190-E2 offrant 106 sièges s'est substitué à l'E190 et le E195-E2 offrant 132 sièges a remplacé l'E195. Les avions seront propulsés par des moteurs Pratt & Whitney's PurePower PW1700G et PW1900G. En 2020, Embraer a livré 44 avions, à peine la moitié des livraisons de 2019 (89 au total) et disposait d'un carnet de commande de 275 appareils. Les livraisons vont augmenter en 2021 mais à un rythme qui dépendra de l'évolution des prises de commande. Embraer a par ailleurs annoncé le démarrage de deux nouveaux programmes d'avions turbopropulsés pour 2021.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	56/158

L'estimation du besoin en titane est de 6 tonnes/avion pour la famille des 190 et 195 et de 4 tonnes/avion pour le 175.

Après deux ans de négociation, Boeing a finalement renoncé en avril 2020 à racheter Embraer. L'objectif était de compléter la gamme d'avion dans la catégorie des moins de 100 sièges, une démarche comparable à celle d'Airbus avec Bombardier. Les difficultés financières de Boeing ont semble-t-il empêcher l'opération d'aboutir.

III.4.2 Mitsubishi (Japon)

Le vol inaugural de l'avion régional japonais, le MRJ développé par Mitsubishi Heavy Industries (MHI) et Mitsubishi Aircraft Corporation (MJET), a été réalisé en novembre 2015 soit 3 ans après l'échéance prévisionnelle. Les premiers avions devraient sortir des chaînes d'assemblage en 2020, malheureusement la crise du Covid-19 a eu pour effet de suspendre en juin 2020 ce projet d'avion rebaptisé entretemps SpaceJet. Le SpaceJet est un projet d'avion régional qui offre une capacité de 76 sièges (version M100) à 88 sièges (M90). En janvier 2021, soit plus de 5 ans après son vol inaugural, l'avion n'a toujours pas reçu de certification ce qui a eu pour effet d'éroder son carnet de commande de 477 appareils à 300 et de passer le programme en dessous de son seuil de rentabilité.

En juin 2019, MHI a fait l'acquisition du programme d'avions régionaux CRJ de Bombardier qui comptait une quinzaine de commande à livrer courant 2020. Bombardier assemblera ces avions pour le compte du constructeur japonais.

III.4.3 Bombardier (Canada)

Le constructeur canadien Bombardier a introduit sa nouvelle gamme d'avion de transport régional « CSeries » (Série C) qui couvre la gamme de 110 sièges (CS100) à 130 sièges (CS300) à partir de juillet 2016. Alors que Bombardier ambitionnait de concurrencer les plus petits modèles d'Airbus A320 et Boeing B737, c'est finalement Airbus qui a pris le contrôle du programme de Bombardier en prenant la majorité des parts de la société. Depuis, le CSeries a été rebaptisé A220 (voir paragraphe III.3.1).

Comme évoqué ci-dessus, Bombardier a cédé à Mitsubishi son programme d'avions régionaux CRJ (*Canadair Regional Jet*) décliné dans différentes versions de 50 à 100 sièges. Par ailleurs, le programme Q Series (pour « *Quiet* ») équipé de dispositif actif de réduction de bruit et de vibration (Dash 8) a été racheté par Viking Air et rebaptisé *De Havilland Aircraft of Canada*. Cette gamme d'avion offre de 37 à 100 sièges en fonction des modèles.

L'offre de Bombardier est maintenant recentrée sur les avions d'affaires Learjet 75 Liberty, Challenger et Global couvrant des capacités de 9 à 19 sièges.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	57/158

III.4.4 Avic Commercial Aircraft Corporation (Chine)

L'exploitation commerciale du consortium aéronautique chinois COMAC a démarré avec l'avion régional ARJ21-700 (70-90 sièges) dont le développement et la production ont été confiés à la filiale Avic 1 Commercial Aircraft Corporation (ACAC). Ce premier avion a été conçu sur la base des éléments techniques du MD-90 pour lequel McDonnell Douglas avait fourni les plans avec la concession de licence pour la production de l'avion en Chine. Une seconde version ARJ21-900 (95-105 sièges) a été développée en partenariat avec le canadien Bombardier.

L'avion régional chinois est destiné à servir les besoins de liaisons aériennes intérieures chinoises qui devraient croître de 6%/an dans les 20 prochaines années.

L'ARJ21-700 a réalisé son vol inaugural en novembre 2008 et a été certifié par l'administration chinoise de l'aviation civile (CAAC) en décembre 2014. Les certifications européenne et américaine ne sont toujours pas délivrées. La première livraison prévue initialement courant 2010, est finalement intervenue en novembre 2015 à la compagnie Chengdu Airlines. Au final, l'avion a dû attendre 7 ans avant l'autorisation pour la production en série. La chaîne d'assemblage située à Pudong proche de Shanghai (voir paragraphe III.3.2) a débuté fin 2009. Il devrait être capable de produire jusqu'à une cinquantaine d'exemplaires par an de l'ARJ21-700. En mars 2020, la capacité de production de Pudong était de 30 avions/an.

En janvier 2021, l'ARJ21-700 est entré dans une phase de montée en cadence de production pour supporter l'accélération de l'exploitation commerciale. A date (février 2021), 41 exemplaires de l'avion ont été livrés à des compagnies chinoises. En octobre 2020, COMAC enregistrait une commande record de 100 avions dont au moins la moitié d'ARJ21, le reste était à répartir entre cet avion et le C919. Les prévisions de livraisons sont données dans le Tableau 11. Le lancement de la version ARJ21-900 de capacité 98 à 105 sièges n'est pas encore officiellement annoncé. Fin 2020, l'ARJ21-700 avait enregistré 596 commandes.

Fait marquant, les sièges ultralégers TiSeat E2 de la société française Expliseat équiperont les ARJ21 destinés à la compagnie chinoise OTT Airlines. Pesant 5 kg, ces sièges sont 50% plus légers que les modèles actuels grâce à l'emploi du titane et de carbone pour leur structure.

ARJ21	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021 ^e	2022 ^e	2023 ^e	2024 ^e	2025+ ^e
Avion/an	1	1	2	6	12	19	20	26	30	40	50

Tableau 11: Cadence annuelle de livraison de l'ARJ21

Par ailleurs, le constructeur brésilien Embraer avait signé une joint-venture avec le chinois Harbin Aircraft Plant (Harbin Embraer Aircraft Industry - HEAI) pour assembler en Chine des avions régionaux (ERJ-135, ERJ 140), des jets (ERJ 145 XR, Legacy 600/650) et

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	58/158

des avions de reconnaissance (EMB-145 AEW&C, EMB-145 RS/AGS). HEAI fournit Airbus en pièce composite depuis 2009.

En 2016, l'association sino-brésilienne a pris fin. La montée en puissance du constructeur chinois COMAC avec l'ARJ21 et la prochaine entrée en service du C919 devrait à court terme remettre en cause la place d'Embraer au rang de 3^{ème} producteur d'avion.

III.4.5 Programmes russes d'avions régionaux

Le marché intérieur de la CEI offre un potentiel de 380 appareils sur les 10 prochaines années pour servir une augmentation du trafic aérien évalué à +2,6%/an. Durant la crise du Covid-19, le trafic aérien intérieur russe a montré une baisse beaucoup moins marquée que dans les autres régions du monde en raison de l'absence de moyens de transport alternatifs sur de grandes distances (voir Figure 34). En CEI, la flotte actuelle est d'environ 530 avions et devrait atteindre 650 à l'horizon 2029.

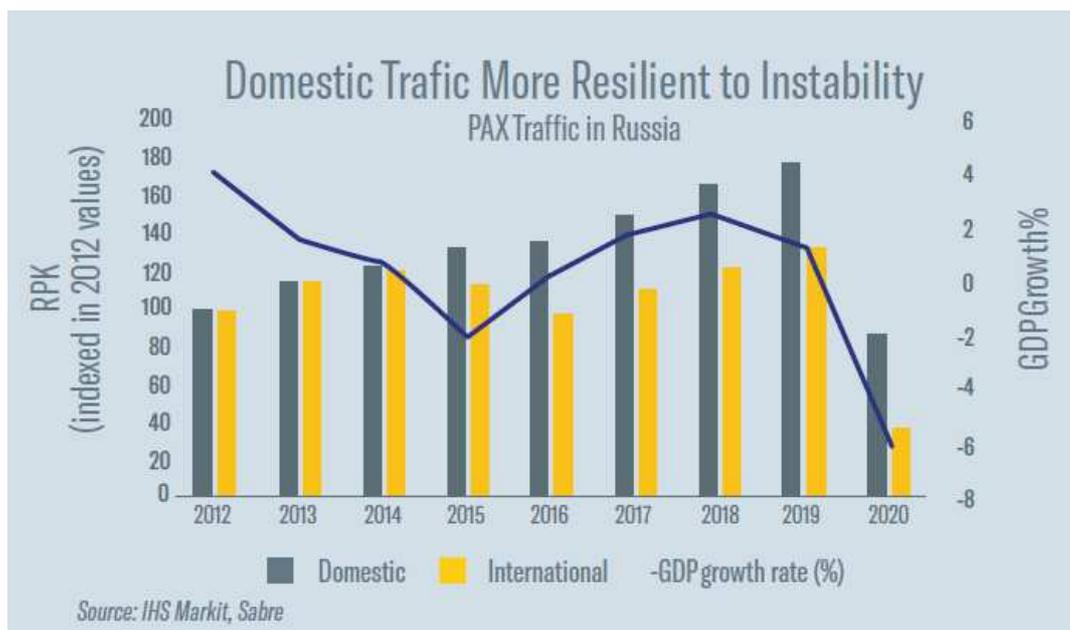


Figure 34: Evolution du trafic aérien Russie [ref.17]

La relance de l'industrie aéronautique russe sur le segment des avions régionaux concerne en particulier le Sukhoï SuperJet-100 ou SSJ100 (avion régional de 75-95 sièges aussi connu sous le nom « RRJ – Russian Regional Jet »). Cet avion a reçu 301 commandes fermes et 147 ont été livrés. Le premier vol a eu lieu en mai 2008, les livraisons ont débuté en 2010 et la mise en service en avril 2011. En 2019, un crash meurtrier et des problèmes liés à la maintenance ont terni l'image de l'avion. Cet avion était équipé jusqu'en 2019 du moteur PowerJet SaM146 développé conjointement entre le russe NPO Saturn et le français Safran. A partir de 2020, il sera remplacé par un moteur russe PD-8. Les seules commandes en vue sont celles de la compagnie russe Aeroflot pour une centaine d'avion à livrer entre 2019 et 2026.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	59/158

Les estimations de cadences annuelles de productions pour le SuperJet-100 sont de 14 avions/an.

Autre programme régional russe, l'avion turbopropulsé Ilyushin IL-114-300 destiné à remplacer la flotte d'An-24 en Russie et en CEI. La version rénovée de 52 à 68 sièges a fait son premier vol en décembre 2020. Après une mise service en 2023, la production d'une centaine d'appareils est espérée d'ici 2030 à un rythme de 14 avions/an. L'Ilyushin IL-114-300 est intégralement conçu avec des composants d'origine russe.

IV PERSPECTIVES POUR LE MARCHÉ « DEFENSE »

Le secteur défense est un marché captif pour le titane. Les volumes de consommation représentent une faible portion de la demande mondiale mais c'est un secteur stratégique pour les pays développés et pour les grands pays émergents : Chine, Inde, Brésil etc. Tous les domaines sont consommateurs : aviation, missiles, armement terrestre, naval. Les budgets de R&D militaires permettent de mettre au point des innovations au niveau des procédés de production qui profitent ensuite aux applications civiles. Du temps de la guerre froide, l'URSS possédait les plus importantes capacités de production pour satisfaire les besoins des programmes de sous-marins nucléaire d'attaque grandes profondeurs « classe Alfa » dont les coques étaient en titane.

Depuis les années 1990, les USA ont de loin été les plus gros consommateurs de titane dans le domaine de l'armement mais ils sont rattrapés par les grands pays émergents (Chine, Inde...). Ces pays constituent eux aussi un arsenal militaire en s'appuyant sur la coopération et les technologies avec les pays de l'Est, la Russie en particulier. Outre les investissements sur de nouvelles capacités opérationnelles, les pays développés doivent aussi faire face à un effort important de renouvellement des équipements en service dont la moyenne d'âge et l'emploi sont élevés. Selon l'institut de recherche SIPRI¹⁹, les dépenses militaires mondiales ont enregistré en 2019 la plus forte augmentation annuelle depuis une décennie avec 1.917 milliards de dollars.

Les USA concentrent 38% des dépenses et sont suivis par la Chine (14%), l'Inde (3,7%) et la Russie (3,4%). La consommation de titane pour ces programmes militaires est prévue en hausse jusqu'en 2023 avec un effet d'amplification dû aux mesures de soutien de l'activité industrielle pendant la crise du Covid-19. A partir de 2024, cette bulle de consommation devrait se résorber comme l'illustre la Figure 35.

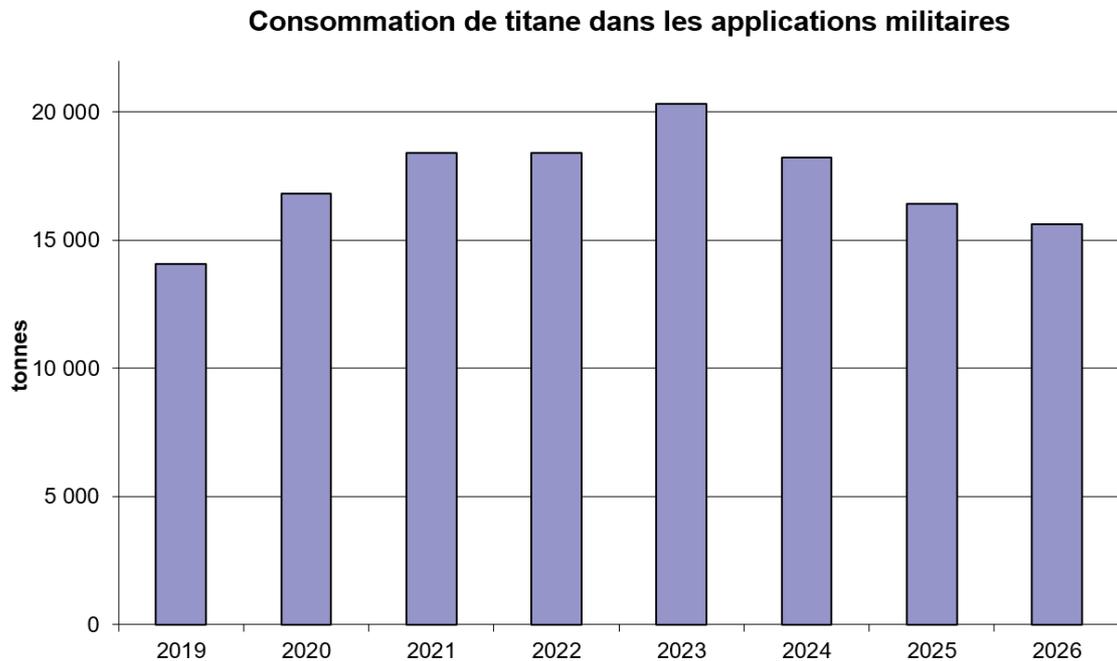


Figure 35: Évolution de la consommation de titane dans les applications militaires

IV.1 Domaine terrestre

IV.1.1 Blindages

Dans le domaine terrestre, l'utilisation du titane en tant que matériau de blindage est connue depuis les années 60 avec la réalisation d'une caisse de chenillé par l'arsenal de Detroit aux USA. Toutefois, les applications industrielles se sont réellement développées à partir des années 2000 en Europe et aux USA. Le titane est en effet un constituant efficace pour la protection des véhicules blindés face à un panel de menace assez étendu. Les tôles d'aciers à blindage ont ainsi été remplacées dans bon nombre d'applications par du titane, avec un gain en poids de l'ordre de 40%. Une norme militaire américaine²⁰ définit les classes d'alliages de titane utilisables pour une application de protection balistique.

Le titane est en général utilisé sous la forme de produit laminé pour les protections rapportées^x ou sous la forme de pièces de fonderie pour les battants, capots et tourelles. De nombreuses applications existent dans les chars d'assaut et les véhicules de combat.

L'Armée américaine a consacré des budgets importants pour équiper de surprotections en titane les véhicules engagés sur les théâtres irakiens (2011) et afghans (2015)²¹. Une illustration de ces blindages est dans la Figure 68 en annexe. Depuis, il est peu fait écho d'un emploi intensif pour la protection des véhicules qui adoptent maintenant souvent

^x Plaque de blindage amovible, en général boulonnée sur la structure

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	61/158

des solutions plus sophistiquées à base de céramiques et de composites. Le titane reste toutefois un matériau de choix pour des besoins de protection polyvalente facilement intégrable sur véhicule de combat de l'avant. En 2019 et 2020, deux programmes ont probablement consommé du titane pour la fonction de protection balistique :

- Le programme « *Modernisation du High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicles (HMMWVs)* » attribué à AM General (Indiana, USA), 739 véhicules commandés en mars 2019 ;
- Le programme « *Joint Light Tactical Vehicle (JLTV)* » représentant une commande de 8.829 véhicules avec 3.393 véhicules livrés en 2019, 2.530 pour 2020 et le reste en 2021.

En octobre 2019, une publication²² de l'Université de Caroline du Sud faisait état de travaux sur des solutions de blindages passifs mettant en œuvre des matériaux structurés de type CMF (Composite Metal Foam). Le CMF est composé de sphères titane noyées dans une matrice titane. La solution de protection est constituée d'un empilement sandwich de type : céramique /CMF titane/face arrière aluminium. L'efficacité de la solution a été évaluée face à la munition de calibre 12,7mm avec un gain en poids supérieur à 2 par rapport à la solution acier de niveau de protection équivalent.

Dans le domaine de la protection individuelle, certains concepteurs de solutions proposent des équipements utilisant du titane pour des casques et des plaques thoraciques pour gilets balistiques. Ces produits ne présentent toutefois pas la meilleure efficacité massique et sont largement surpassés par des solutions céramique/composite.

IV.1.2 Applications structurales

Les caisses de véhicule et les châssis mobiles sont également envisageables comme applications structurales. L'exemple le plus significatif est le canon aérotransportable Howitzer M777A1 de 155mm dont l'ensemble du châssis est en titane (voir Figure 69 en annexe). D'important travaux ont été menés autour des technologies de soudage, en particulier le soudage par friction (FSW^y) et le soudage hybride laser/GMAW, pour rendre possible industriellement la réalisation de grandes structures mécanosoudées. Une deuxième version ultralégère baptisée M777A2 a permis de simplifier significativement l'architecture de la structure du canon par l'emploi de grandes pièces de fonderie en titane²³. Initialement prévu pour une production de 500 exemplaires, le M777 a été commandé par 4 pays pour une quantité totale de 1001 unités. Le dernier contrat d'équipement a été signé en décembre 2016 pour équiper les forces armées indiennes de 145 exemplaires de ce canon. A partir de fin 2019, les 120 derniers canons du contrat ont commencé à sortir des chaînes de fabrication installées à Mahindra en Inde.

Les progrès dans le domaine de l'assemblage semi-automatisé des tôles en titane ont fait naître en 2003 le projet de concevoir une caisse de véhicule entièrement en titane pour le

^y Friction Stir Welding

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	62/158

compte du grand programme d'équipement des forces terrestres américaines, le « Future Combat System – FCS » (voir Figure 70 en annexe). Un tel projet pouvait potentiellement consommer de 10 à 15 tonnes de titane par véhicule, soit une consommation annuelle de plusieurs milliers de tonnes par an. Les restrictions budgétaires ont mis un coup d'arrêt au programme FCS en 2009 et les perspectives de consommation de titane associées ont disparues. L'effort de R&D est toutefois maintenu pour faire émerger de nouvelles technologies de production de titane « bas coût ».

En 2019, des travaux originaux²⁴ ont été menés pour évaluer l'intérêt du titane pour les roues de chars en remplacement de l'aluminium sur les véhicules actuellement en service et en substitution des composites carbone envisagés pour les futurs programmes américains de véhicules terrestres (M-1/M-88, M-109, AMPV, MPF, OMFV, DLP/FDL, et RCV (H)).

L'étude a démontré un gain significatif sur le coût de possession (25%), une augmentation de la durée de vie par un facteur 4 et une réduction du risque de dommage en service par rapport aux composites carbone.

En juillet 2020, le laboratoire de recherche de l'US Army (*Army Research Lab*) a annoncé le démarrage d'un projet visant à explorer le potentiel des solutions de fabrication additive pour réaliser des composants en titane à bas coût pour le compte du programme de véhicule de combat de prochaine génération (NGCV, *Next-Generation Combat Vehicle*). A la même période, l'agence anglaise pour la défense (Dstl, *Defence Science and Technology Laboratory*) a financé un consortium industriel et académique piloté par Rheinmetall BAE Systems Land pour développer de nouvelles techniques visant à recycler le titane pour fabriquer des composants militaires et des blindages.

IV.2 Aéronautique militaire

Le marché aéronautique militaire représente environ 2.100 avions (tous types confondus) à livrer dans les 5 prochaines années et plus de 3.000 dans les 10 prochaines années avec une prédominance des besoins en Asie du Sud (26%) et Asie Pacifique (25%). Les USA comptent pour 22% des besoins mondiaux et l'Europe 18%.

IV.2.1 Programmes européens

⇒ Programmes européens d'avions multirôles

Les principaux programmes militaires européens actuels d'avions multirôles^z sont le Rafale, l'Eurofighter et le Gripen.

Le Rafale a décroché des contrats à l'export en 2015 avec l'Egypte (24 avions) et le Qatar (idem) et en 2016 avec l'Inde (36 avions). Début 2021, une nouvelle commande de 18

^z Avions capables de mener différents types de mission : chasse, reconnaissance, bombardement etc.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	63/158

Rafales à la Grèce a été confirmée. Début 2021, le carnet de commande était de 80 avions. Les livraisons ont été impactées par la crise du Covid-19 avec 13 avions livrés en 2020 contre 26 en 2019. En fonction des ventes à l'export, le programme d'équipement des Forces françaises pourrait reprendre à partir de 2022 avec 28 avions à livrer sur la période 2022 – 2024 pour augmenter la dotation de 152 à 180 appareils. Les discussions sont en cours pour avancer la 5^{ième} tranche de 30 avions supplémentaires pour la période 2027 – 2035.

En novembre 2020, l'Allemagne a confirmé l'achat de 38 avions Eurofighter portant le carnet de commande 90 avions sur un volume total de 661 avions. La cadence de production est d'environ 1 avion/mois.

L'avion suédois Saab JAS 39 Gripen a été commandé à 306 exemplaires dont 204 pour la Suède. Depuis son lancement, 180 exemplaires ont été fabriqués. Les prochaines livraisons à l'export se feront début 2021 à destination du Brésil avec le premier des 36 avions commandés. La cadence de production est d'environ 2 avion/mois, répartie entre le site suédois et brésilien.

⇒ **Avions de transport A400M**

L'avion européen de transport militaire multi-mission A400M a fait son premier vol le 11 décembre 2009. Le premier exemplaire de l'avion fabriqué par Airbus a été livré à l'Armée de l'Air française en Août 2013. Sur les 174 exemplaires commandés (dont 4 pour la Malaisie), 93 avions ont été livrés fin 2020. Alors que le site d'assemblage est dimensionné pour 2 avions/mois, la cadence actuelle est d'environ 1 avions/mois et devrait le rester à moyen terme. Le marché potentiel de l'A400M vise le remplacement des avions de transport américains C-130.

⇒ **Avions ravitailleurs A330 MRTT**

Excepté l'appel d'offre du Pentagone perdu face à Boeing en 2011 pour l'acquisition de 179 avions ravitailleurs, Airbus a remporté la plupart des autres consultations internationales. Son modèle A330 MRTT dérivé de la version civile cumule 61 commandes dont 46 ont été livrées fin 2020.

IV.2.2 Programmes américains

⇒ **F35-JSF (USA)**

L'avion multi-rôle F-35 Lightning II du constructeur américain Lockheed Martin est plus connu sous le nom de « Joint Strike Fighter – JSF ». Destiné à équiper les trois composantes aériennes des forces armées américaines, ce programme a été ouvert à une large coopération internationale pour son financement et sa réalisation dans l'objectif de baisser son

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	64/158

coût global. Les quantités commandées par les USA et les pays contributeurs^{aa} sont estimées à environ 3.300 avions. Récemment, de nouvelles commandes ou intention de commande ont été enregistrées :

- En janvier 2020, la Belgique annonce son intention de commander 14 avions supplémentaires et Singapour finalise son choix en faveur du F-35 pour remplacer sa flotte vieillissante de F-16 (16 avions) ;
- En juillet 2020, le Japon ajoute 63 F-35A et 42 F635B à sa commande initiale de 105 et 42 avions respectivement ;
- En novembre 2020, la Grèce officialise une commande de 18 à 24 avions ;
- En janvier 2021, quelques jours avant l’investiture du Président Biden, les Emirats Arabes Unis commandent 50 F-35A qui seront livrés à partir de 2027.

Initialement prévu pour une mise en service en 2012 le programme a subi des retards liés à des problèmes techniques et budgétaires. Dès 2011, la production aurait dû être à cadence nominale à 200 avions/an. Elle a dépassé péniblement le cap des 100 avions/an en 2019. Cependant, malgré la crise du Covid-19, le constructeur a réussi à livrer 121 avions en 2020 sur les 141 prévus. Fin 2020, 612 avions avaient été livrés dans le monde. Le Tableau 12 donne les prévisions de montée en cadence pour les années à venir. Le besoin en titane par avion²⁵ serait de 14.5 t pour la version à décollage vertical (F35B – STOVL), 20.5 t pour la version à motorisation conventionnelle (F35 – CTOL) et 28 t pour la version marine (F35 – CV).

En janvier 2021, le Pentagone a reporté la décision de passer en cadence nominale. Les prévisions pour la période 2021 – 2023 sont de 140 livraisons/an avec un passage en production nominale à partir de 2025. En moyenne, la consommation de titane pour ce programme est estimée entre 2.500 t/an et 3.500 t/an.

	2011	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	2021-2023	≥2023
Avions/an	9	29	35	36	45	46	66	91	134	121	140	+2.688

Tableau 12: Cadences de production annuelles du F-35 (Joint Strike Fighter)

⇒ **Autres programmes aéronautiques américains**

Les principaux programmes en cours aux USA sont présentés dans le Tableau 13 ci-dessous. Pour certains programmes, les cadences sont maintenues à des niveaux faibles afin de préserver des lignes de production dans les bassins d’emploi de l’industrie de défense.

^{aa} Royaume-Uni (seul pays partenaire de 1^{er} niveau), Italie, Pays-Bas (pays de 2nd niveau), Australie, Norvège, Canada, Danemark (pays de 3^{ième} niveau), Israël, Singapour (pays associés), Turquie (pays partenaire de 3^{ième} niveau exclus sur décision de Washington en juin 2019).

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	65/158

Les retards du programme F-35 combinés à la nouvelle politique de défense voulue par le président Trump a offert des perspectives inespérées pour des programmes qui étaient en fin de vie. En juillet 2020, le Pentagone a confirmé la commande au profit de l'US Air Force de 8 avions de chasse F15 EX « *Advanced Eagle* », la version modernisée du F-15 dont la première version date de 1970. Cet avion remplacera les McDonnell Douglas F-15 Eagle version C et D actuellement en service dans l'USAF pour accompagner le déploiement du F-35. Deux versions export sont également en production, l'une pour l'Arabie-Saoudite (version F15SA) et l'autre pour le Qatar (version F-15QA, 35 exemplaires ayant servi de base pour la version modernisée EX). Le site d'assemblage de Saint Louis dans le Missouri accueille la production de l'avion à une cadence de 12 avions/an et pourra si besoin être augmentée jusqu'à 36 avions/an. Outre les 8 premiers avions commandés en juillet 2020, 72 avions sont prévus d'ici 2025 et 144 envisagés.

Autre programme en fin de carrière ayant retrouvé de l'intérêt pour le Pentagone et à l'export : le F/A-18E/F Super Hornet. Alors que Boeing devait cesser sa production en 2017, l'US Navy a passé commande en 2019 de 78 exemplaires du Super Hornet dans sa version « Block III » pour anticiper un service opérationnel étendu jusqu'en 2040. Les deux premiers avions ont été livrés en juin 2020. Boeing estime que les besoins de la Navy pourraient dépasser au total 150 avions.

La production de F-16 hébergée dans la nouvelle ligne de production à Greenville en Caroline du Sud de Lockheed Martin alimentera le carnet de commande qui comptait environ 130 exemplaires fin 2020. La dernière commande à l'export était de 8 avions par la Bulgarie en avril 2020. A pleine cadence, la ligne peut produire 4 avions/mois mais elle sera plus probablement de 2 avions/mois maximum pour étaler les livraisons du carnet de commande actuel jusqu'en 2025.

L'avion de transport militaire Lockheed C-130 Hercules conçu au début des années 1950 est toujours en production à Marietta, Géorgie. Une nouvelle commande de 50 exemplaires de la version C-130J Super Hercules a été passée par le gouvernement américain en décembre 2019 dans le cadre d'un contrat de renouvellement sans limite de quantités accordé au constructeur Lockheed Martin en août 2016. Les livraisons sont prévues entre 2021 et 2025 à un rythme de 1 avion/mois.

Concernant le programme américain d'avions ravitailleurs, Boeing a pris du retard pour la livraison de son modèle KC-46A Pegasus dérivé du B767. Le premier avion livré en janvier 2019 à l'US Air Force a été retoqué à deux reprises et finalement la décision a été prise en juin 2020 de retarder la date de la production en série jusqu'à la fin de l'exercice 2024, le temps que Boeing corrige les défauts de l'avion. A l'export, l'avion a été livré en 38 exemplaires sur un total de 179 avions commandés. La cadence nominale de production devrait être à terme de 15 avions/an jusqu'en 2030²⁶.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	66/158

Programme	Type	Titane/avion (tonnes)	Cadence de production
F/A – 18E/F Super Hornet	Multirôle	17-18	Production relancée à 2 avions/an en 2019 puis potentiellement 4 avions/an
F-15	Chasse	24	Production relancée en 2020 en version F-15EX, 35 avions F-15QA pour le Qatar à partir de 2021
F-16	Multirôle	9	Cadence de 2 à 4 avion/mois
C-130	Transport	35	Cadence d'1 avion/mois jusqu'en 2025

Tableau 13: Principaux programmes aéronautiques militaires aux USA

⇒ Programmes futurs

Parmi les futurs programmes aéronautiques militaires américains consommateurs potentiels de titane, on peut citer le bombardier stratégique Northrop Grumman B-21 Raider prévu pour une mise en service en 2025 bénéficiant d'un carnet de commande estimé à 100 exemplaires. Le programme fédérateur *Next Generation Air Dominance* (NGAD) prévoit également un démonstrateur d'un nouveau système de combat aérien ainsi que des drones furtifs.

IV.2.3 Programmes russes

L'industrie militaire russe produit annuellement une centaine d'avions dont le plus grand nombre est issu du constructeur Soukhoï. Il fabrique l'avion de combat multirôle Su-30 (depuis 1996, 630 avions), le bombardier tactique Su-34 (plus de 100 avions depuis 2013), l'avion de chasse multirôle Su-35 (102 avions depuis 2012) et le dernier avion de combat polyvalent de 5^{ème} génération Su-57 entré en service en décembre 2020.

Dérivé du Su-27, le Su-30 a été fabriqué à environ 630 exemplaires équipant les Forces russes et de nombreuses armées étrangères. En juillet 2020, l'Inde a indiqué son intention d'acquérir 12 avions supplémentaires à sa dotation actuelle de 350 Su-30. L'avion est également fabriqué sous licence en Inde par le groupe aéronautique *Hindustan Aeronautics Limited* (HAL) dans une version baptisée Sukhoï Su-30MKI (272 exemplaires). La Chine est le second plus grand client du Su-30 avec 97 Su-30MKK en opération, puis la Malaisie avec 18 avions en version Su-30MKM. La Chine envisagerait d'acquérir 73 Su30-MKK et 24 Su30-MK2 entre 2021 et 2028. Enfin, en août 2020, l'Arménie annonçait sa volonté de compléter sa commande de Su-30SM à la Russie par 8 nouveaux appareils en complément des 4 réceptionnés en décembre 2019. En raison de son succès à l'export, le Su-30 devrait donc rester en production jusque dans les années 2030.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	67/158

Le bombardier tactique Su-34 a été fabriqué à 130 exemplaires pour les Forces russe dans le cadre d'un contrat long terme se terminant en 2020. Une nouvelle commande du gouvernement russe porterait sur 76 appareils à livrer entre 2021 et 2027. A l'export, une commande de 14 avions a été passée en décembre 2019 par l'Algérie qui en possède déjà 12 en opération.

En mai 2020, l'Egypte aurait passé commande de 26 chasseurs lourds de type Su-35 à la Russie. Cette commande à l'export vient en plus du contrat de 12 appareils passé par le gouvernement russe en août 2020.

Le Su-57 est le dernier né de la catégorie des avions de combat polyvalents russes de 5^{ème} génération. Fabriqué à 12 exemplaires pour l'instant, 76 exemplaires de cet avion doivent être livrés aux Forces russes à l'horizon 2028, soit une cadence de production d'environ 10 avions/an.

Du côté des avions de chasse MiG, la Russie a confirmé en mai 2020 la livraison de MiG-29SM à la Syrie et en juillet 2020 l'Inde a confirmé la commande Inde de 21 MiG-29. Le MiG-35 mis en service en 2019, bénéficie d'un carnet de commande estimé à une trentaine d'appareils pour l'armée russe. Il intéresse à l'export les pays qui possèdent déjà des MiG-29 tels que l'Inde, la Malaisie, la Corée du Nord, la Biélorussie, l'Egypte et l'Iran.

La production russe d'avions militaires compte également des avions comme l'Ilyushin Il-476, une version modernisée de l'avion de transport Il-76, et l'Ilyushin Il-112V, un avion-cargo. La première livraison aux forces russes de l'Il-476 a été réalisée en décembre 2015 et se poursuit à un rythme très ralenti quant à l'Il-112V la livraison des 2 premiers appareils est attendue en 2023. Cet avion doit remplacer la flotte d'Antonov An-24 et An-26 à l'horizon 2030 ce qui représente un besoin de 150 appareils à minima. Une première commande de 62 Il-112V serait à l'étude. L'avion devrait également intéresser des clients à l'export. La ligne d'assemblage aurait une capacité de 15 avions/an.

IV.2.4 Programmes chinois

Une grande discrétion entoure les programmes militaires en Chine, en particulier dans le domaine aéronautique. L'Armée de l'air chinoise compterait plus de 5.200 appareils dont 3.000 chasseurs, bombardiers et avions d'attaque. En plus des avions fabriqués sous licence (principalement russes), la Chine développe également ses propres programmes militaires d'avions de transport et de combat multirôles. Parmi les plus importants actuellement en service, citons l'avion de combat Chengdu J-7 fabriqué à 390 exemplaires sous licence MiG-21, l'avion de combat multirôle Chengdu J-10 (468 exemplaires), le Shenyang J-11 (346 exemplaires) sous licence Su-27SK etc.

En mars 2017, la Chine a mis officiellement en service son avion de chasse furtif de 5^{ème} génération, le Chengdu J-20 développé par *Chengdu Aircraft Corporation*. L'avion était équipé jusqu'en mi-2019 des moteurs russes AL-31F qui ont été remplacés depuis lors par des

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	68/158

moteurs chinois WS-10 Taihang. Le J-20 aurait été produit à un rythme de 3 avions/mois entre 2018 et 2020 sur un effectif total de 100 exemplaires.

Quelques mois plus tard en juillet 2017, le premier exemplaire de l'avion de transport Xian Y-20 développé par *Xi'an Aircraft Industrial Corporation* sur une base Antonov est entré en service opérationnel. Cet avion serait construit en 40 exemplaires à un rythme de 9 avions/an.

Les versions les plus récentes de ces avions intègrent de plus en plus de technologies chinoises. La consommation de titane associée aux parties structurales et aux moteurs est de plus en plus significative mais n'est pas officiellement publiée. Une partie de la consommation doit être comptabilisée en partie dans les chiffres à l'export de la Russie.

IV.3 Domaine naval militaire

Le titane est un matériau de choix pour les applications navales militaires en raison de ses caractéristiques mécaniques élevées, ses propriétés amagnétiques, son bon comportement à l'érosion en milieu hydrodynamique et son excellente résistance à la corrosion en milieu marin. Les nuances les plus utilisées sont les titanes faiblement alliés et alliages biphasés tels que le TA6V et le Ti5111. Ils peuvent être utilisés dans les échangeurs thermiques, la propulsion, les blindages de zones sensibles (chaufferies, soutes) et les coques de sous-marins. Les principaux freins à son utilisation sont liés à son coût élevé et aux limitations inhérentes à sa mise en œuvre : soudage, coefficient de frottement médiocre et sensibilité à l'effet d'entaille et au phénomène de rupture différée^{bb}.

Les russes ont mené dans le passé^{cc} de grands programmes d'armement pour les sous-marins d'attaque grande profondeur et les augmentations significatives de la consommation de titane dans le secteur naval (voir section II.2) ces dernières années laissent penser que ce pays a encore des projets dans ce domaine en particulier pour répondre à des besoins à l'export. D'autres projets, dans le domaine off-shore, semblent également se développer dans le cadre du partenariat technologique entre la Russie et l'Inde.

Selon le modèle et le nombre de sous-marins fabriqués, ce type de projet pourrait consommer plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers de tonnes de titane. En effet, dans le cas des sous-marins « grande profondeur » la coque de l'engin est entièrement en titane. Actuellement, les programmes européens et américains ne concernent pas les applications « coque titane ».

^{bb} Fissuration dans certaines pièces soudées à des niveaux inférieurs à la charge critique.

^{cc} Sous-marins russes d'attaque ALFA (1972) et SIERRA II (1990)

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	69/158

V PERSPECTIVES POUR LES APPLICATIONS INDUSTRIELLES

Le secteur « applications industrielles » couvre toutes les utilisations du titane dans les domaines de la construction et de l'entretien d'équipement pour la production, la transformation et le transport de ressources : les centrales thermiques (production d'électricité), la chimie, la pétrochimie, le gaz naturel, le dessalement d'eau de mer, les énergies de la mer etc.

La consommation annuelle de titane pour ce secteur est, depuis l'émergence de la Chine et le développement du Moyen-Orient, comparable en volume au secteur aéronautique. La crise des *sub-primes* de 2008 a provoqué une forte baisse de la demande 2009 car elle a directement impacté les sources de financement des grands projets industriels d'équipement. En 2019, les effets de cette crise à peine résorbés, la pandémie de Covid-19 née en Chine a initié un nouveau cycle de baisse de la demande, tous secteurs industriels confondus.

Pourtant, dans chaque segment de ce marché, les besoins à moyen et long terme sont clairement identifiés et représentent des volumes importants. Par exemple, entre 2010 et 2016, la consommation a été tirée par trois super-projets dans le domaine du dessalement nécessitant chacun entre 2.500 et 6.000 t de titane.

Contrairement à l'aéronautique qui est régulée par des cadences de production, le secteur industriel peut présenter des variations brusques de la demande dès lors que la décision d'investissement est prise (achat spot). Lorsque le projet est confirmé, l'approvisionnement en titane se fait par l'intermédiaire de macro-commandes qui peuvent concerner quelques centaines de tonnes à plusieurs milliers de tonnes de titane. Par essence, on voit que les applications industrielles ont potentiellement la capacité de déstabiliser l'équilibre offre-demande de l'ensemble du marché. La figure ci-dessous présente une synthèse de la consommation de titane dans ce secteur.

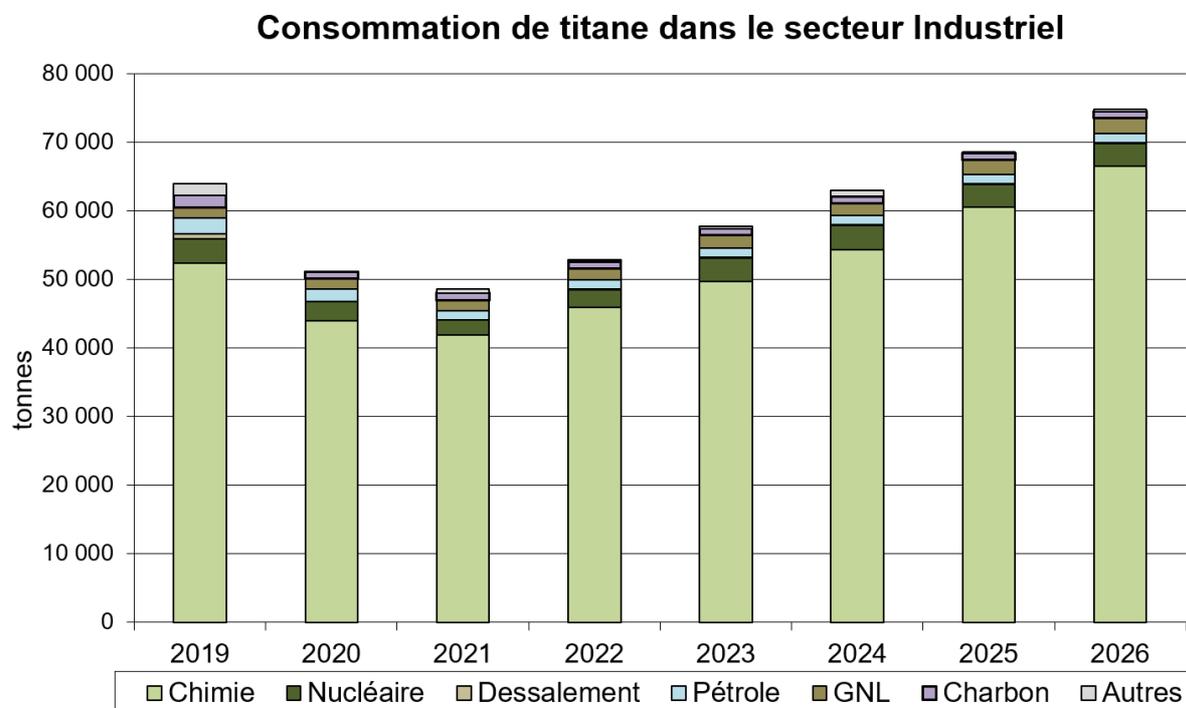


Figure 36: Consommation de titane dans le secteur « Industrie »

V.1 Besoin en énergie

Les projections concernant les besoins en énergie sont profondément remises en cause par les conséquences économiques et sociétales de la pandémie de Covid-19. Aux effets immédiats des restrictions liées aux déplacements des personnes se sont ajoutés ceux, à plus long terme, liés aux enjeux politiques en faveur d'un calendrier accéléré vers la transition énergétique.

Un mois avant la crise sanitaire, les projections à 20 ans²⁷ des besoins énergétiques mondiaux prévoyaient une augmentation globale de l'ordre de +20% avec une demande en électricité en hausse de +60% pour répondre aux besoins croissants dans de nombreux domaines : transports, habitat, industrie 4.0 etc. Près de la moitié de la demande énergétique mondiale est liée aux activités industrielles en particulier dans la construction de bâtiments et d'infrastructures et un quart à celui des transports. Les objectifs de réduction des gaz à effets de serre basés sur l'accord de Paris²⁸ privilégiaient alors le scénario²⁹ d'augmentation du réchauffement climatique de +2°C en 2040 malheureusement mis à mal par la demande en énergie fossile (pétrole, gaz...) en prévision à la hausse de +25% à l'horizon 2040, soit encore plus de la moitié des besoins énergétiques mondiaux.

Selon les études phylogénétiques, le premier patient atteint du coronavirus a été diagnostiqué fin novembre 2019. Quelques mois plus tard, la pandémie s'est propagée dans le monde provoquant une crise sanitaire mondiale avec un impact économique sans précédent

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	71/158

depuis la révolution industrielle. Associé au réchauffement climatique, le Covid-19 a remis en perspective les politiques en faveur d'une transition accélérée vers les énergies propres. Selon l'Agence Internationale de l'Energie³⁰ (IEA), la crise sanitaire a provoqué en 2020 une baisse, somme toute, modeste de la demande énergétique mondiale de l'ordre de -5%. Les consommations de pétrole, de charbon et de gaz naturel ont diminué respectivement de -8%, -7% et -3% alors que la demande en électricité n'a baissé que de -2% avec une contribution de plus en plus importante des énergies renouvelables.

Au moment où ce rapport est publié, les incertitudes concernant les choix politiques à venir débouchent sur plusieurs scénarii d'évolution de la demande énergétique envisagée par l'IEA [ref.30] et présentés ci-dessous :

- Le scénario STEPS (*Stated Policies Scenario*) qui prévoit un contrôle progressif du Covid-19 dans le courant de l'année 2021 et un rebond des conditions économiques la même année. Ce scénario est le scénario de référence auquel sont associées les intentions politiques et les objectifs publics d'atteindre la neutralité carbone en 2070 ;
- Le scénario DRS (*Delayed Recovery Scenario*) qui adopte les mêmes intentions et objectifs politiques que le scénario STEPS mais dans un contexte où le contrôle de la pandémie est plus tardif avec un retour aux conditions économiques pré-Covid19 qu'en 2023. Dans ce scénario, la crise inaugure une décennie avec le taux de croissance de la demande en énergie le plus bas depuis les années 1930 ;
- Le scénario SDS (*Sustainable Development Scenario*) qui marque un changement dans les politiques en faveur d'une transition accélérée vers les énergies propres. Les investissements soutiennent, entre-autres, les objectifs de l'accord de Paris [ref.28] ;
- Le nouveau scénario NZE2050 (*Net Zero Emission by 2050*) de l'IEA qui dérive du scénario SDS avec un objectif plus ambitieux de neutralité carbone dès 2050.

Ainsi, l'ombre de la pandémie se profile dans tous les scénarii avec des hypothèses de retour de la demande énergétique au niveau de 2019 (pré-Covid19) en 2023 pour le STEPS et 2025 pour le DRS. Avant la crise, les prévisions énergétiques à mi-parcours (10 ans) anticipaient une hausse de +12% entre 2019 et 2030, elle est maintenant de +9% pour le STEPS et seulement +4% pour le RDS. La situation est contrastée entre les pays développés qui sont engagés dans une tendance baissière de la consommation grâce à une approche plus économe de l'énergie et les pays émergents dont les besoins sont croissants. Le produit intérieur brut (PIB) annuel moyen pré-Covid19 pour la période 2019-2030 a été révisé à la baisse de +3,6%/an à +3%/an pour le STEPS et 2,2%/an pour le DRS. En 2020, les investissements dans le secteur de l'énergie ont chuté de -18% en raison des incertitudes liées aux décisions politiques vis-à-vis de la transition énergétique.

Le NZE2050, le scénario le plus agressif envisagé par l'IEA suppose que des décisions politiques additionnelles décisives soient prises dans les 10 années à venir. Réduire d'environ 40% les émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2030 implique que les sources d'énergie les moins polluantes alimentent 75% de besoins électriques mondiaux (contre moins de 40% actuellement) et que la moitié des automobiles soient électriques (contre seulement 2,5% actuellement). Outre l'évolution des habitudes de consommation, l'accélération de l'électrification des moyens de transport et les gains en économies d'énergie, le NZE2050 nécessite également des progrès significatifs au niveau des technologies dans des secteurs à fort potentiel comme les piles à hydrogène ou les petits réacteurs nucléaires modulaires (SMR). Les figures ci-dessous donnent les prévisions d'évolution de la consommation des différentes sources d'énergie à l'horizon 2040³¹ et 2050³².

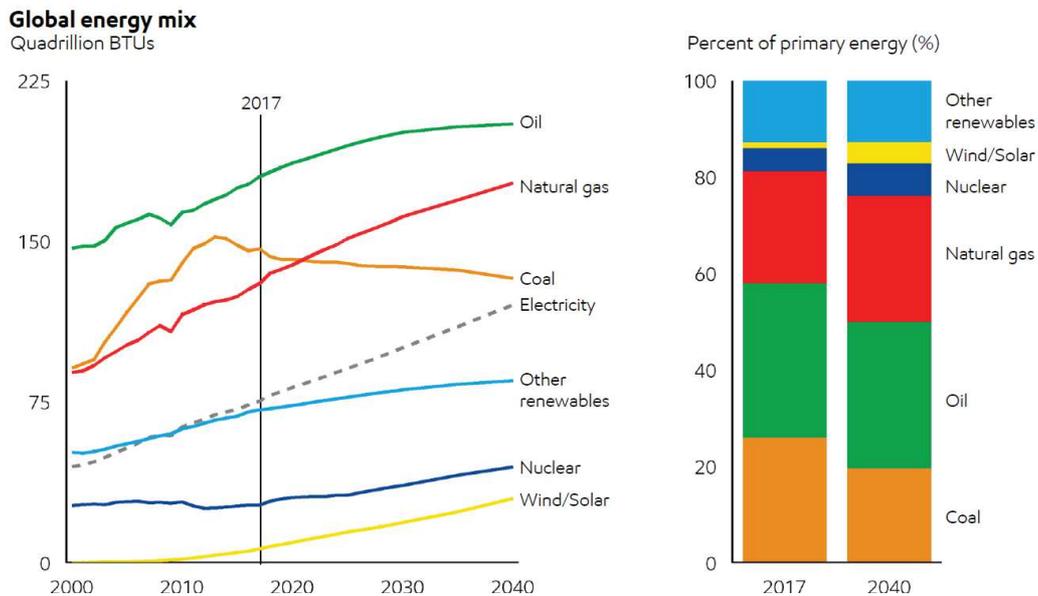
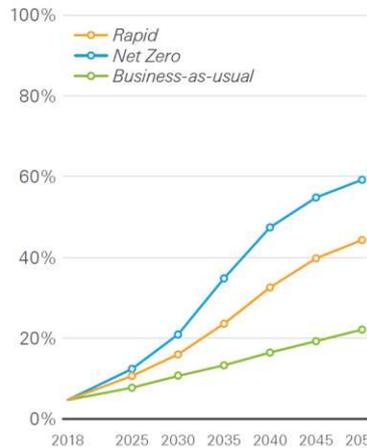


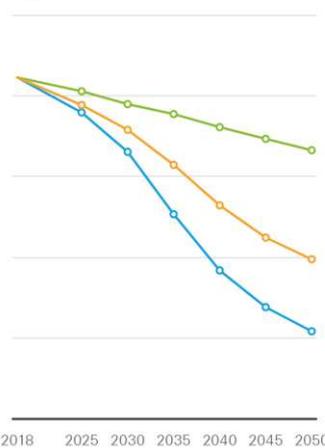
Figure 37: Evolution du mix énergétique à l'horizon 2040 selon ExxonMobil [ref. 31]

Shares of primary energy

Renewables



Hydrocarbons



Primary energy consumption by source

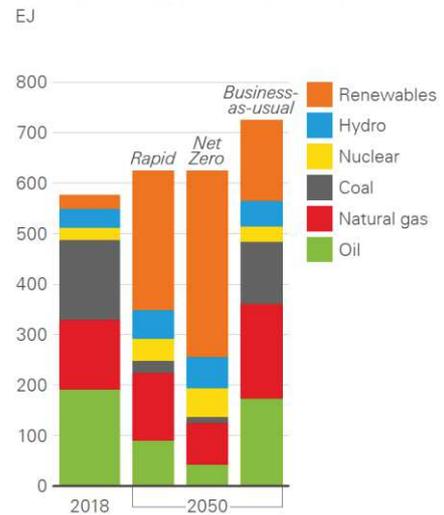


Figure 38: Evolution du mix énergétique à l’horizon 2050 selon BP [ref. 32]

Shares of primary energy in Rapid

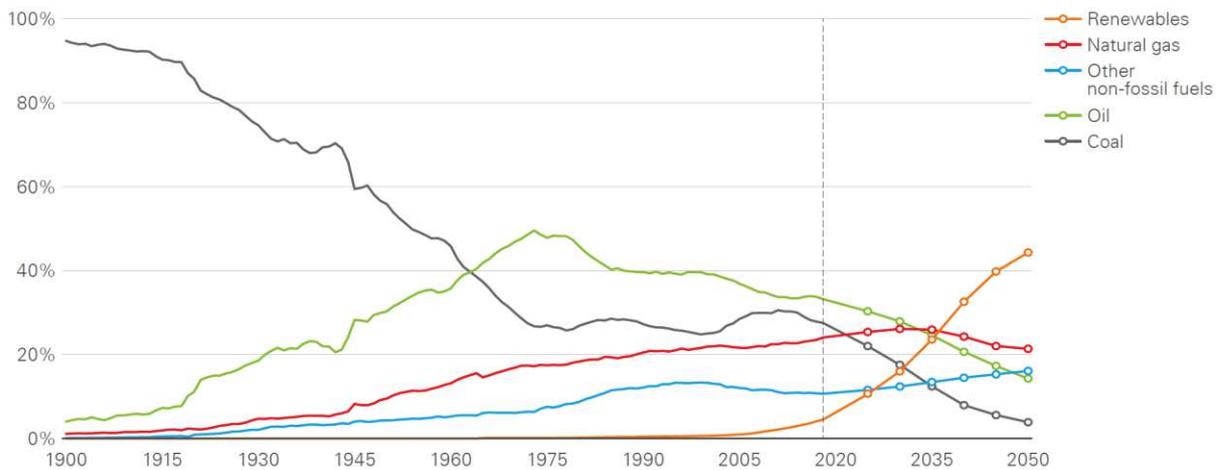


Figure 39: Evolution du mix énergétique dans le scénario Rapid de BP [ref. 32]

Les trois scénarii envisagés par BP sont :

- Le scénario « Rapid » qui anticipe une transition accélérée vers la neutralité carbone proche du scénario SDS de l’IEA ;
- Le scénario « Net Zero » proche du NZE2050 ;
- Le scénario « BAU - Business As Usual » qui s’inscrit dans la continuité des attitudes actuelles de consommation des énergies.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	74/158

V.1.1 Pétrole et autres carburants liquides

Le pétrole est la première source d'énergie primaire avec 33,1% de la consommation mondiale en 2019³³. Pourtant le temps de la croissance de la demande est programmé pour se terminer dans une échéance inférieure à 10 ans selon l'IEA [ref.30]. Pour les deux scénarii STEPS et DRS, la consommation est supposée atteindre un plateau au cours des années 2030. Plus les effets du Covid-19 sur la vie au quotidien se prolongent et plus les nouvelles pratiques comme le télétravail et les visioconférences marginalisent les déplacements consommateurs de carburants (voiture, avion, bateau...). Néanmoins, l'absence de décisions politiques fortes ne permet pas d'anticiper un rapide déclin de la demande en pétrole. Les économies qui pourraient être réalisées dans les pays développés grâce aux transports publics et aux véhicules électriques sont contrebalancées par la croissance de la demande dans les pays émergents. Au final, la consommation de carburant atteint un plateau dans les scénarii STEPS et DRS à l'horizon 2040 et ne retrouve le niveau de consommation de 2019 qu'en 2023 et 2027 respectivement. Le scénario SDS qui suppose un engagement conforme à l'accord de Paris anticipe une décroissance de la demande dès 2022.

Un fait marquant de la crise du Covid-19 est la chute de près d'un tiers des investissements dans l'exploitation pétrolière entre 2019 et 2020. Outre les risques associés à la rentabilité financière des exploitations dans un contexte d'une offre surcapacitaire, les enjeux environnementaux de plus en plus plébiscité par l'opinion publique pèsent également dans les critères d'investissement.

Comparé à la vision pré-Covid19, les projections de consommation de pétrole à l'horizon 2040 ont baissé de -23% dans le scénario STEPS et de -47% dans le SDS [ref.30].

Une des grandes incertitudes qui pèse sur les scénarii d'évolution de la consommation de pétrole est l'équilibre offre-demande avec en particulier l'entente entre pays producteurs pour réguler les volumes pour soutenir les prix. L'année 2020 a été marquée par l'effondrement du prix du baril causé par les restrictions drastiques sur les transports imposées par le confinement des populations. A court terme, un rebond de la consommation est attendu en 2021 avec la levée des restrictions mais ce sont les conséquences à moyen terme de la transition énergétique pèsent sur l'avenir de la demande en pétrole. De plus en plus d'Etats pétroliers veulent maximiser leur production dans les années à venir de peur que leurs actifs financiers ne se déprécient^{dd}. Ainsi, en annonçant une hausse de leur production de moitié d'ici à 2030, les Emirats réduiraient mécaniquement la durée de vie de leurs réserves de pétrole de 90 ans à 50 ans. Ces dernières années, l'augmentation du prix du pétrole a amélioré le seuil de rentabilité de l'exploitation de ressources non conventionnelles comme les sables et schistes bitumineux, les pétroles lourds etc. L'activité s'est particulièrement développée aux USA mais la crise du Covid-19 a obligé de nombreux exploitants de pétrole de schiste à cesser leurs investissements. Contrairement aux pratiques adoptées jusque-là par les actionnaires des compagnies pétrolières,

^{dd} Actifs irrécupérables ou actifs échoués : actifs ayant subi des dépréciations, des dévaluations ou des conversions au passif imprévues, ici en raison des choix politiques en faveur de la transition écologique. On parle de « *Climate-related asset stranding* »

le niveau acceptable du risque financier basé sur une croissance future a considérablement diminué avec la transition énergétique. Selon les analystes, le schiste américain reviendrait massivement sur le marché au-delà 55 dollars le cours du Brent.

Les figures ci-dessous illustrent les différents scénarii d'évolution du prix du pétrole à l'horizon 2050 selon l'US Energy Information Administration³⁴ et l'impact du prix sur la production de pétrole et de gaz de schiste aux USA. La dernière figure donne les prévisions d'évolution de la demande en pétrole au niveau mondial en fonction des scénarii envisagés par BP [ref.32]

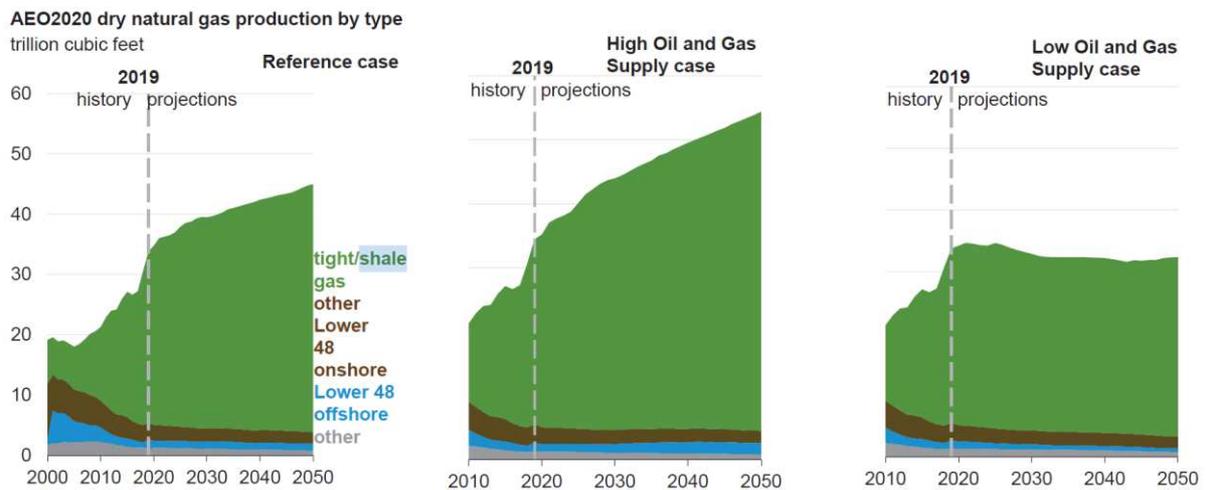


Figure 40: Evolution de la production de pétrole et gaz de schiste aux USA [ref.34]

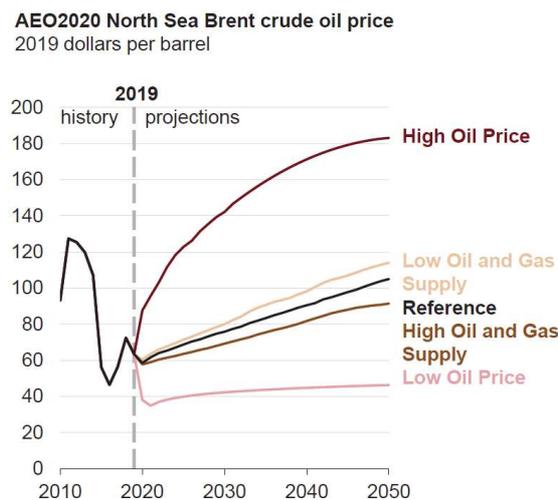


Figure 41: Evolution du prix du baril de pétrole (cours du Brent) [ref.34]

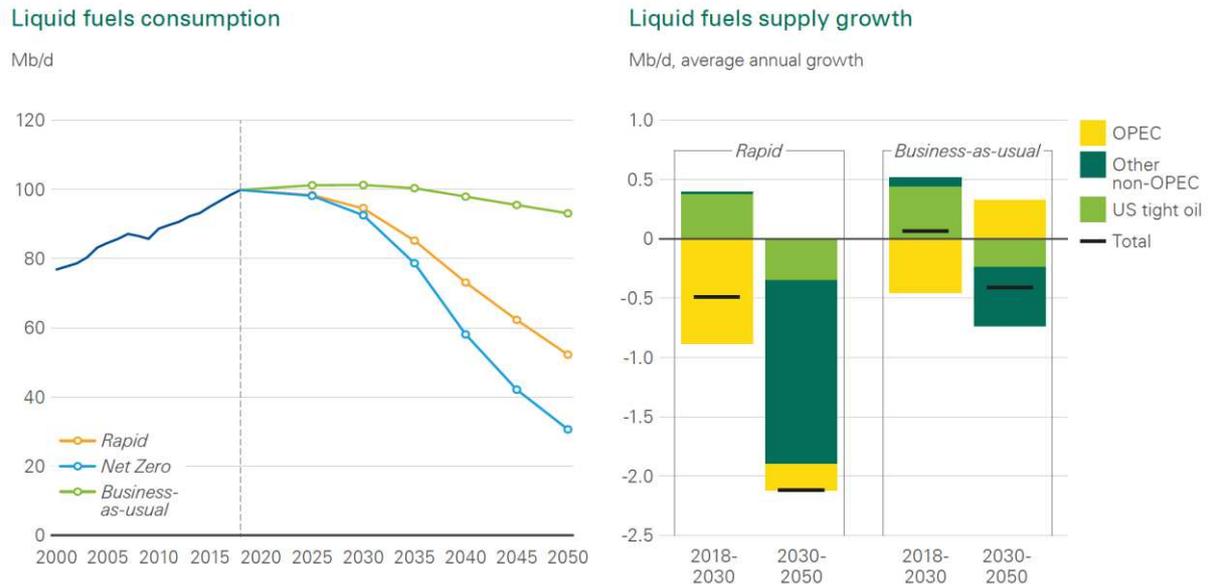


Figure 42: Evolution de la consommation de pétrole selon BP [ref.32]

Les ressources pétrolifères à exploiter impliquent des technologies d'extraction de plus en plus extrêmes où le titane trouve sa place en raison de ses performances mécaniques élevées (résistance, fatigue), son bon comportement à la corrosion comme à l'érosion par cavitation et sa faible densité. Parmi les applications, on retrouve les pipelines et les risers^{ee} pour les exploitations en eaux profondes, les plates-formes de forages semi-submersibles³⁵, les raccords avec les têtes de puits immergées etc.

La crise du Covid-19 a plutôt tendance à orienter à la baisse la consommation de titane en raison des orientations politiques en défaveur des énergies carbonées.

V.1.2 Gaz naturel (dont GNL)

La consommation en gaz naturel et gaz naturel liquéfié (GNL ou LNG en anglais) a été marquée par une forte croissance ces dernières années car cette ressource est disponible, elle génère moins d'émission polluante à la combustion que le pétrole ou le charbon et elle reste souple d'emploi pour les besoins industriels. Néanmoins, cette ressource naturelle primaire est, elle aussi, touchée par la transition énergétique. Son emploi et les investissements associés seront de plus en plus challengés par les énergies plus propres et renouvelables, en particulier dans les pays développés. C'est moins le cas dans les pays émergents.

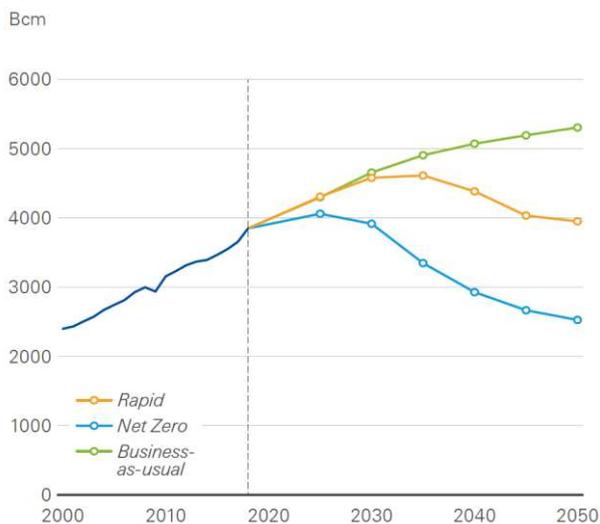
Comparées à la vision pré-Covid19 de l'IEA, les prévisions de consommation de gaz à l'horizon 2040 ont baissé de -17% dans le scénario STEPS et de -67% dans le SDS [ref.30]. Cette tendance globale est contrastée en fonction des régions du monde. Dans le STEPS, la demande en gaz est en croissance de +30% à l'horizon 2040 en Chine et en Asie du Sud-Est

^{ee} Conduite utilisée pour relier le fond de la mer avec une plate-forme pétrolière.

(ASEAN) en raison des priorités politiques dans ces régions en faveur de la qualité de l'air et du soutien à l'activité industrielle manufacturière. Des investissements importants en infrastructure gazière sont attendus dans cette partie du monde pour l'acheminement du gaz.

La figure ci-dessous donne l'évolution de la production de gaz (donnée en Bcm : milliard de m³) en fonction des 3 scénarii de BP. La relative attractivité du gaz par rapport au pétrole et au charbon explique la croissance jusqu'en 2035 dans le scénario Rapid et encore au-delà dans le BAU – *Business As Usual*.

Gas consumption



Gas production growth by region

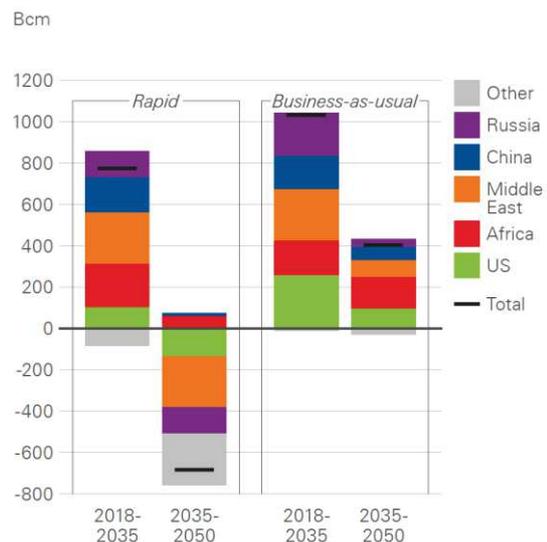


Figure 43: Evolution de la consommation de gaz selon BP [ref.32]

Quel que soit le scénario, les augmentations de capacité de production de gaz sont localisées aux USA, en Russie et en Afrique. Le déclin de celles situées en Europe et dans le reste de l'Asie pourraient ne pas être suffisantes pour éviter une situation de surproduction de GNL à l'horizon 2025. Ces incertitudes sur l'équilibre offre/demande pourraient remettre en cause une partie de la centaine de projet GNL dans le monde.

La Figure 44 illustrent les principales voies d'approvisionnement en gaz et GNL dans le monde. L'acheminement du gaz pour les distances inférieures à 3.200 kms se fait préférentiellement par pipeline. Au-delà, il est préférable de condenser le gaz à l'état liquide. Le GNL peut alors être transporté sur de longues distances avec la mise en place de véritables chaînes d'approvisionnement : puits producteurs, usines de traitement, réseaux de gazoducs, usines de liquéfaction, terminaux de chargement des méthaniers, terminaux d'importation et de stockage, usines de regazéification et de réinjection au réseau. Le GNL étant stocké et transporté à basse température (-163 °C), le bon comportement cryogénique du titane est mis à profit dans la conception des méthaniers et des usines de traitement.

Accompagnant la croissance de la demande en GNL, l’approvisionnement en gaz naturel par pipeline se développe avec la mise en service de nouvelles lignes sur de longues distances. Actuellement, les principales infrastructures de pipeline sont sur le continent Eurasien et en Amérique du Nord.

Selon l’association Internationale du Gas³⁶, la quantité de gaz consommé a augmenté en 2019 de +13% avec un volume de 355 millions de tonnes. La Chine est le second plus grand importateur derrière le Japon qu’il devrait dépasser dans les prochaines années. Environ 42,5 millions de tonnes/an (MTPA) de capacités supplémentaires de liquéfaction sont rentrées en production en 2019 sur un total disponible de 430,5 MTPA, 70,8 MTPA sont prévus sur 2020/2021 et 907,4 MTPA sont en projet d’investissement. Ils répondent aux projections de croissance de la demande en LNG³⁷ entre pays producteurs et pays importateurs listés dans la Figure 45.

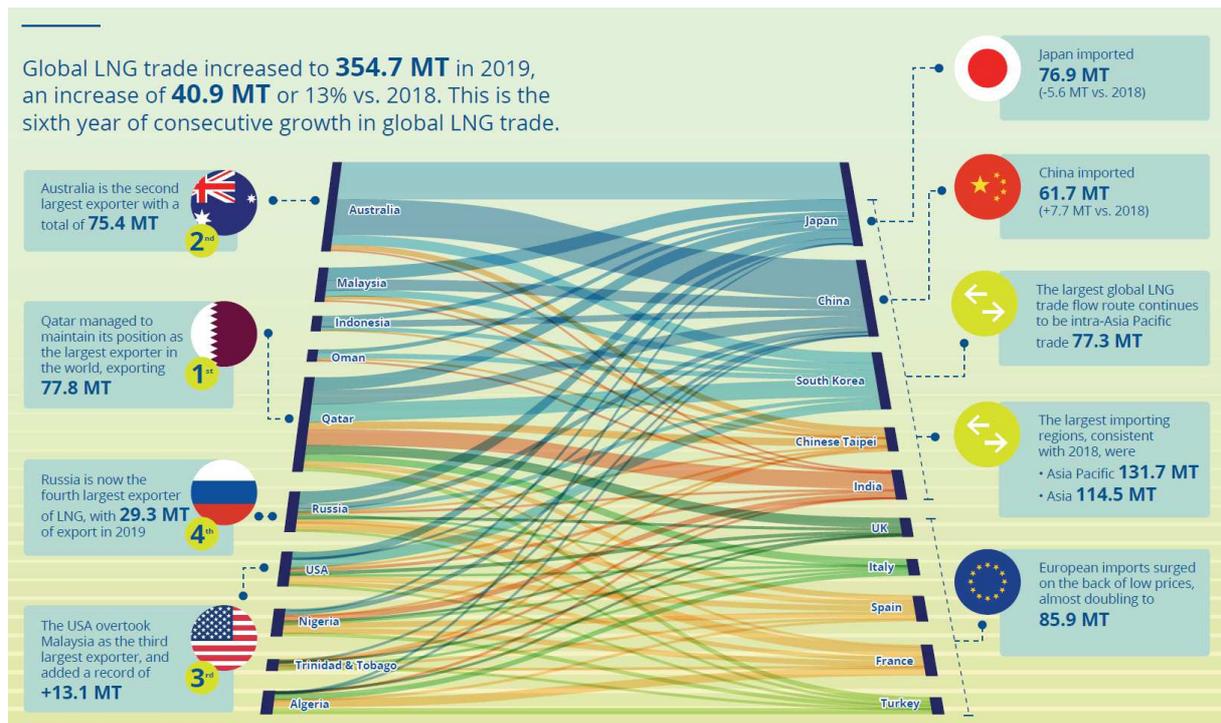


Figure 44: Principaux flux d’approvisionnement en gaz et GNL dans le monde (en milliards de m²) [ref.36]

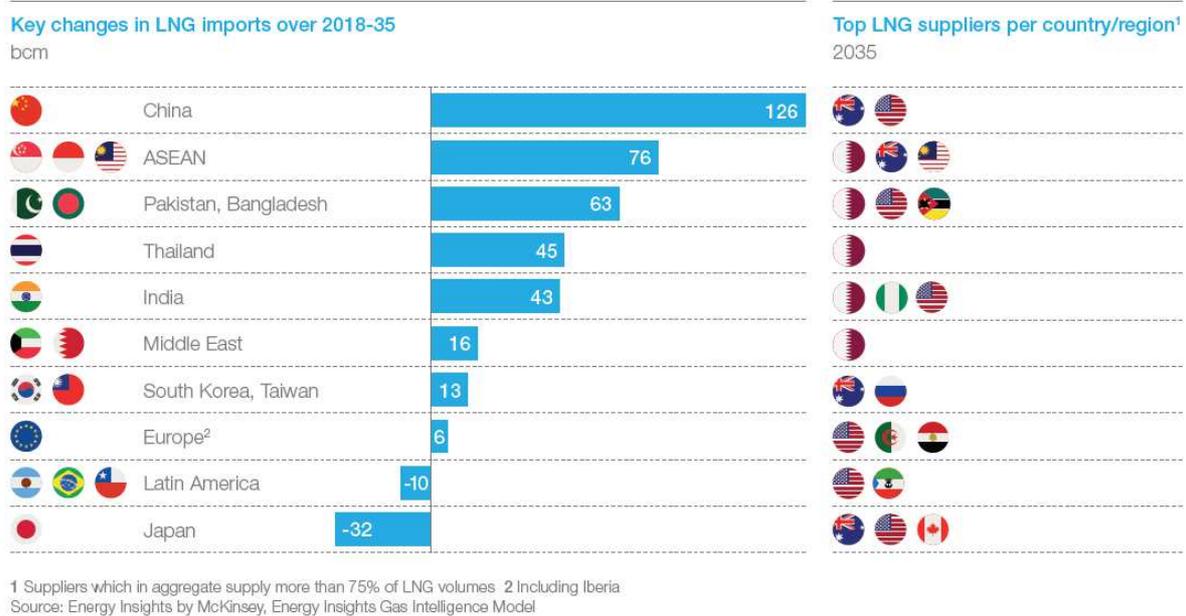


Figure 45: Producteurs et pays importateurs de GNL à l'horizon 2035 [ref.37]

V.1.3 Nucléaire

Les projets de développement de l'industrie du nucléaire ont été ralentis par la catastrophe de Fukushima au Japon en mars 2011. Certains pays ont, à cette époque, pris la décision de fermer les centrales les plus anciennes et d'accélérer le développement des énergies renouvelables. En 2014, cette orientation a été remise en cause sous la pression des besoins énergétiques et celle de l'impact environnemental des centrales à charbon. Au final, la production d'électricité d'origine nucléaire n'a cessé d'augmenter depuis 2012. Elle a atteint 2.657 TWh en 2019 soit 10% de la consommation électrique mondiale. Actuellement, 443 centrales sont en activité dans le monde avec une capacité de production de 392 GWe et 54 nouveaux réacteurs sont en cours de construction représentant une capacité additionnelle de 57,4 GW (voir Tableau 17 en annexe XXVII)³⁸. La majorité des nouveaux réacteurs sont situés en Asie (11 en Chine, 7 en Inde) en Russie et aux Emirats arabes³⁹ (voir Figure 47). A court terme, outre les 54 réacteurs en construction, environ autant de nouveaux projets sont contractualisés et 300 autres envisagés.

Selon le scénario STEPS de l'IEA [ref.30], les capacités de production d'électricité d'origine nucléaire devraient croître de +15% entre 2019 et 2040 et atteindre 480 WGe pour couvrir 8,5% des besoins mondiaux. Le scénario SDS qui marque un changement dans les politiques en faveur d'une transition accélérée vers les énergies propres donne des perspectives plus favorables au nucléaire. Il prévoit une augmentation des capacités jusqu'à 599 GWe en 2040. L'Agence Internationale pour l'Energie Atomique⁴⁰ (IAEA) estime que la consommation globale d'énergie croîtra en moyenne d'environ 1%/an entre 2020 et 2050 et que la part consacrée à l'électricité augmentera deux fois plus vite atteignant le double de la consommation

de 2019 en 2050 soit environ 161,4 Exajoule (EJ). Selon la place du nucléaire dans le mix énergétique futur, l'IAEA prévoit soit une croissance de +20% des capacités nucléaires mondiales en 2030 et +80% en 2050 comparé à 2019, soit un déclin de -10% jusqu'en 2040 et un rebond à -7% en 2050. Dans les deux cas, la part du nucléaire dans le mix énergétique baisse à l'horizon 2050 entre -1% et -3%.

FIGURE 6. WORLD NUCLEAR ELECTRICAL GENERATING CAPACITY

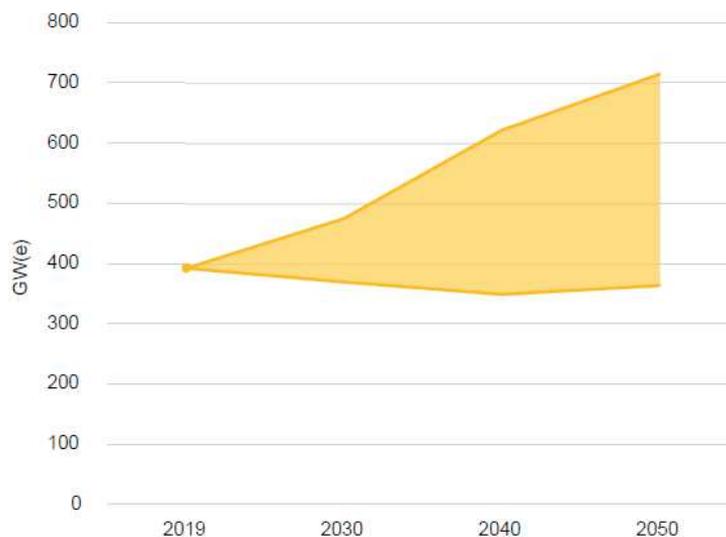


TABLE 3. WORLD TOTAL AND NUCLEAR ELECTRICAL GENERATING CAPACITY, GW(e)

Electrical Capacity	2019	2030		2040		2050	
		Low	High	Low	High	Low	High
Total	7 410	10 722	10 722	13 272	13 272	15 978	15 978
Nuclear	392	369	475	349	622	363	715
<i>Nuclear as % of Electrical Capacity</i>	5.3%	3.4%	4.4%	2.6%	4.7%	2.3%	4.5%

Figure 46: Evolution des capacités de production d'électricité par le nucléaire [réf.40]

443 NUCLEAR POWER REACTORS
IN OPERATION
393 335 MW_e TOTAL NET INSTALLED
CAPACITY

52 NUCLEAR POWER REACTORS
UNDER CONSTRUCTION
55 276 MW_e TOTAL NET INSTALLED
CAPACITY

18 753 REACTOR-YEARS OF
OPERATION

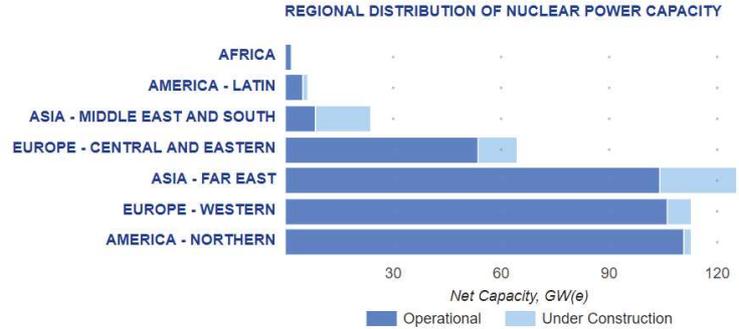


Figure 47: Réacteurs nucléaires en construction dans le monde en décembre 2020 [réf.38]

Deux tiers des centrales nucléaires en activité dans le monde en 2020 ont plus de 30 ans de service. Selon les décisions prises concernant le retrait du service ou l’extension de leur durée de vie, l’IAEA envisage l’évolution des besoins en nouvelles capacités selon deux scénarii :

- Un retrait du service de seulement 12% du parc de centrales actuelles à l’horizon 2030 avec 80 GWe additionnel à l’horizon 2030 et plus de 200 GWe en 2050 ;
- Un tiers du parc actuel de centrales retirées du service à l’horizon 2030 (130 GWe) avec 80 GWe de capacités additionnelles et le remplacement progressif des centrales par de nouvelles sans augmentation de capacité à l’horizon 2050.

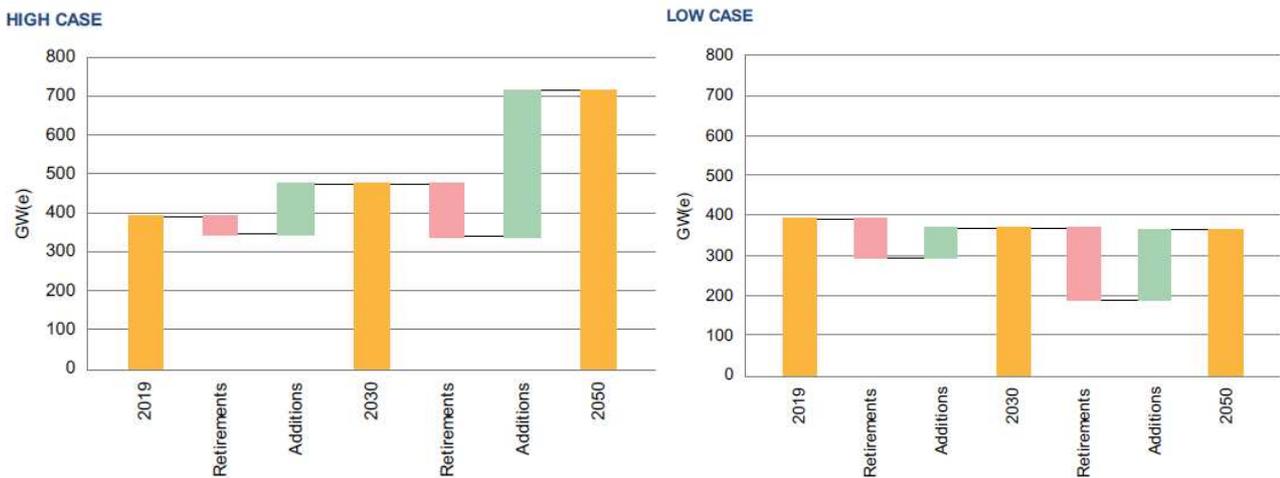


Figure 48: Capacités nucléaires mondiales : retraits de service et nouvelles capacités [réf.38]

Pour ce segment de marché, le titane est en compétition avec l’inox et le cupro-nickel pour la fabrication de la partie « vapeur » des condenseurs⁴¹ des circuits secondaires. Plus cher

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	82/158

à l'achat que ses concurrents, le titane offre toutefois un meilleur rendement économique en coût de maintenance des installations.

Ainsi, les installations utilisant du cupro-nickel doivent être arrêtées au bout de 15 ans pour une remise à niveau des tubes de condenseur. Il est également plus résistant à l'érosion et à la corrosion donc plus adapté aux centrales situées sur le littoral et à celles qui doivent fonctionner avec des eaux chargées en particules (sable, granulat etc.).

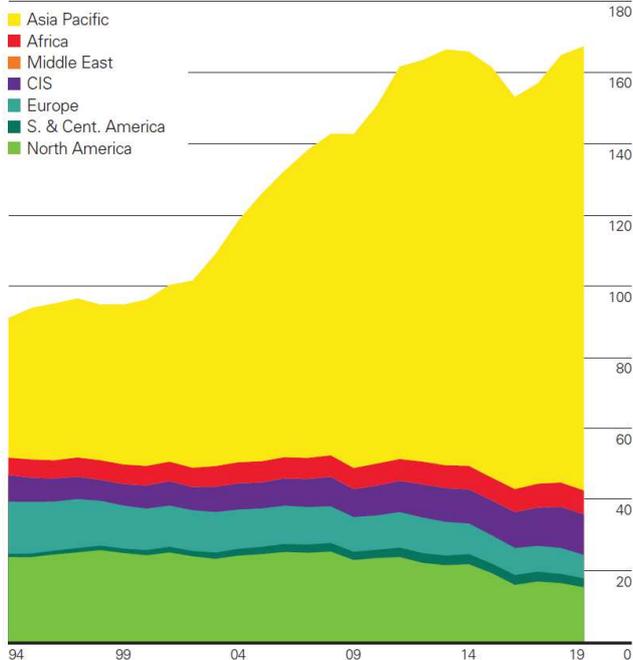
V.1.4 Charbon

Le charbon est la deuxième source d'énergie la plus consommée au monde derrière le pétrole et devant le gaz et la première source pour la génération d'électricité avec 36% de la demande Mondiale [ref.33]. Après une forte croissance dans les années 2000, la consommation a été ralentie en raison de son impact environnemental. C'est la seule source d'énergie dont la consommation a baissé ces dernières années. En 2019, elle est retombée à son niveau de 2003 représentant 27% du mix énergétiques primaires actuel mondial [ref.33]. Elle est progressivement remplacée pour la production d'électricité et les besoins industriels par le gaz naturel, les énergies renouvelables et le nucléaire (cas de la Chine).

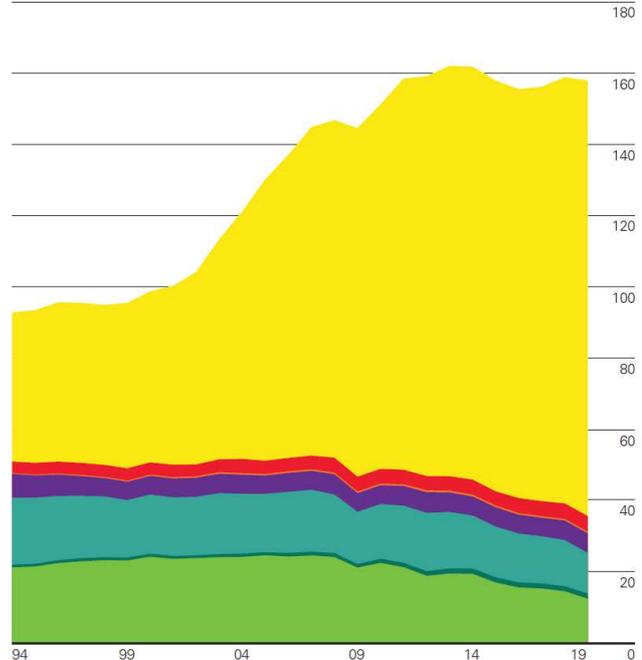
L'évolution de la demande mondiale de charbon est donnée dans la Figure 49. La Chine reste de loin le pays le plus gros consommateur mais d'autres pays émergents ont augmenté leur consommation en 2019 comme l'Indonésie.

Coal: Production by region

Exajoules

**Coal: Consumption by region**

Exajoules



World coal consumption fell by 0.6% (-0.9 EJ), its fourth decline in six years. In the non-OECD, there were notable increases in China (1.8 EJ), Indonesia (0.6 EJ) and Vietnam (0.5 EJ), however, growth in India was only 0.3% (0.1 EJ) – its lowest since 2001. OECD demand fell sharply, led by the US (-1.9 EJ) and Germany (-0.6 EJ), to the lowest level in our data series (which goes back to 1965). Global coal production rose by 1.5%, with China and Indonesia providing the only significant increases (3.2 EJ and 1.3 EJ respectively). The largest declines in production also came from the US (-1.1 EJ) and Germany (-0.3 EJ).

Figure 49: Production et consommation de charbon dans le monde [ref.33]

Selon le scénario de référence STEPS de l'IEA, la demande en charbon ne retrouverait pas son niveau pré-Covid19 et sa part dans le mix énergétique passerait pour la première fois depuis la révolution industrielle en dessous de la barre des 20% à l'horizon 2040. Les incitations gouvernementales favoriseraient la poursuite de la politique de remplacement par des énergies moins polluantes comme le gaz naturel avec la disparition de 275 GW de capacité de centrale électrique au charbon à l'horizon 2025 (soit 13% de la capacité mondiale totale) dont 100 GW aux USA et 75 GW dans l'Union Européenne. Les perspectives de croissance de la demande dans les pays émergents en Asie ne sont par ailleurs pas suffisamment élevées pour compenser la décroissance dans le reste du monde.

Ainsi, le Covid19 semble avoir catalysé les énergies vers une baisse structurale de la part de la consommation de charbon pour la production d'électricité de 36% actuellement à 28% dans le scénario STEPS et 15% dans le SDS. Néanmoins, des projets de construction de nouvelles centrales à charbon sont encore actifs en Asie pour remplacer les centrales les plus anciennes et pour répondre à la demande énergétique croissante. En 2019, dans le contexte de la guerre commerciale avec les USA, la Chine a finalement arbitrée en faveur du charbon plutôt que du gaz. Toutefois, le 14^{ième} plan quinquennal (2021-2025) pour le développement économique et social national ainsi publié fin octobre 2020 annonce l'objectif d'atteindre la neutralité carbone pour la Chine en 2060.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	84/158

V.1.5 Energies renouvelables

Les énergies renouvelables prennent une part de plus en plus importante dans le mix énergétique. Elles ont peu été affectées par les effets de la pandémie, en particulier sur le plan des investissements. Dans le scénario STEPS de l'IEA [ref.30], les énergies vertes couvrent 80% des besoins liés à l'augmentation de la demande globale en électricité dans les 10 prochaines années. Sur la période de 2010 à 2019, l'augmentation moyenne annuelle de capacité de production étaient de 145 GW/an toute énergie renouvelable confondue (solaire, éolien, autres). Dans le SDS, elle passe à +410 GW/an (+230 GW, +118 GW/an et +62GW respectivement) et à +551 GW/an (+303 GW, +171 GW et +77GW) dans le NZE2050, le scénario le plus agressif de l'IEA.

Les politiques de soutien et d'incitation ont permis de placer les énergies renouvelables en bonne place dans le bouquet des technologies productrices d'électricité. Grâce à la baisse des coûts de production dans les 10 derniers années, le solaire a gagné en compétitivité par rapport aux technologies nécessitant de faibles investissements comme les centrales au charbon ou au gaz. Bien que l'énergie hydroélectrique reste la principale source d'énergie renouvelable à l'horizon 2040 selon l'IEA, la croissance du solaire comptera pour la part la plus importante dans l'évolution du mix énergétique à partir de 2022 suivi par l'éolien onshore et offshore.

V.1.6 Énergie thermique des mers

Le procédé OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) ou ETM (Energie Thermique des Mers) est une technique de production d'énergie qui exploite les différences de température entre eaux profondes et eaux de surface. Le rendement maximum théorique de 6 à 7% peut sembler faible mais, compte tenu que l'eau de mer est disponible sans limite, le dispositif peut être configuré pour fournir les besoins de base en énergie d'un complexe côtier incluant la production d'électricité, celle d'eau douce, l'irrigation des cultures, l'aquaculture^{ff}, l'air conditionné, la production d'hydrogène, l'extraction de minéraux et d'autres encore. Par ailleurs, la technologie OTEC est un moyen de production d'énergie ayant un « impact carbone » extrêmement faible. Un rappel sur le principe de fonctionnement de l'OTEC et sur ses principaux développements est donné en annexe XXVIII (voir Figure 71).

Compte tenu des contraintes techniques similaires à celles d'une centrale thermique eau de mer, le titane est le matériau le plus adapté pour les parties en contact avec l'eau salée. D'après des études de marché^{42,43,44,45,46,47} les sites d'implantation possible des centrales OTEC sont situés dans la zone intertropicale qui combine des eaux de surface de plus de 25°C et des fonds marins de plus de 1.000 mètres, ce qui assure un écart de température d'au moins 20°C minimum entre source froide et source tiède. Ainsi, de nombreuses îles du Pacifique et des Caraïbes, des zones littorales africaines et indiennes sont des sites de premier choix pour accueillir la technologie OTEC.

^{ff} L'eau froide remontée des profondeurs favorise le développement du plancton lorsqu'elle est rejetée en surface ce qui favorise la génération de biomasse marine

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	85/158

Les premiers développements à l'échelle d'unité pilote datent des années 80 aux USA (Hawaï). Installée à Kailua-Kona, le site expérimental de Makai Ocean Engineering est la plus grande unité opérationnelle d'une capacité de 100 kW suffisante pour alimenter 120 foyers de l'île. Makai est financé par l'US Navy pour développer des solutions susceptibles de contribuer à son objectif de satisfaire 50% de ses besoins énergétiques à terre par des énergies renouvelables à l'horizon 2020. Le site hawaïen ambitionne de développer dans le futur et en collaboration avec le groupe Lockheed Martin des unités capables de produire de 1MW à 100MW. Lockheed Martin a signé en octobre 2013 un accord avec le groupe chinois Reignwood pour concevoir une unité pilote OTEC de 10 MW destinée à l'île de Hainan⁴⁸. Début 2021, ce projet n'avait pas encore démarré.

En mars 2014, un accord a été signé entre la société américaine « Ocean Thermal Energy Corporation – OTE » et les Iles Vierges américaines (USVI) pour étudier la faisabilité d'une unité à terre de cycle combiné OTEC/SWAC (Sea Water Air Cooling) de 5MW. Naval Group est associé au projet en tant que maître d'œuvre des travaux d'ingénierie, d'approvisionnement et de construction pour ces centrales OTEC. Outre la génération d'électricité (ETM) et la climatisation des bâtiments (SWAC), le projet permettra également d'évaluer la viabilité de technologies associées offrant des services tels que la fourniture d'eau potable en abondance, la possibilité de développer une aquaculture durable et des projets d'amélioration de l'agriculture pour les îles de Saint-Thomas et Sainte-Croix. Début 2021, le projet n'est toujours pas entré en phase de réalisation mais il reste d'actualité.

En France, Naval Group a développé le procédé à partir de 2008 avec deux solutions innovantes : une plateforme flottante en mer, qui permet de produire 16 MW et une solution à terre, d'une capacité de 7 MW. Après les études de recherche et développement, une première étape de faisabilité menée au profit de La Réunion, Tahiti et La Martinique, Naval Group a abouti en 2011 à la réalisation d'un prototype à terre. Il s'agit d'une unité pilote de 10 MW. Ce système a été installé sur le site de l'université de Saint-Pierre à la Réunion. Le prototype a permis aux équipes de travailler sur le système principal de production électrique et de valider la technologie des échangeurs thermiques. En 2014, les résultats concluants permettaient d'envisager de premiers contrats avec un prix de l'électricité visé entre 250 et 300 euros du MWh pendant 25 ans.

Naval Group a également eu en projet de développer une centrale flottante ETM en Martinique, dans le cadre du projet NEMO^{eg}, qui a obtenu en juillet 2014 une subvention européenne dans le cadre du programme NER 300 pour accompagner son développement. Les 16 MW de cette centrale pilote permettait d'alimenter 35 000 foyers en électricité. La construction de cette station devrait débuter en 2018 en vue d'une mise en service vers 2022. Le projet a été mis en « stand-by » en avril 2018.

En décembre 2014, Naval Group a annoncé la construction en Martinique d'une autre unité OTEC à terre de 5,7 MW à Bellefontaine en Martinique à partir de 2016 (projet NAUTILUS). Le groupe a ensuite signé en 2016 un accord avec le Centre d'énergie thermique

^{eg} New Energy for Martinique and Overseas

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	86/158

des mers de l'Université de Technologie de Malaisie pour une étude de préfaisabilité visant à identifier les opportunités de développement pour une ferme pilote ETM sur l'île malaisienne de Layang-Layang. Début 2021, le projet Nautilus n'était pas passé en phase de réalisation.

Pour accompagner le développement de ses activités dans le domaine des énergies marines renouvelables (EMR), Naval Group a annoncé en janvier 2017 la filialisation de ces activités au sein d'une entité dénommée Naval Energies. Cette filiale s'est consacrée au développement industriel et commercial de trois technologies pour la production d'électricité à partir des EMR : l'énergie hydrolienne, l'énergie thermique des mers et l'énergie éolienne via des flotteurs semi-submersibles. La prévision de consommation de titane est de 200 t pour une unité de 10 MW. Le titane serait approvisionné principalement sous la forme de tube lisse ou à ailettes. Avec un objectif de 1,5 unités/an, c'est environ 1.000 t de titane qui aurait pu être consommé par Naval Energies pour ce nouveau secteur d'application chaque année. En février 2021, Naval Group annonçait la mise en vente de sa filiale Naval Energies remettant en cause les développements en cours dans le domaine.

En Inde, les futurs projets du National Institute of Ocean Technology (NIOT) sont très ambitieux puisque l'objectif est de construire 1.000 centrales électriques OTEC de capacité unitaire de 50 MW à travers le pays. Si l'Inde mène à terme ce programme, ce pays sera doté d'une capacité OTEC comparable à la capacité des centrales nucléaires japonaise. Un tel programme pourrait prendre une trentaine d'année à se réaliser. Avec un rythme de construction de 1.700 MW/an, c'est entre 20 et 30.000 tonnes/an de titane qui serait consommé sur la période. Globalement, le potentiel pour l'OTEC en Inde est de 180.000 MW.

En attendant, un projet de centrale énergétique pilote de 1 MW a été initié par le NIOT, en partenariat avec Saga University (IOES) et la société japonaise Xenosys. L'objectif, mené conjointement avec l'organisme japonais NEDO^{hh}, était originalement de réaliser l'unité pilote de 1 MW en 2015, d'augmenter la capacité de cette usine pilote à 10 MW en 2020 puis jusqu'à 50 MW en 2030⁴⁹, et enfin de commercialiser des usines de 100 MW. Comme souvent en Inde, les projets sont reportés d'année en année. Fin 2016, le NIOT déclarait que la priorité avait été donnée à une usine de dessalement de 200kW alimenté par une centrale OTEC destinée à Kavaratti, la principale ville du territoire de Lakshadweep dans l'Océan Indien. Au départ prévu pour entrer en service en 2019, ce projet a été finalement lancé en octobre 2018 et annoncé en phase de développement en mai 2020.

L'intérêt pour la technologie OTEC pourrait bénéficier d'un regain dans le contexte post-Covid19 avec l'accélération vers la transition écologique. Une étude de 2018⁵⁰ a mis en évidence que les deux freins principaux au développement des ETM était d'une part le besoin en investissement élevé et d'autre part l'absence des ETM des plans gouvernementaux pour les énergies renouvelables. En Octobre 2019, le ministère indien des énergies nouvelles et renouvelables (MNRE), a fait un pas en ce sens en incluant officiellement les énergies thermiques des mers dans la liste énergies renouvelables éligibles aux mécanismes de

^{hh} New Energy and Industrial Technology Development Organization

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	87/158

compensation « RPO – *Renawable Purchase Obligation* » pour les fournisseurs d'énergie polluantes.

Au total, le potentiel mondial de la production d'énergie par la technologie OTEC a été estimé à 577 GW réparti sur 99 pays selon une étude indienne [réf.45]. À elle seule, l'Inde a un potentiel estimé à 180 GW. La liste des projets actuellement en cours dans le monde est donnée dans le Tableau 18 en annexe XXVIII.

V.2 Chimie

Les outils de production et de transformation de l'industrie chimique sont conçus pour résister à des ambiances corrosives sévères, ce qui favorise particulièrement l'emploi du titane. Le procédé chlore-alcali utilisé pour la production de biens de grande consommationⁱⁱ absorbe 1/3 de la demande du secteur chimie.

Les autres applications du titane en chimie sont celles qui utilisent des milieux hautement corrosifs comme les composés chloré, les bromures, les acides minéraux, les solutions inorganiques à base de chlorures, les solutions d'acides organiques, les solutions alcalines etc. En Chine, la moitié de la demande intérieure en titane est consommée dans la fabrication des moyens de production de l'industrie chimique.

Comme pour les applications « Énergie », le titane est en général en compétition avec d'autres matériaux (aciers inox, alliages base nickel etc.). Son prix est le principal frein à son utilisation et son meilleur atout est le gain qu'il peut apporter sur le coût d'exploitation des outils de production.

La demande dans le secteur de la chimie est très liée à l'évolution du PIB mondial et au contexte économique. Les conséquences de la pandémie de Covid19 sur le secteur de la chimie sont encore difficiles à cerner. Le modèle économique est associé à celui des ressources naturelles fossiles et de leur emploi en tant que source d'énergie. Par ailleurs, les conséquences environnementales de l'activité industrielle, la pollution par les plastiques etc. ont également un impact sur les comportements à la consommation. Dans les pays développés, une profonde transformation de ce secteur d'activité est attendue pour répondre aux attentes sociétales pour un meilleur respect de l'environnement.

La majorité de la consommation de titane pour le secteur chimique est en Chine. Ce secteur est l'un des piliers du développement industriel du pays et couvre une vingtaine de secteurs de la pétrochimie à l'agriculture en passant par la fabrication des équipements industriels. Depuis 2009, la Chine est le plus gros producteur mondial⁵¹ avec 35,8% de part de marché en 2018 devant l'Europe avec 16,8% et les USA avec 15,8%. La plupart des dernières capacités mondiales de production ont été investies dans ce pays et devraient entrer en service dans la période 2020 – 2023.

ⁱⁱ Plastiques, pharmacopée, détergents, pesticides, herbicides, déodorants

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	88/158

V.3 Dessalement

Le dessalement consiste à transformer de l'eau salée en eau douce. Deux technologies de dessalement se partagent le marché : le procédé d'osmose inverse^{jj} (RO) et les procédés thermiques^{kk} MSF (Multi Stage Flash Distillation) et MED (Multi Effect Distillation). Seuls les procédés thermiques utilisent du titane ou du cupronickel dans leur processus d'évaporation tubulaire. Beaucoup moins gourmand en énergie, le procédé d'osmose inverse gagne de plus en plus de parts de marché sur les procédés thermiques et devrait, à terme, les remplacer totalement. La part de marché des procédés thermiques est actuellement de l'ordre de 30% de la capacité mondiale en service qui est estimée à 89 millions de m³/jour réparties dans 18.214 sites de traitement. La disponibilité en pétrole au Moyen-Orient explique que c'est dans cette région du monde que l'on trouve le plus d'unités de dessalement par voie thermique.

Avec l'augmentation de la population mondiale et le développement économique en Asie (Chine, Inde) et au Moyen-Orient, la demande en eau douce pour la consommation courante et pour les besoins industriels est de plus en plus importante. La crise financière a eu pour effet de retarder de gros projets d'investissement dans ce domaine en 2009 et 2010 mais en 2011 un premier super-projet d'usine de dessalement a vu le jour en Arabie-Saoudite sur le site de Ras Al Khair (anciennement Ras Az Zawr). Illustrant bien le potentiel de déstabilisation du marché spot d'approvisionnement que peut représenter un projet d'infrastructure industriel, cette usine de dessalement par voie thermique capable de traiter 1 million de m³/jour a nécessité 6.200 tonnes de titane. Une centrale thermique à cycle combiné de 2,65 GW a également été construite pour alimenter en énergie cette usine qui est la plus grande unité de dessalement au monde. Elle utilise une technologie hybride combinant les procédés MSF et RO.

En décembre 2012, un second super-projet d'usine de dessalement s'est concrétisé en Arabie Saoudite : le projet Yanbu III. La construction de cette usine de traitement d'une capacité de traitement de 550,000 m³/jour d'eau par le procédé MSF et la centrale thermique associée ont nécessité 4.500 t de titane.

En Janvier 2013, un projet MSF plus modeste de capacité 160,000 m³/jour et nécessitant 500 t de titane a démarré à Ras Abu Fontas au Qatar. A la même période, le Koweït également initié la première tranche sur un total de cinq de l'usine de dessalement d'Az Zour North. Cette usine équipée d'une technologie MED sera capable de traiter un volume de 464,000 m³/jour. La construction de cette unité nécessite environ 500 t de titane et la centrale thermique associée, de capacité 1.500 MW, entre 55 à 75 t de titane. Sur l'ensemble des cinq tranches du projet, la capacité globale de traitement sera de 1,25 million de m³/jour. La consommation de titane pour la partie dessalement sera d'environ 1.500 t et la centrale thermique associée de 4,8 GW nécessitera 170 à 250 t de titane.

En 2015 – 2016, deux nouveaux projets d'envergure ont été lancés au Moyen-Orient :

^{jj} Filtration de l'eau par une technique de membrane

^{kk} Procédé thermique de distillation

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	89/158

- Shoaiba 2 en Arabie-Saoudite : la première phase du programme avait une capacité de production d'eau douce de 24,6 millions de m³/an qui a été étendue à 150 millions m³/an dans la phase 2. Cette seconde phase a consommé 900 t de tubes en titane ;
- Facility D au Qatar : les besoins en titane de cette centrale de dessalement d'une capacité de 100 millions m³/an ont été de 10.000 kms de tubes en titane représentant environ 2.500 t.

Depuis 2017, la consommation de titane dans le secteur du dessalement est devenue très faible (de l'ordre de 1.000 t/an). Seulement 0,1 million de m³/jour auraient été réalisés en technologie thermique à comparer à 2,2 millions de m³/jour en technologie RO en 2017 (soit 4,5%). En 2018, seul le projet industriel ADNOC Takreer à Abu-Dhabi (Emirats Arabes Unis) a opté pour la technologie MED pour une unité de centrale électrique et deux centrales de dessalement de 31.250 m³/jour chacune utilisant des tubulures en titane (quelques centaines de tonnes) et en acier duplex.

L'emploi du MSF a tendance à chuter car c'est le procédé le plus gourmand en énergie et le MED garde encore des avantages dans des régions comme le Golfe car il est bien adapté à la qualité de l'eau de mer. Le MED est également potentiellement intéressant pour les petites unités de traitement favorisant les hautes températures.

Malgré la crise liée à la pandémie du Covid19, les perspectives de développement du marché du dessalement sont de 7,2%/an sur la période 2020 – 2027. Les régions du monde les plus susceptibles d'investir dans de nouvelles usines sont autour de la mer rouge et du Golfe persique ainsi qu'en Asie-Pacifique et sur le continent américain (USA et Amérique latine). Récemment, un débat s'est ouvert sur la pollution au cuivre, via l'emploi des cupronickels, des eaux de la Mer Morte. Sur ce plan le titane présente un sérieux avantage concurrentiel face aux alliages à base de cuivre en raison de son impact nul sur l'environnement au cours de la phase d'utilisation.

Le contexte généré par la crise du Covid-19 et en particulier les objectifs de transition énergétique sont de nature à accélérer l'adoption de la technologie RO au détriment des procédés thermiques. En particulier, le RO est compatible avec les énergies renouvelables comme le solaire, l'éolien et la géothermie. En 2019, l'ONU s'est inquiété des conséquences environnementales des quantités de plus en plus importantes des saumures rejetées par les usines de dessalement (environ 142 millions de m³/jour). Or plus de la moitié de ces rejets sont concentrés au Moyen-Orient (Arabie saoudite (22%), Émirats arabes unis (20.2%), Koweït (6.6%) et Qatar (5.8%)) en raison de la concentration en centrales thermiques et de la nature des eaux traitées à forte teneur en sels. La technologie RO présente l'avantage de produire moins de saumure que les procédés thermiques et sous une forme plus facilement retraitable.

Au final, les perspectives d'emploi du titane dans le secteur du dessalement tendent à se réduire considérablement. Les projets optant pour les techniques 100% thermiques sont de plus en plus rares. Il reste des opportunités d'emploi du titane pour la maintenance des centrales

actuellement en service et pour les unités mixtes RO/MED qui présentent un intérêt pour les petites unités de traitement.

VI PERSPECTIVES POUR LE MARCHÉ DES BIENS DE CONSOMMATION

Dans la catégorie « biens de consommation » sont regroupées les applications du titane autres que l’aéronautique, le militaire et le secteur « industrie ». Sont regroupés les biens de consommation de grande diffusion, le sport, le luxe, le médical, l’automobile, l’architecture, les piles à combustibles, les applications navales et les autres marchés de niche.

Ce secteur peut révéler des marchés émergents à fort potentiel pouvant impacter significativement l’équilibre du marché mondial. C’est par exemple le cas des piles à combustible dont l’emploi, s’il se généralise, peut rapidement consommer des volumes considérables de titane.

La Figure 50 présente une synthèse de l’évolution de la consommation de titane dans ce secteur à partir des éléments détaillés dans ce chapitre.

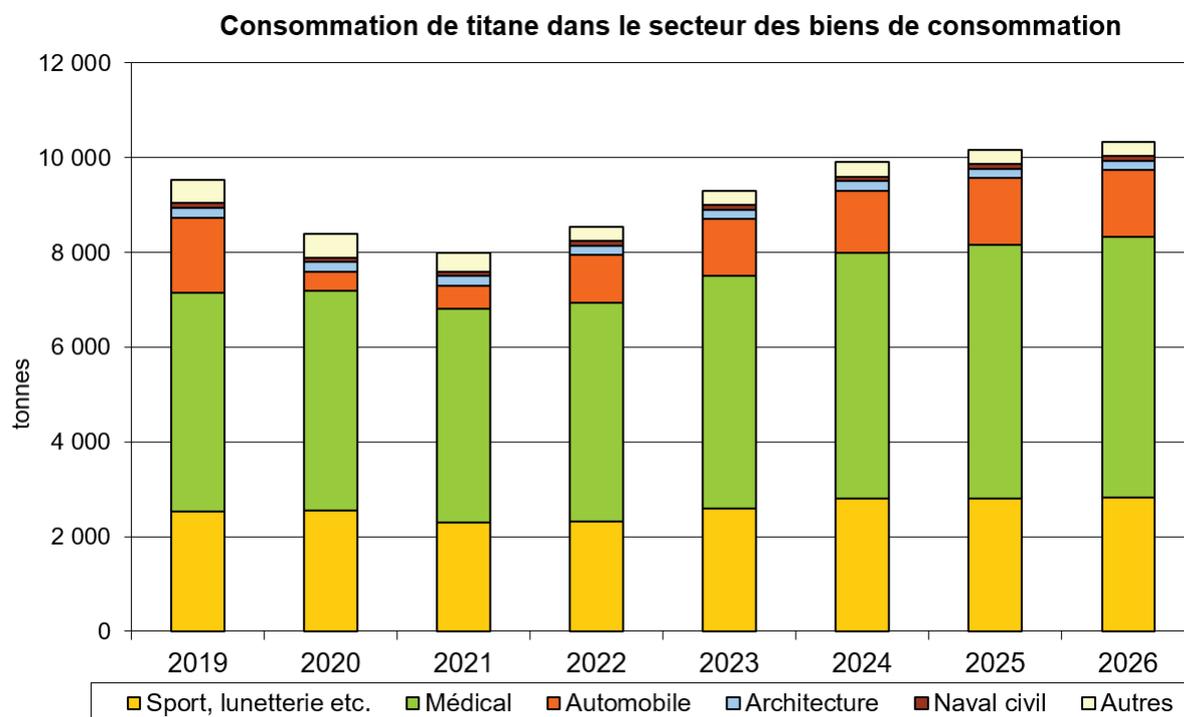


Figure 50: Evolution de la demande en titane dans le secteur des biens de consommation

VI.1 Applications grand public : sport, lunetterie, luxe & électronique nomade

Le titane bénéficie d’une très bonne notoriété auprès du grand public grâce à son positionnement de matériau *high-tech*, performant et léger. On le trouve dans les produits « haut

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	91/158

de gamme » où il peut concurrencer des matériaux comme les composites « carbone », les métaux précieux comme le platine ou des métaux plus communs comme l’acier et l’aluminium ; ainsi en est-il dans les secteurs ci-après :

- Les articles de sport : clubs de golf, cadres de vélo, raquettes en tous genres...
- La lunetterie, la joaillerie, l’horlogerie et autres produits de luxe
- Les boîtiers pour l’électronique nomade etc.

La production pour ces articles de grande diffusion n’implique pas de moyens complexes et les nuances de titane utilisées sont courantes (titanes faiblement alliés, TA6V) ; c’est pourquoi ce segment de marché s’est particulièrement développé en Asie et en particulier en Chine (voir section II.3). Le développement fulgurant de l’application « clubs de golf » dès les années 1995 a démontré que le titane était compatible avec une industrialisation intensive et a ouvert la voie pour les applications « grand public ». Installé en Corée du Sud, à Taïwan et en Chine, le marché des clubs de golf est aujourd’hui un marché mature. Plus récemment, le titane a profité d’un effet de mode et fait une percée dans le domaine des boîtiers de biens de consommation électroniques : appareils photo, caméra, ordinateurs portables etc. Ces produits sont fabriqués en Asie dans la plupart des cas. D’autres applications pourront encore émerger dans le domaine des biens de consommation courante dans les prochaines années mais globalement la demande est fortement dépendante du contexte économique.

VI.2 Médical

Les applications du titane dans le secteur médical se sont développées ces dernières années. Elles représentent aujourd’hui le secteur de marché le plus volumineux dans les biens de consommation. En progression de l’ordre de 4,9%/an⁵² en moyenne sur la période 2016 – 2024, le marché des implants croît avec le vieillissement général de la population et le développement des classes moyennes et aisées. La demande se concentre aux USA (50%), en Europe (25%) et en Asie (22%). Grâce à sa biocompatibilité, le titane est un métal adapté à toutes les applications réparatrices (implants dentaires, prothèses, tiges, fixations, renforts osseux etc.) et aux outils chirurgicaux. Globalement, 70% des tiges et 80% des coquilles utilisées pour les prothèses de hanche sont en titane. 65% des prothèses de tibias et 95% des plaques et vis des prothèses de colonnes vertébrales sont également en titane.

Malgré un coût unitaire élevé et une faible prise en charge par les organismes de remboursement, les prothèses en titane gagnent des parts de marché sur les solutions en acier car elles ne présentent pas de risque de rejet et elles offrent une meilleure durée de vie. Seule ombre au tableau, le secteur a connu un scandale retentissant avec des problèmes de qualité sur des implants titane chinois importés aux USA. Avec de nombreux cas de patients opérés ayant subi de graves problèmes de santé, les implants chinois ont été bannis à l’importation. La décision a favorisé le développement du marché intérieur avec l’émergence de nouvelles solutions réparatrices mettant en œuvre des technologies avancées d’impression 3D, de matériaux poreux (permettant la colonisation osseuse), de nouveaux alliages etc. Par exemple,

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	92/158

l'Université de Rice (Huston, TA) a mis au point en 2016 un composé intermétallique titane-or très haute dureté, le β -Ti3Au pour des prothèses. Cet alliage est un bon candidat pour les applications médicales en raison de sa meilleure tenue au frottement et à l'usure qui permettrait une amélioration de la durée de vie des implants. D'autres applications sont envisagées dans le sport et l'usinage (pour les forêts de perçage).

Dans le domaine de la mise en forme d'implants par techniques additives, la *Food & Drug Administration* (FDA) délivre de plus en plus d'autorisation pour la mise sur le marché d'implants comme des implants faciaux (fabrication additive par voie lit de poudres et fusion EBM), des implants lombaires (impression 3D de titane poreux), des prothèses cervicales (impression 3D par faisceau d'électron) etc. Globalement, le titane couvre 95% des implants métalliques fabriqués par techniques additives.

La demande est dominée par cinq grands fabricants de prothèses et implants en titane qui détiennent 60% du marché et complétée par une centaine d'acteurs plus petits. Ce marché de niche à haute valeur ajoutée bénéficie, comme évoqué plus haut, d'un certain protectionnisme vis-à-vis de la concurrence chinoise. L'approvisionnement par les distributeurs permet d'alimenter en matière première de qualité pour des besoins en volume modestes. Les perspectives de développement global du marché sont telles que des nouveaux entrants se profilent comme Google, Apple ou Amazon. En 2009, alors que la demande globale en titane s'écroulait en raison de la crise des *subprimes*, le secteur médical était un des rares marchés à s'être maintenu. Depuis, le marché continue à se développer, soutenu par une très forte activité de recherche et développement. Il y a donc sur ce segment une vraie dynamique sur le long terme. En 2020, la crise du Covid-19 a bouleversé l'activité dans le secteur médical. La grande majorité des opérations chirurgicales ont été reportées pour laisser place à l'accueil des patients atteints par la pandémie. Au final, l'impact sur le marché des implants, en particulier ceux en titane, semble s'adapter avec des effets de rattrapage de la demande dès lors que les conditions économiques et sanitaires le permettront.

VI.3 Transports terrestres

Le premier frein à l'utilisation du titane dans le secteur des transports terrestres (automobiles, motos, camions) est son prix, tant en niveau qu'en stabilité. Au-dessus de 9 à 13 €/kg^{53,54} pour une pièce finie prête à monter, le titane ne peut concurrencer des solutions métalliques en acier ou en aluminium. Le second obstacle est la structure actuelle de la filière de production qui n'est pas adaptée à une production de masse. Malgré cela, le titane trouve sa place dans certains véhicules automobiles et les motos de haut de gamme, de prestige et de compétition. Une étude menée aux USA [réf.54] a montré qu'il existait un marché potentiel de plusieurs dizaines de milliers de tonnes dans les systèmes d'échappement, les ressorts de suspension, les composants des systèmes condenseur/refroidisseur, différentes pièces moteurs (soupapes, ressorts de soupapes, bielles, vilebrequins etc.). Les réglementations anti-pollution de plus en plus drastiques en Amérique et en Europe favorisent le remplacement de l'acier par le titane sur ces applications.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	93/158

Les premiers débouchés du titane sur des véhicules de série sont apparus au Japon en 1991 avec les bielles de la Honda Acura NSX V6 et en 1998 avec Toyota sur des soupapes en titane pour le modèle Altezza. En 2001, Volkswagen (Europe) conçoit des ressorts de suspensions pour la Lupo FSI (4 tonnes/an^{ll}) et la même année Chevrolet (USA) dote la Corvette Z06 (150 tonnes/an⁵⁵) d'une ligne d'échappement en titane. Les constructeurs allemands (Porsche, Mercedes, BMW) ont privilégié le titane sur des modèles très haut de gamme dont l'exemple ultime est la Bugatti Veyron^{mmm} (groupe BMW), véritable démonstrateur de haute technologie avec plus de 40 kg de titane à bord (100 kg approvisionné). A ces applications sur véhicules de série, se rajoute la consommation de titane dans la compétition moto et automobile (Formule 1, Racing etc.). La consommation dans ce secteur est estimée à 100 tonnes/an. Dans le domaine des échappements sport, la société slovène Akrapovič a développé de nombreux modèles en titane qui équipent les véhicules « haut de gamme » allemands et de nombreuses motos sportives. Le constructeur américain de véhicules électriques Tesla, a introduit en 2014 l'utilisation du titane pour la réalisation d'un bouclier de protection sous le châssis. Le titane utilisé en tôle fine est assemblé avec de l'aluminium et constitue une protection contre le percement des batteries en cas d'impact de gros débris présents sur la chaussée. En 2017, DS Automobiles (groupe PSA) a proposé en option sur la version en édition limitée « dark side » de son modèle DS 3 des pièces titane non fonctionnelles en impression 3D. Les pièces ont été réalisées en un temps record par consolidation de poudre sous faisceau laser (Direct Metal Laser Sintering). Les pièces réalisées sont des accessoires de décoration : enjoliveur de poignée de porte intérieure et porte-clefs. La réalisation des 2.000 pièces a nécessité 2.000 heures de production après l'étude de mise au point. Cet exemple montre, que les coûts de production et le temps de mise au point des produits pour une fabrication de pièce en titane sont compatibles du secteur automobile où la pression sur le prix au kilogramme est très forte.

C'est au Japon que les exemples d'industrialisation sont les plus nombreux. Des recherches sont menées sur la qualité et sur les procédés de transformation afin de réduire autant que possible le coût de production des pièces finies. Avec une consommation de l'ordre de 1.300 tonnes/an en 2008, le Japon faisait office de leader sur ce segment d'application. Malheureusement, la très forte récession qui a frappé le Japon a fait chuter la consommation à 200 tonnes en 2009 et l'activité a commencé à reprendre en 2016 et fluctue depuis à des niveaux relativement faibles. Dans la mouvance des technologies « vertes » pour le transport terrestre, le titane a un potentiel d'utilisation dans les piles à hydrogène. Le premier constructeur automobile qui s'est lancé dans la fabrication d'une pile à combustible⁵⁶ utilisant du titane est Toyota pour son modèle Mirai qui est entré en production en 2015. Après une présérie de 700 véhicules, la commercialisation du modèle Mirai équipée de la pile à hydrogène (FCV) a débuté en 2017 avec 2.000 véhicules assemblés puis la production s'est stabilisée à 3.000 véhicules/an. En septembre 2019, Toyota fêtait sa 10.000 Mirai, faisant de ce modèle la voiture à hydrogène la plus vendue dans le monde. Pour l'instant assemblée à la main au Japon, la Mirai devrait passer en mode automatisé pour booster la production de 3.000 unités/an à 30.000/an en 2020 et 800.000/an à l'horizon 2030. Toyota a investi massivement dans une usine de fabrication des

^{ll} Produite entre 2001 et 2005.

^{mmm} En production depuis 2005 à un rythme de 75 voitures/an.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	94/158

pires à hydrogène FCV utilisant le feuillard de titane. Le succès de l'hydrogène dans les transports terrestres est très dépendant de l'effort consenti pour équiper le parc autoroutier en infrastructures d'approvisionnement. En France, le ministère de la transition écologique et solidaire a distribué un fond de 90 millions d'euros pour accélérer le développement de la filière hydrogène sur le territoire. Les infrastructures nécessaires au développement de l'hydrogène dans le secteur des transports terrestres étant encore trop peu développées, nous estimons que son impact sur la consommation de titane dans le domaine des piles à hydrogène n'atteindra pas les niveaux prévus par Toyota. Il pourrait néanmoins être multipliés par 2 à l'horizon 2025 et par 4 en 2030.

VI.4 Constructions navales civiles : marine marchande, yacht & plaisance

Dans cette section, les applications « méthaniers » pour le transport de gaz naturel liquéfié et les constructions navales militaires ne sont pas prises en compte. Elles sont traitées respectivement dans les sections V.1 et IV.3. Le titane combine trois avantages et autant d'inconvénients majeurs qui expliquent les faibles volumes constatés sur ce segment d'application. En théorie, la résistance à la corrosion, les bonnes propriétés mécaniques spécifiques et la tenue au feu du titane permet de réaliser des superstructures de grands navires, des coques de bateaux de plaisance, des équipements et accastillages divers etc. Dans la pratique, les cas concrets d'application sont très limités, pour les raisons suivantes :

- Le prix des pièces réalisées en titane : comparées à des équivalents inox, le coût de revient des pièces en titane est 4 fois supérieur ;
- L'absence de technologie de soudage sous atmosphère contrôlée économiquement rentable par rapport aux procédés actuels utilisés dans les chantiers navals ;
- L'absence de code de construction règlementant l'emploi du titane pour ces structures navales.

VI.5 Architecture

De nombreux projets architecturaux ont utilisé le titane en tant que matériau de finition pour son aspect esthétique. Dans ce domaine, l'exemple le plus connu est le musée Guggenheim de Bilbao réalisé en 1997. Ce projet spectaculaire été suivi par de nombreuses autres réalisations partout dans le monde, tant pour les bâtiments publics que pour les projets privés. C'est certainement au Japon que le titane est le plus apprécié dans le domaine architectural, principalement pour le rendu esthétique qu'il offre sur les toitures et les façades. La consommation annuelle est fortement dépendante du nombre et de la taille des projets qui sont menés. Les architectes envisagent également le titane en tant que matériau de construction. Outre les performances mécaniques avantageuses pour des structures élancées, la tenue à la corrosion et la résistance au feu, le faible coefficient de dilatation du titane permet de concevoir des structures qui l'associent avec la pierre, le béton et le verre.

Étude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	95/158

Deuxième Partie : Évolution de l'offre

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	96/158

DEUXIEME PARTIE : EVOLUTION DE L'OFFRE

CHAPITRE VII

Résumé :

La production de titane démarre par la fabrication de l'éponge qui est extraite de l'oxyde de titane par le procédé Kroll. Ce procédé complexe et coûteux détermine l'économie de la filière de production et contribue au prix élevé du matériau. Clef de son développement, des recherches sont menées pour inventer de nouveaux procédés d'extraction, innover dans les méthodes de production. Des progrès sont obtenus et des marchés de niches trouvent progressivement leur voie en particulier dans le domaine des méthodes de production additives. L'essentiel de la production reste toutefois sur le schéma basé sur l'éponge Kroll, les techniques alternatives d'extraction ne réussissent pas à passer le cap de l'industrialisation avec de meilleurs rendements.

Entre 2003 et 2012, les capacités mondiales de production d'éponge ont été multipliées par trois pour atteindre 322.000 t/an. Pendant cette période, la Chine a développé une offre très surcapitaire qui n'a pas résisté aux effets de la crise de 2008. Après avoir perdu 40% de ses capacités entre 2012 et 2017, ce pays a déclaré en 2019 disposer de 158.000 t/an de capacité soit 47% des 336.400 t/an du total mondial. Le reste est situé en Europe de l'Est (25%), au Japon (19%), aux USA (4%) et en Arabie-Saoudite (5%). Ce dernier pays a démarré sa production fin 2019. Grâce à sa collaboration avec le Japon, il est en capacité à moyen terme de se qualifier pour des applications aéronautiques alors que la Chine n'y est pas encore parvenue.

Au niveau des moyens de fusion, les capacités mondiales sont estimées à environ 478.000 t liquides/an (344.000 tonnes solides/an). Elles sont principalement localisées en Chine (37%), aux USA (33%), en Europe de l'Est (18%) et au Japon (11%). En Europe, après la fermeture des capacités allemandes du groupe Thyssen, les initiatives autour de la coentreprise franco-kazakhe UKAD ont permis d'initier une filière de transformation de produits forgés (2011) puis de recycler le titane aéronautique avec EcoTitanium (2017) et enfin d'organiser une capacité européenne de produits plats (2020).

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	97/158

CHAPITRE VII

VII MINERAI DE TITANE

Le minerai de titane est principalement extrait des gisements pour la fabrication de pigment TiO₂ (voir Tableau 1). Seulement 6% à 7% de la production mondiale est utilisée comme matière première pour la filière du titane métal. Les fabricants d'éponge occidentaux et japonais utilisent le rutile TiO₂ extrait naturellement ou synthétisé tandis que les méthodes de production d'Europe de l'Est (Russie, Kazakhstan, Ukraine) et de Chine sont basées sur l'extraction de scories de titane (*slag*) par fusion de l'ilménite (FeTiO₂). Selon les informations recueillies auprès de différents producteurs d'éponge, ces généralités cachent en réalité un savant dosage des matières premières qui constitue le savoir-faire « maison ». In fine, quel que soit le mix des matières premières utilisées en fonction de leur nature, de leur teneur en impuretés^{mn} et de leur origine, le fabricant d'éponge doit garantir une certaine qualité d'éponge en sortie. Selon les producteurs, les problématiques d'approvisionnement ne sont donc pas identiques.

VII.1 Rutile naturel

Le rutile naturel⁵⁷ est utilisé directement pour la production d'éponge de titane. Il peut contenir, selon l'origine, 4% à 7% d'impuretés (pureté 93% à 96%) sous la forme d'oxydes métalliques et d'éléments radioactifs comme l'uranium ou le thorium. Les principaux gisements naturels sont exploités en Australie, en Sierra Leone, en Afrique du Sud et en Ukraine (voir Tableau 1).

VII.2 Rutile synthétique

Le rutile synthétique est extrait de l'ilménite selon deux procédés^{58,59} :

- Le procédé Becher (par rinçage à l'acide sulfurique) développé et exploité commercialement en Australie ;
- Le procédé Benilite (par rinçage à l'acide chlorhydrique) développé aux USA exploité dans les autres pays producteurs de rutile synthétique.

^{mn} Parmi les impuretés, le minerai de titane peut contenir des éléments radioactifs dont la concentration doit être contrôlée en production pour des raisons évidentes de sécurité. Cette contrainte supplémentaire complique encore les paramètres de mix sur les matières premières.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	98/158

⇒ Procédé Becher

Premier procédé commercialisé dans le monde, il permet de transformer de l'ilménite en TiO_2 par élimination du fer contenu, voire du manganèse, mais les autres impuretés restent présentes à l'issue du traitement. Le rutile synthétique ainsi produit contient en général entre 85% et 95% de TiO_2 et nécessite une matière première qui peut être soit de l'ilménite contenant 40% à 60% de TiO_2 (noté 40% - 60% TiO_2), soit du slag de titane (72% - 85% TiO_2) soit un mélange des deux. Ce procédé est plutôt adapté aux produits moins exigeant en termes de qualité. Il faut environ une tonne de matière première pour produire 0,5 tonne de TiO_2 .

⇒ Procédé Benilite

Ce procédé présente l'avantage d'éliminer plus d'impuretés dans l'ilménite que le procédé Becher. Il traite en général le magnésium, le calcium et le chrome en plus du fer et du manganèse. Bien que plus cher, il permet ainsi de prendre en compte une plus grande variété d'ilménite, de slag de titane voire de rutile (pour purification).

VII.3 Slag de titane

La fabrication de slag de titane se fait par réduction de l'ilménite⁶⁰ dans des fours à arcs électriques. Par adjonction de charbon (anthracite), la majorité du fer est séparée dans le four sous la forme de fonte d'acier tandis que le TiO_2 est concentré dans les scories avec les autres impuretés présentes et des résidus ferreux (typiquement de 8% à 10% FeO). Ensuite, les scories subissent des traitements chimiques ultérieurs comportant des rinçages acides afin de les purifier (sulfurique ou chlorhydrique). In fine, la concentration atteinte se situe entre 80% et 95% TiO_2 selon les procédés employés.

Pour la production d'éponge de titane, l'ilménite à plus forte teneur en TiO_2 (55% – 70%) est préférée afin d'en extraire un slag enrichi par le procédé au chlorure. La concentration en TiO_2 de ce slag serait de l'ordre de 85% à 95%.

VII.4 Du minerai à l'éponge de titane

La Figure 51 donne en synthèse un aperçu des filières actuelles de transformation des différents minerais titanifères en matières premières pour les industries utilisatrices, c'est-à-dire les pigments et l'éponge de titane.

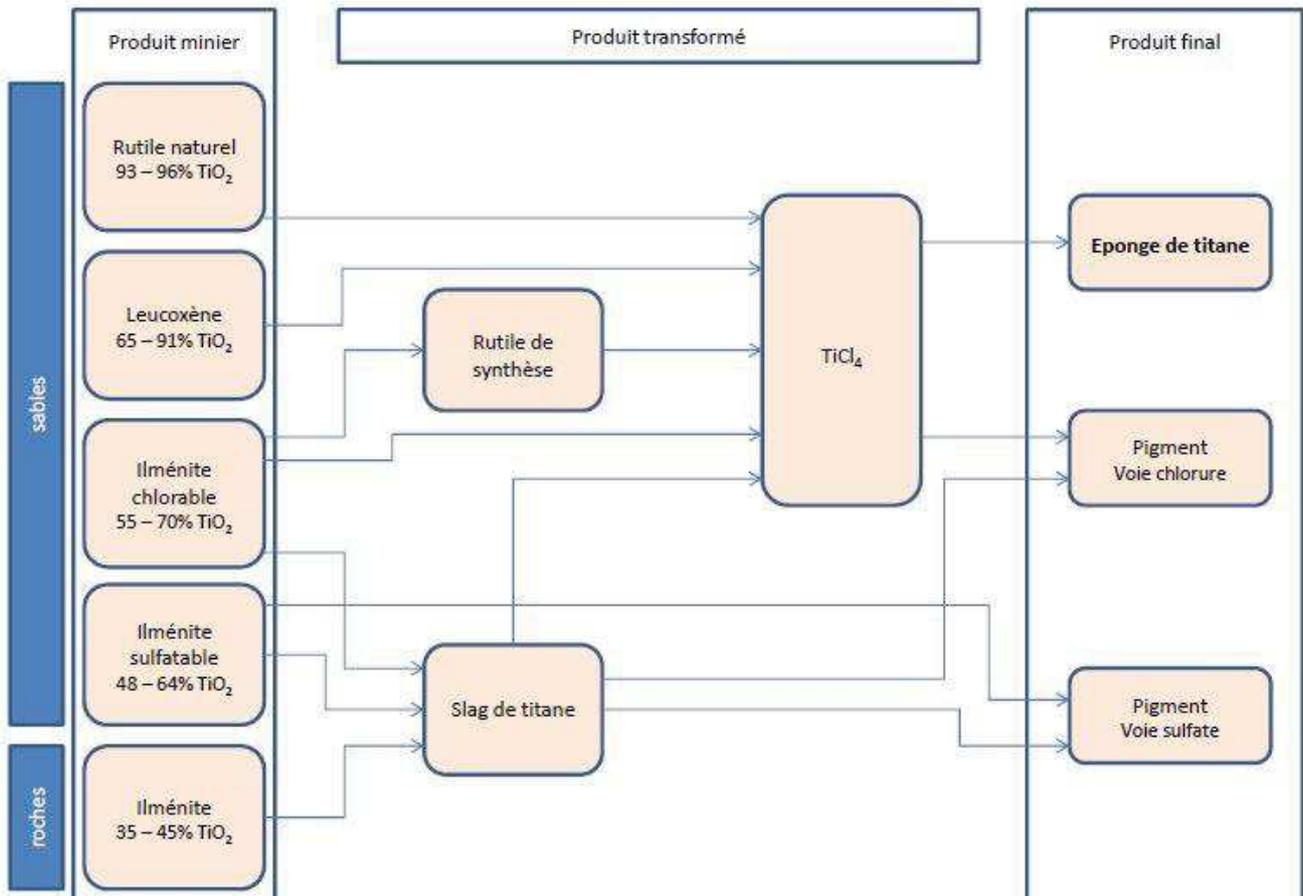


Figure 51: Filière de transformation des minerais titanifères

Comme nous le verrons au chapitre X, des travaux de recherches sont menés dans de nombreux pays pour trouver de nouvelles méthodes d'extraction plus compétitives. En attendant, les fabricants d'éponge améliorent leur méthode afin de baisser les coûts de production. Ainsi, les japonais ont annoncé⁶¹ qu'ils avaient engagé en 2011 un changement important dans leur stratégie en introduisant progressivement l'emploi de minerais de moins bonne qualité. Le taux d'emploi de matière à 90 – 92% TiO₂ est passé de 0% en 2010 à 40% en 2012, en substitution de la qualité à 94 – 96% de TiO₂ utilisée jusque-là. Depuis, aucune nouvelle information n'a diffusé à ce sujet.

VIII EPONGE DE TITANE

VIII.1 Évolution des capacités mondiales de production d'éponge

Nous présentons dans la Figure 52 l'historique de l'évolution des capacités mondiales de production d'éponge par pays sur la période 2010 - 2020. Ces données mettent en évidence la montée en puissance de la Chine qui a détrôné le Japon en 2007 en tant que 1^{er} pays

producteur. En 2012, les capacités chinoises ont culminé à 149.500 t/an puis, sous la pression surcapacitaire et une réglementation plus contraignante en matière de protection de l'environnement, ce pays a perdu en 3 ans 40% de ses capacités qui se sont stabilisées à 88.000 t/an. Quatre ans plus tard, elles sont reparties à la hausse avec 158.000 t/an en 2019 mais il est probable que de telles capacités ne puissent être maintenues dans le contexte du Covid-19. Les producteurs historiques d'éponge de titane sont : le Japon, la Russie, les USA, le Kazakhstan et l'Ukraine. L'Inde s'est dotée d'une petite capacité de 500 t/an qui a mis plusieurs années à se mettre en place. Il semble qu'elle soit opérationnelle depuis 2015 pour satisfaire les besoins des programmes nationaux pour le militaire et le spatial. La domination capacitaire de la Chine est indiscutable en volume, toutefois le niveau de qualité de l'éponge limite son emploi à des applications courantes (qualité métallurgique). Malgré les efforts des producteurs chinois et les incitations du gouvernement chinois, aucun producteur de ce pays n'est encore qualifié pour les pièces critiques aéronautiques. Pour ces applications-là, l'éponge est importée depuis le Kazakhstan et le Japon (voir II.3).

En 2019, le démarrage de la production de la toute nouvelle usine saoudienne de Yanbu est un fait saillant. Fruit de la collaboration industrielle entre le groupe saoudien de production de TiO_2 Cristal et du producteur d'éponge japonais Toho, cette joint-venture est en capacité de devenir à terme un fournisseur de la qualité aéronautique. Le récent rachat de Cristal par l'américain Tronox pourrait remettre en cause l'indépendance de la filière surtout depuis l'arrêt de la dernière usine d'éponge américaine (Henderson, Timet/PCC) - voir ci-après. La situation fin 2020 avec les incertitudes liées à la crise du Covid-19 génère une incertitude sur les scénarii d'évolution des capacités de production d'éponge, en particulier en Chine.

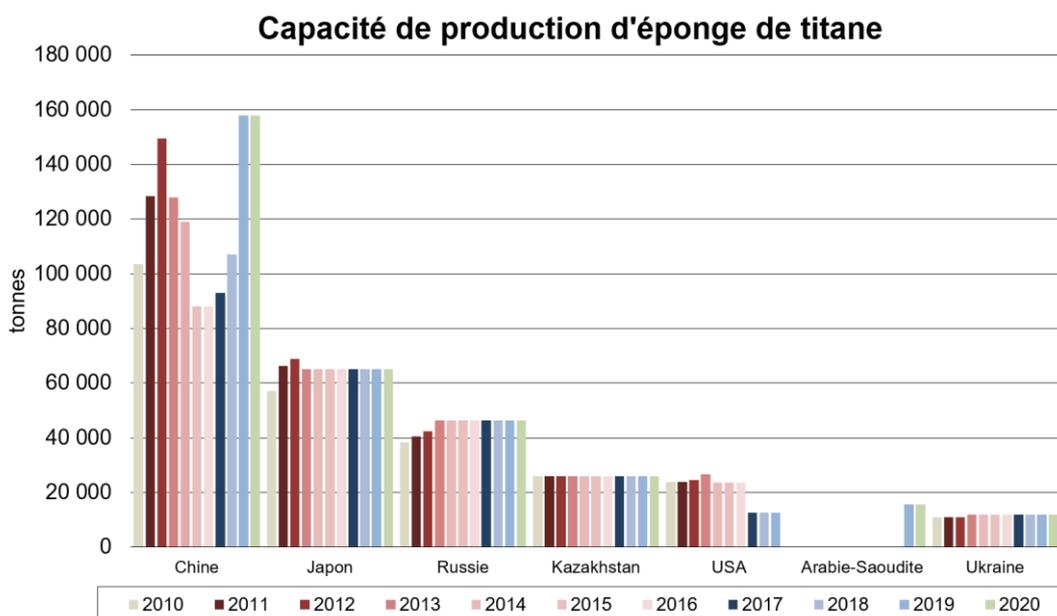


Figure 52: Capacités mondiales de production d'éponge 2010 – 2020

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	101/158

Nota bene : 1°) Les producteurs qualifiés « aéronautique » sont sur fond gris/mauve et ceux qui ne le sont pas sont sur fond jaune, 2°) Les capacités non opérationnelles sont en italique, 3°) Les augmentations de capacité sont en gras.

⇒ USA

La crise financière de 2008 a donné un coup d'arrêt aux projets d'expansion de capacité envisagés aux USA. Seul ATI a maintenu son investissement dans une nouvelle usine d'éponge à Rowley (Utah) en décembre 2009 et qui monte progressivement en capacité jusqu'à son potentiel cible de 11.000 t/an. L'éponge a reçu sa qualification pour pièces tournantes « moteur » en juin 2015. ATI a conçu l'usine de telle sorte qu'une extension à 19.000 t/an de capacité soit possible. Fin 2013, le producteur a annoncé la fermeture définitive de son usine d'Albany (Oregon), jugée trop ancienne. Trois ans plus tard (septembre 2016), les conditions économiques obligent ATI à fermer également sa nouvelle usine de Rowley laissant alors Timet seul producteur d'éponge sur le territoire américain. Cette année-là les USA perdent près de la moitié de leur capacité de production et accentuent leur dépendance vis-à-vis de l'éponge importée du Japon.

Concernant RTI (racheté par le groupe Alcoa^{oo} en juillet 2015), le projet de construction d'une usine d'éponge de capacité 10.000 t/an à Hamilton (Mississippi) annoncé en 2007 a été repoussé puis finalement abandonné en 2010. Pour faire face à ses besoins en éponge, RTI s'appuie sur un approvisionnement via des contrats à long terme avec les producteurs japonais Toho et Osaka Titanium (respectivement sur les périodes 2012 – 2021 et 2013 – 2021) assurant un volume de 8.700 t/an.

Pour Timet (groupe PCC depuis janvier 2013), la dernière extension de capacité date de 2007 et concernait son usine d'éponge d'Henderson, qui a atteint la capacité de 12.600 t/an. Pour s'adapter à la baisse de la demande et à l'augmentation de capacité des autres producteurs, Timet a consolidé ses engagements contractuels d'approvisionnement d'éponge sur le long-terme^{pp}. En mars 2019, le producteur américain lance une pétition pour surtaxer l'éponge importée aux USA dans le but de protéger sa propre production d'éponge et obtenir des subsides du département de la Défense pour financer la remise à niveau de son usine devenue vétuste. Le producteur américain invoque un risque pesant sur la sécurité nationale et les capacités stratégiques de la défense. Sur recommandation du secrétaire au commerce américain, la décision sera finalement prise par la présidence américaine de ne pas surtaxer l'éponge importée aux USA. En juillet 2020, alors de l'industrie aéronautique subit de plein fouet les effets de la pandémie de Covid-19, PCC décide de fermer l'usine Henderson privant ainsi les USA de sa dernière capacité de production d'éponge destinée à l'industrie métallurgique sur son territoire. L'année suivante, les USA semblent avoir relancé leur programme de stock stratégique sous la forme d'éponge de titane stockée chez les producteurs mais aussi sous la forme de lingots de titane TA6V.

^{oo} Devenu Arconic en 2016

^{pp} 19.000 à 24.000 tonnes d'éponge sur une période de 15 ans.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	102/158

A noter que le groupe américain Honeywell Electronic Materials opère une capacité de production d'éponge de titane de très haute pureté de 300 tonnes/an destinée aux applications électroniques. Les différentes formes de titane métal produites sont :

- Titane de pureté 5N5 (99,9995 %), teneur en oxygène inférieure à 100 ppm ;
- Eponge de titane de pureté 3N5 (99,95%) obtenue par réduction au sodium avec une teneur en nickel inférieur à 5 ppm ;
- Monocristal de titane obtenu par affinage électrolytique d'une pureté de 99.999%.

⇒ Japon

Les producteurs japonais ont annoncé qu'ils avaient engagé en 2011 un changement important dans leur stratégie en introduisant progressivement l'emploi de minerais de moins bonne qualité dans leur production d'éponge. Ainsi, alors qu'ils utilisaient un minerai contenant 94 – 96% de TiO₂, ils ont progressivement introduit à partir de 2010 du minerai moins riche (90 – 92% TiO₂) qui représente maintenant la moitié de l'approvisionnement en matière première.

Malgré un contexte économique difficile, les producteurs japonais ont poursuivi leur programme d'augmentation de capacités :

- Toho Titanium a ouvert une nouvelle usine de capacité 12.800 t/an à Wakamatsu en avril 2010, s'ajoutant aux 16.000 t/an de l'usine de Chigasaki. Le nouveau site est dimensionné pour accueillir 12.000 t/an supplémentaire qui étaient prévu en 2014 mais le projet ne verra pas le jour. Au contraire, le site de Chigasaki perd un peu de capacité en 2013. La capacité totale de Toho est révisée à la baisse à 25.200 t/an à partir de cette année-là et la nouvelle usine de Chigasaki est qualifiée aéronautique. En 2016, Toho conclut un accord avec le consortium saoudien Advanced Metal Industries Cluster Company Limited pour créer une usine d'éponge (voir ci-dessous). C'est la première opération d'investissement en capacité de production en dehors du sol japonais du groupe Toho ;
- L'autre producteur d'éponge japonais, Osaka Titanium Corp. (OTC) a augmenté la capacité de son usine de Kishiwada à Amagasaki de +8.000 t/an en 2011 pour atteindre la capacité actuelle de 40.000 t/an.

⇒ Arabie – Saoudite

En Janvier 2014, les groupes saoudiens Tasnee (*National Industrialisation Company*) et Cristal (2^{ème} producteur mondial de TiO₂) ont annoncé la création d'une JV nommée « ATTM » avec le producteur japonais Toho pour construire une usine d'éponge de capacité 15.600 t/an en Arabie-Saoudite. Située à Yanbu à côté de l'usine de TiCl₄ de Cristal, l'usine d'éponge pourra ainsi être alimentée en matière première par cette dernière.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	103/158

Le schéma présenté initialement destinait l'éponge produite à Yanbu à servir les marchés du dessalement, de l'énergie et de la chimie dans les pays du Golfe persique et, en second lieu, pour répondre aux besoins de Toho. Mais tous les éléments sont réunis pour produire une éponge de haute qualité à un coût très compétitif si bien que les ambitions aéronautiques du projet ne tardent pas à se révéler. Initialement prévus pour le second semestre 2017, les premiers essais de production ont finalement lieu le 18 septembre 2019. Au total, 500 tonnes sont sorties de l'usine cette année-là.

Le projet a été retardé en raison des difficultés rencontrées pour la mise au point de l'unité de production du TiO₂ et du tétrachlorure de titane « Metal Grade TiCl₄ » (MGT) qui doit alimenter l'usine d'éponge. L'usine est également dépendante de l'unité voisine de recyclage de chlore (Cl₂). Selon le schéma industriel mis en place sur le site de production, l'usine d'éponge d'ATTM est dépendante du groupe américain Tronox depuis le rachat de l'activité TiO₂ du groupe saoudien Cristal en mai 2019. L'usine d'éponge est annoncée comme étant la première étape de la création d'une « *Titanium Supply Chain* » saoudienne dans le cadre de la feuille de route « *Saoudi vision 2030* ».

⇒ Russie

Le producteur russe AVISMA-VSMPO a réalisé une augmentation de capacité de production d'éponge de +8.000 t/an entre 2010 et 2013 pour atteindre sa capacité actuelle de 44.000 t/an. Une nouvelle ligne de production de +10.000 t/an est envisagée mais n'a pas été confirmée à ce jour. Elle serait qualifiée pour les pièces tournantes aéronautiques. Une nouvelle usine russe « Solikamsk Magnesium Works (SMW) » a démarré son exploitation en juillet 2009. Sa capacité prévue initialement à 5.000 t/an n'est actuellement que de 2.500 t/an. Potentiellement, elle pourrait être étendue à 10.000 t/an.

⇒ Ukraine

Avant la crise russo-ukrainienne qui a débuté en novembre 2013, le gouvernement ukrainien avait décidé la nationalisation des sites miniers d'extraction de titane et remis en cause les licences d'exploitation des sites d'Irshansk et Volnogorsk (fournisseurs de ZTMP, VSMPO et UKTMP) attribuées au groupe DF. Ce même groupe, proche des intérêts russes, avait pris le contrôle du producteur national ZTMK en fin 2012 pour constituer une filière intégrée verticalement. ZTMK est situé géographiquement à Zaporozhye dans la région Est de l'Ukraine, dans la région russophone. Depuis plusieurs années, des discussions étaient en cours entre VSMPO et ZTMK pour fédérer leurs capacités de production et exploiter les synergies entre les deux producteurs : VSMPO se consacrant aux produits à forte valeur ajoutée et ZTMK aux applications plus courantes. ZTMK a pour objectif de multiplier par deux, voire par quatre, sa capacité de production d'éponge actuelle qui est de 12.000 t/an.

⇒ Chine

Le premier site de production d'éponge de titane (Fushun) a démarré en 1958 après une dizaine d'année de recherche financée par le gouvernement chinois. Le titane avait été

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	104/158

identifié comme « matériau stratégique » pour des domaines clefs comme l'espace, l'aéronautique et la défense. Pendant les années 2000, la Chine a connu une phase de développement rapide et anarchique de ses capacités de production d'éponge. Le gouvernement a laissé les initiatives se multiplier sans interventionnisme en misant sur l'autorégulation de l'équilibre offre-demande sur le marché intérieur. Devant l'importance des problèmes de pollution et la multiplication des accidents liés à l'absence d'obligation sur la sûreté des installations, la politique industrielle a évolué à partir de 2007 avec des effets bénéfiques sur la filière.

D'un point de vue technique, les sites de production chinois ne sont pas intégrés verticalement pour ce qui concerne la production de $TiCl_4$. Cela s'explique par le fait que, sans ligne de chloration/distillation, l'investissement pour démarrer une production d'éponge est bien plus faible (de l'ordre de 4 M\$ contre 40M\$ pour une ligne complète de capacité 3.000 t/an). Ces producteurs d'éponge chinois doivent donc s'approvisionner en $TiCl_4$ sur le marché intérieur, ce qui implique des aléas en termes de qualité et de maîtrise des coûts⁹⁹. Par ailleurs, l'absence d'unité de recyclage du $MgCl_2$ oblige ces producteurs à acheter le magnésium au prix du marché et à revendre à bas coût le $MgCl_2$.

De manière générale, la principale faiblesse de l'éponge chinoise est sa qualité. La matière première minérale disponible en Chine est une ilménite contenant des teneurs élevées en Ca et Mg. L'éponge est obtenue à partir de slag riche en TiO_2 mais contenant en général également de nombreuses impuretés. Par ailleurs, les teneurs en O et N sont plus élevées que dans les normes internationales. Nous donnons dans les Tableau 19 et Tableau 20 présentés en annexe XXX le tableau comparatif des technologies de production d'éponge telles qu'elles sont pratiquées dans les différents pays ainsi que les standards de qualité d'éponge chinois comparés au standard japonais et européen.

Parmi les producteurs chinois d'éponge, c'est Zunyi qui semble le plus avancé dans la mise au point d'une éponge grade 0 avec sa dernière ligne de production inaugurée en décembre 2009 (investissement commun avec Baosteel). Ce producteur mène des travaux de R&D pour améliorer la qualité de ses produits et réduire la durée de cycle du procédé Kroll. La filière industrielle chinoise compte très peu d'intégration verticale entre producteurs d'éponge et transformateurs. Outre l'accord de partenariat signé en 2006 entre Zunyi et Baosteel, seul le producteur d'éponge Jinzhou Huashen Titanium s'est associé avec le premier producteur de titane chinois Baoji Titanium (BaoTi) pour former Baoti Huashen Titanium industry Co.

En 2013, le producteur Panzhihua Xinyu Chemical a dû cesser son activité et l'année suivante c'est trois nouveaux sites de production représentant une capacité totale de plus de 20.000 t/an qui n'ont pu démarrer ou maintenir leur production en raison de la faible demande. D'autres producteurs ont dû réduire leur capacité opérationnelle comme Zunyi Titanium (-24.000 t/an), Fushun Titanium plant (-9.000 t/an), Tangshan Tianhe (-5.000 t/an), Anashan Hailiang (-3.000 t/an) et Baoji Lixing Ti Industrie (-1.000 t/an).

⁹⁹ A titre indicatif, 1 kg de titane métal produit nécessite 4 kg de $TiCl_4$.

A partir de 2016, les capacités chinoises de production d'éponge sont reparties à la hausse avec le développement de la demande sur le marché intérieur, seul le producteur historique Zunyi a définitivement cessé son activité cette année-là. Des producteurs ont augmenté leur capacité comme Fushun (+4.000 t/an), Chaoyang Baisheng Zirconium (+4.000 t/an), Luoyang Shuangrui Wanji (+4.000 t/an) et Panzhihua Steel Ti Industry (+ 5.000 t/an). Et de nouveaux producteurs sont apparus comme Jinchuan group (7.000 t/an, 2017), Xinjiang Xiangsheng New Mat Tech (10.000 t/an en 2018 puis 30.000 t/an en 2019), Panzhihua Iron and Steel (15.000 t/an, 2019) et Sichuan Shengfeng titanium industry (4.000 t/an, 2019). Entre 2016 et 2019, les capacités chinoises ont augmenté de +70.000 t/an. Avant l'apparition du Covid-19, de nouveaux projets d'usine d'éponge étaient annoncés avec, à court terme, jusqu'à +30.000 t/an de capacités additionnelles. Il est probable que ces projets soient reportés compte tenu des conséquences économiques de la pandémie, voire même que la Chine reperde une partie de ses capacités de production d'éponge.

VIII.1.1 Éponge de qualité aéronautique

Les seuls producteurs qualifiés pour la production d'éponge de qualité aéronautique sont les japonais, les russes et les kazakhs. La dernière usine américaine, celle de Timet Henderson (groupe PCC) a fermé en juillet 2020. En 2020, les capacités de production de qualité aéronautique représentent 44% des capacités mondiale. La Figure 53 donne l'évolution des capacités de production d'éponge « aéronautique » comparée aux capacités totales sur la période 2006 – 2020.

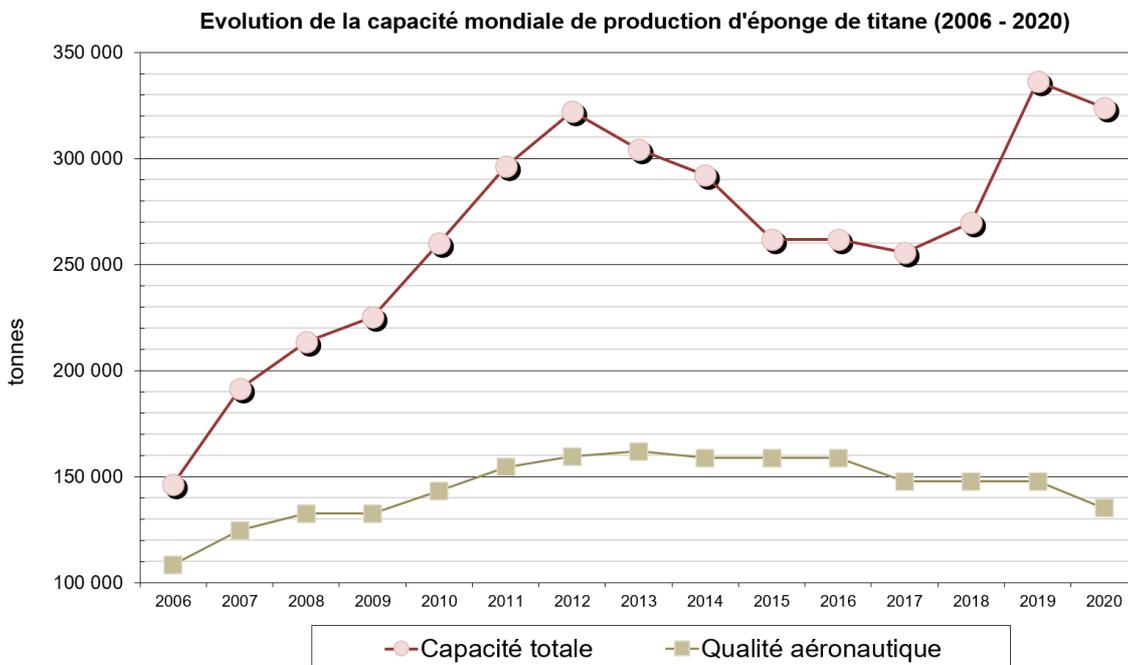


Figure 53: Capacités de production d'éponge de qualité aéronautique 2006 – 2020

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	106/158

VIII.2 Évolution de la production d'éponge

La Figure 54 donne l'évolution de la production mondiale d'éponge par pays producteur. En 2009, la chute de la production d'éponge était liée à l'écroulement de la demande lié à la crise financière et à l'importance des stocks liés aux encours de production de 2008.

En 2013 et 2014, la production a rechuté en raison de l'excédent produit en 2012. L'offre avait trop anticipé l'augmentation de la demande associée aux grands projets dans le secteur industriel (usine de dessalement de Yanbu III par exemple, voir section V.3) et la montée en cadence moins rapide qu'espérée du B787 (voir paragraphe III.3.1). Depuis, la production mondiale d'éponge n'a cessé de croître avec la demande aéronautique et la demande intérieure chinoise.

Jusqu'en 2020, la Chine était le seul pays^{rr} qui pratiquait une politique de soutien de sa filière industrielle de production par l'achat de stock de matière sous la forme d'éponge et de lingot. Ce stock, qualifié de « réserve nationale », a été constitué sur la période 2008 – 2010 (20.000 t), puis complété en novembre 2013 (+8.700 t)^{ss}. En 2020, l'état de ce stock n'est pas connu. Il est probable qu'une bonne partie a été consommée pour les programmes gouvernementaux, militaires en particulier. Depuis, il semble que les USA ait relancé un stock stratégique sous forme de lingot, voire d'éponge stockée chez les producteurs.

Le graphe de la Figure 55 donne l'évolution comparée entre capacité de production d'éponge et production effective. Dans le secteur non-aéronautique, la situation surcapacitaire est particulièrement marquée en raison de l'ouverture de nouvelles capacités en Chine en 2019.

En 2019, le taux d'emploi des capacités de production pour l'aéronautique à presque retrouvé les niveaux records d'avant la crise de 2008. L'effondrement du trafic aérien en raison du Covid-19 (voir chapitre III) va provoquer une forte chute de cet indicateur. Pour l'éponge de qualité métallurgique, le taux d'emploi en 2019 était déjà très bas en raison des nouvelles capacités de production. Compte-tenu du contexte économique de 2020, un ajustement à la baisse des capacités chinoises est possible dès 2021.

^{rr} Les USA ont mis un terme à leur stock stratégique d'éponge de titane en 2005 (voir section II.1)

^{ss} Voir section II.3

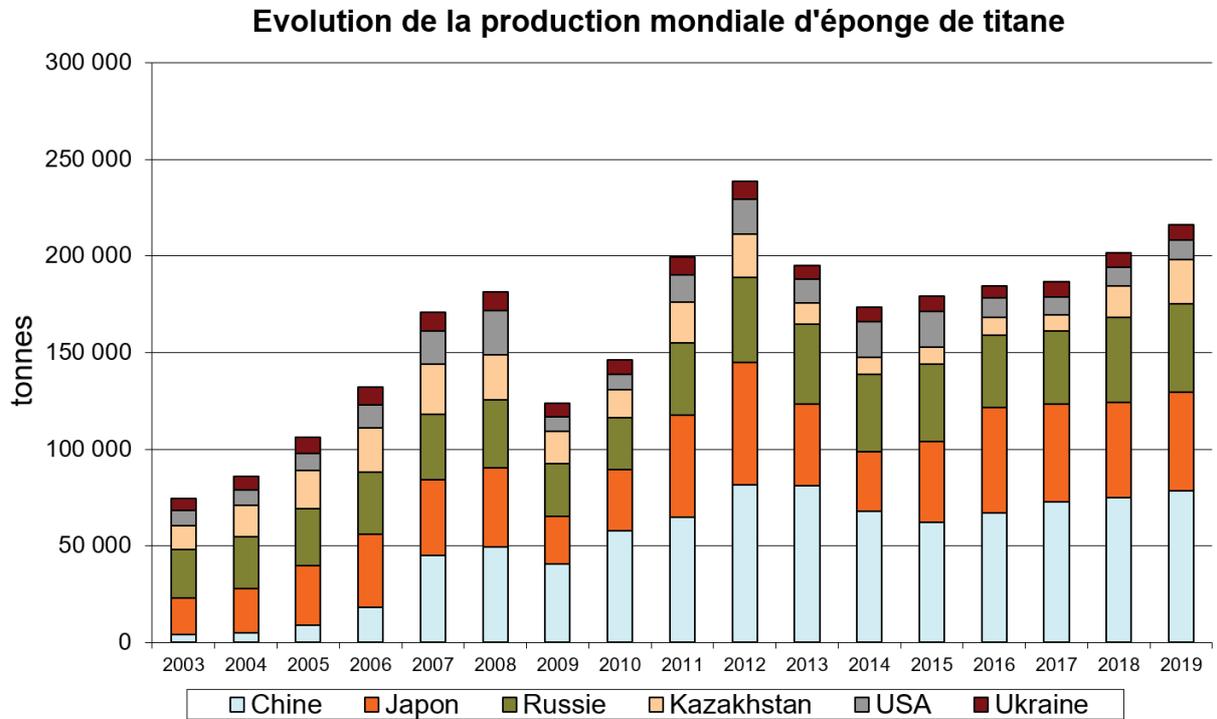


Figure 54: Évolution de la production mondiale d'éponge de titane 2003 – 2019

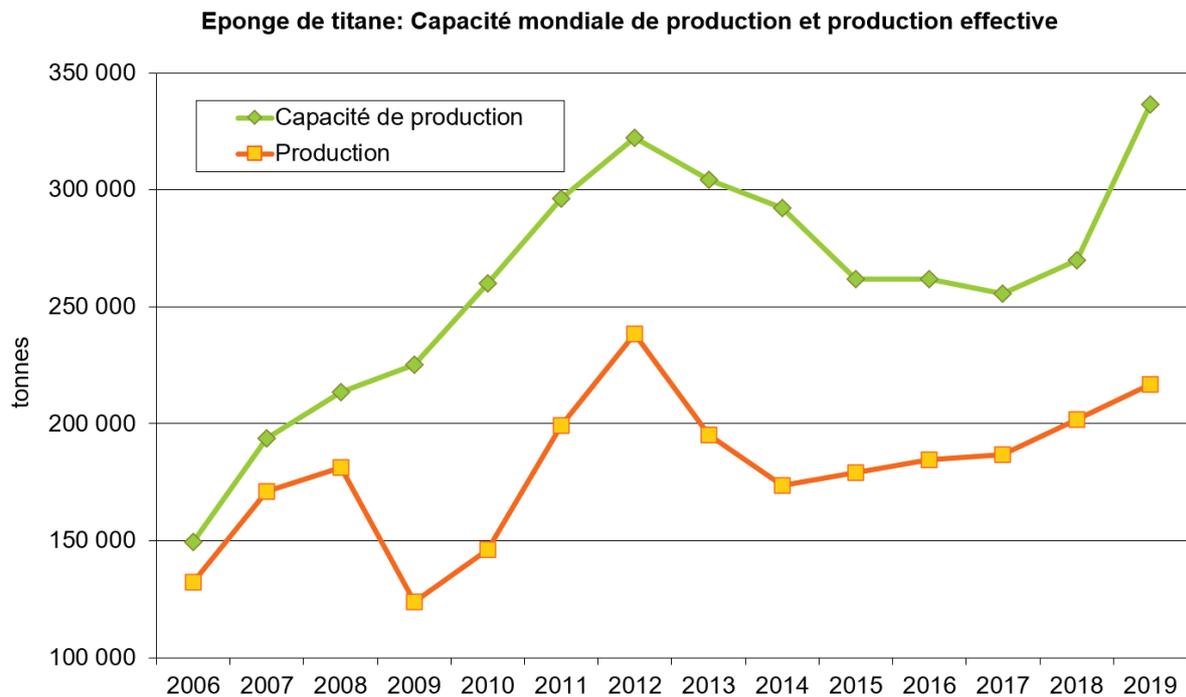


Figure 55: Capacité et de la production effective mondiale d'éponge 2006 – 2019

IX LINGOTS & DEMI-PRODUITS EN TITANE

IX.1 Évolution des capacités de production de lingot

L'évolution des capacités de fusion de lingot de titane par pays est présentée dans la Figure 56. Les volumes indiqués sont donnés en tonnes liquides puis convertis en tonnes solides avec un coefficient de pondération de 0,72^{tt} (voir calcul dans la section IX.2). Les capacités de production européennes appartenant au groupe américain Timet sont comptabilisées aux USA.

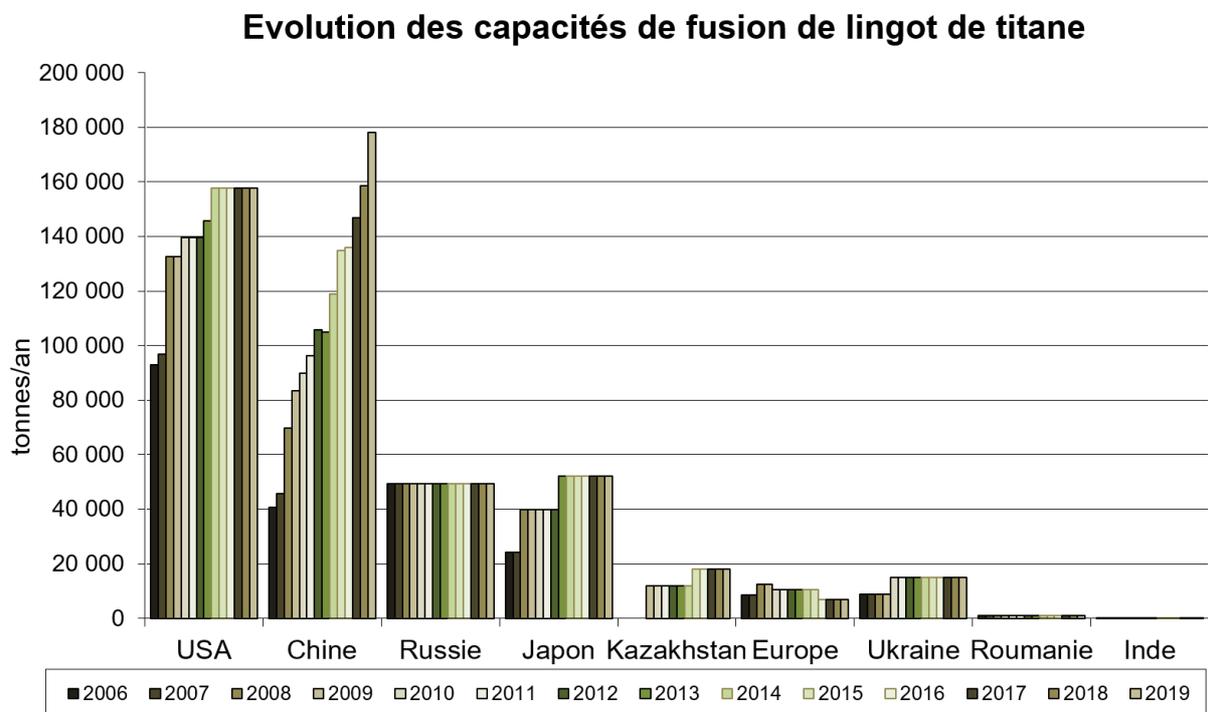


Figure 56: Évolution des capacités de fusion de lingot de titane par pays

La Chine n'a pas cessé d'augmenter ses capacités de fusion depuis 2006. En 2018, elle a rattrapé les USA et l'a dépassé l'année suivante. Globalement, la Chine et les USA concentrent respectivement 37% et 33% des capacités mondiales en 2019 qui est estimée à 478.250 t/an (voir Figure 57). Les capacités chinoises sont réparties sur un grand nombre de producteur. Quatre producteurs disposent de capacités supérieures ou égales à 10.000 t/an : Baoji (28.000 t/an), Baosteel (10.000 t/an), Jiangsu Tiangong Group (10.000 t/an) et Yunnan Titanium Industry (10.000 t/an).

^{tt} Les « tonnes liquides » correspondent à la capacité maximum de production d'un four utilisé à 100% en simple fusion. Pour tenir compte des refusions on pondère cette capacité par un coefficient C tel que : Capacité « tonnes solides » = Capacité « tonnes liquides » x C.

Capacité de production mondiale de lingots 2020
481.250 tonnes liquides

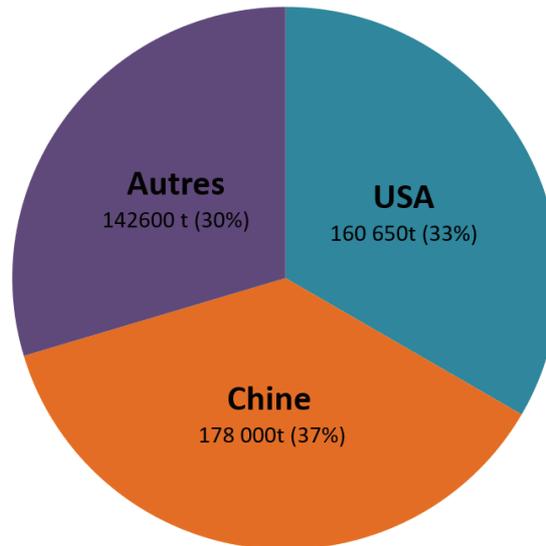


Figure 57: Capacités mondiales de fusion de lingot en tonnes liquides en 2020

On peut noter que les moyens de fusion qualifiés pour les alliages aéronautiques représentent 54% des capacités mondiales en tonnes liquides (soit 258.100 t/an). Compte tenu que ces moyens sont mobilisés en double ou triple fusion, ils représentent une capacité de fusion d'environ 100.000 t/an de tonnes solides.

Très majoritairement concentrés aux USA, les fours capables de recycler le scrap de titane (technologie EB, PAM, VIM) sont maintenant présents dans tous les pays producteurs mais ces capacités devraient encore se développer à l'avenir. Le besoin est particulièrement identifié dans les pays disposant d'une filière de transformation et de parachèvement importante comme la Chine, le Japon et l'Europe.

IX.2 Évolution de la production de lingot et de demi-produits en titane

La Figure 58 donne une comparaison entre la production effective de lingot et la capacité théorique disponible en tonnes liquides et solides. La détermination du coefficient C a été faite en s'appuyant sur l'hypothèse qu'en 2007 les capacités ont été complètement mobilisées pour la production.

Ainsi, « C » est déterminé par :

$$C = \frac{[\text{Production de lingot 2007}]}{[\text{Capacité en tonnes liquides 2007}]}$$

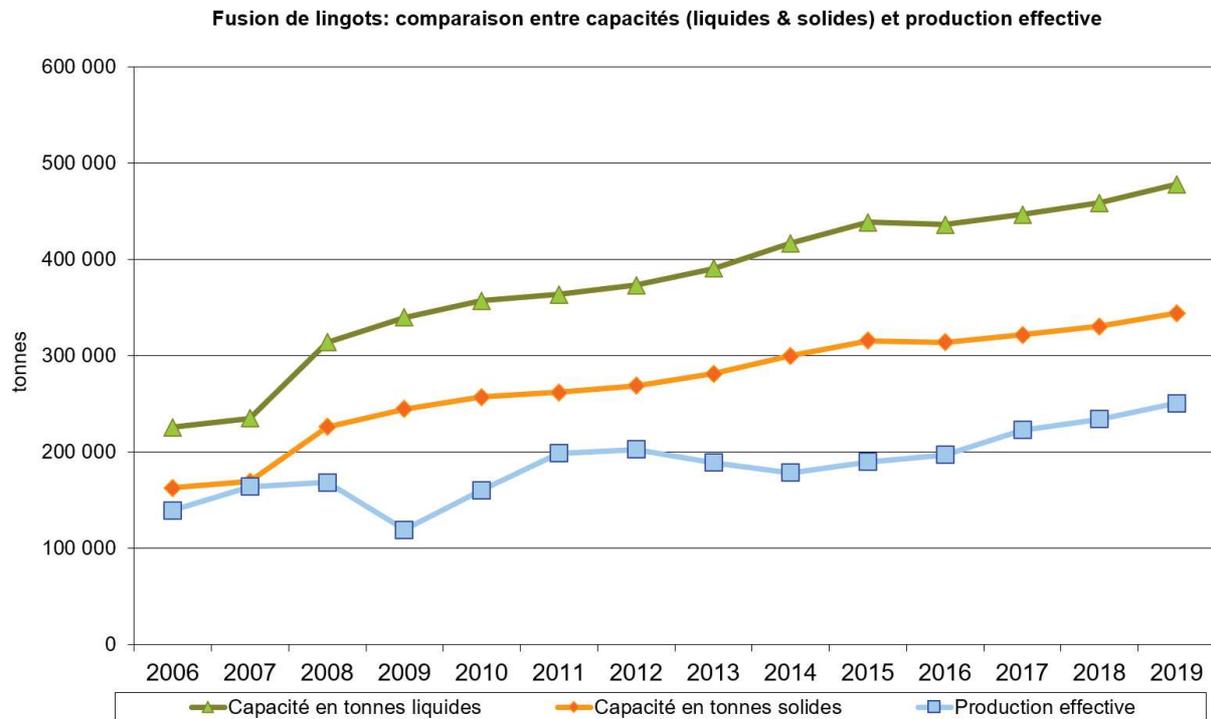


Figure 58: Capacité de fusion et production effective de lingot de titane 2006 – 2019

IX.3 Faits marquants de l'offre en lingot & demi-produits

IX.3.1 Kazakhstan

Au Kazakhstan, le producteur d'éponge UKTMP s'est intégré verticalement en se dotant d'une capacité de fusion VAR qui a démarré sa production de lingot au 2^{ème} trimestre 2010. Il a conclu un accord avec le groupe français Aubert & Duval en créant la « joint-venture » UKAD qui transforme une partie des lingots en billettes et barres pour des matricés depuis septembre 2011. L'usine de transformation des lingots kazakhs est implantée à Saint-Georges-de-Mons (63), à proximité de l'usine Aubert & Duval des Ancizes.

UKTMP a signé une seconde JV avec le sidérurgiste sud-coréen POSCO pour fabriquer des produits plats à Pohang à partir de lingots de titane fondus au Kazakhstan puis forgés en slabs et laminés en Corée. Initialement prévu pour une mise en service en 2013, le four EB de capacité 6.000 tonnes/an cofinancé dans le cadre de cette JV a été déclaré en service fin 2014. Il est destiné à fondre directement des lingots rectangulaires de titane pur (grade 1 et 2) pour alimenter la filière.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	111/158

IX.3.2 France

La JV UKAD, sous l'impulsion du groupe Aubert & Duval, a également décidé d'investir dans une capacité de fusion dédiée au recyclage des déchets de titane sur son site de Saint-Georges-de-Mons. Ainsi, la filière UKAD pourra tirer profit des effets de l'économie circulaire pour sa propre production mais elle pourra également revaloriser sur place des déchets qui, très majoritairement, sont actuellement exportés vers les USA. Le titane est recyclé dans un four plasma (PAM) adapté aux alliages tels que le TA6V. L'usine baptisée EcoTitanium a été inaugurée en septembre 2017.

UKAD a également annoncé deux investissements sur le site industriel de Florange en Moselle. L'un, nommé RecyTiAl, prévoit l'installation d'un four pilote destiné au recyclage des intermétalliques TiAl. Le second investissement porte sur la création d'un pilote de fabrication de poudre de titane^{uuu} par atomisation sous argon dans le but de produire, in fine, la matière première qui a vocation à être utilisée dans les méthodes additives de fabrication.

En 2019, à la demande des acteurs de l'industrie aéronautique, une enquête a été menée par le groupe titane pour évaluer l'intérêt de développer une offre de produits plats titane en France ou en Europe. La motivation première de cette demande était liée au constat que les sources d'approvisionnement sont restreintes à un nombre d'acteurs limité et qu'aucun d'entre eux n'est européen. Cette initiative a débouché sur l'émergence d'une filière européenne de production de produits plats associant le producteur autrichien Voestalpine BÖHLER Aerospace pour les opérations de laminage et UKAD/ECOTITANIUM pour la fourniture de brame titane. L'objectif est de qualifier cette filière en 2020/2021 et de monter progressivement en charge la production à l'horizon 2024.

IX.3.3 USA

Aux USA, les opérations de restructuration du paysage industriel se sont succédées au sein de la filière de production de titane (rachat, fusion...) avec une claire orientation vers l'intégration verticale. Le mouvement s'accompagne d'une tendance à la relocalisation sur le sol américain favorisée par la baisse du coût énergétique dans ce pays et l'augmentation de l'index du coût de production en Chine.

⇒ PCC/Timet

La première intégration d'un producteur de titane indépendant a été celle de Timet qui a été rachetée par le groupe Precision Castparts Corp (PCC) en janvier 2013. Après cette opération, PCC a consolidé en amont son outil de production. Ce rachat inclut tous les sites industriels, y compris les capacités de production au Royaume-Uni (Timet UK). Les capacités de production en France sont restées propriété de Cezus mais l'exploitation commerciale est assurée par Timet Savoie. A moyen terme, se pose la question de la pérennité de la capacité de R&D du producteur de titane et de l'éventuelle rationalisation au sein du groupe. Pour l'instant,

^{uuu} Projet Titan

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	112/158

PCC n'envisage pas de centraliser ses ressources de R&D et laisse une autonomie importante à ses filiales. En revanche, le groupe exerce une forte pression sur la rentabilité des sites européens et investi peu dans l'outil de production.

L'usine Timet d'Henderson (Nevada) a été la dernière usine de production d'éponge américaine après l'arrêt de celle d'ATI, pourtant récente, en 2016. La capacité de production d'Henderson était de 12.600 t/an mais son état général aurait justifié des investissements importants de remise à niveau. En janvier 2018, le site a connu une explosion et d'autres accidents ont révélé des problèmes de vétusté des moyens de production de Timet. Ainsi, trois accidents mortels ont eu lieu entre 2015 et 2018 sur deux autres sites de Timet, Morgantown et Witton.

En mars 2019, Timet a déposé une demande d'investigation auprès du département du commerce américain pour instruire la question de la dépendance des USA vis-à-vis de l'éponge de titane importée qui représente 60% de la demande nationale. Timet a revendiqué une taxation de ces importations ainsi que des décisions visant à soutenir la production américaine par le biais d'investissement sur les derniers moyens existants, c'est-à-dire l'usine d'éponge de Timet à Henderson, Nevada. Le producteur américain a invoqué un risque pesant sur la sécurité nationale et les capacités stratégiques de la défense. Après analyse des revendications de Timet, la Présidence américaine a pris la décision de ne pas donner de suite favorable à cette demande. Un groupe de travail américano-japonais a été créé pour sécuriser l'approvisionnement en éponge entre les deux pays. Des discussions similaires sont engagées avec le Kazakhstan. Par ailleurs, les négociations avec l'administration américaine visant à financer les \$170M nécessaires à la modernisation de l'usine d'éponge d'Henderson construite dans les années 40 n'ont pas abouti. En août 2020, Timet a pris la décision de fermer définitivement son usine d'éponge, rendant de ce fait les USA totalement dépendant de l'approvisionnement auprès des fournisseurs étrangers. La crise du Covid-19 a provoqué des vagues de licenciement et la fermeture d'usines.

⇒ **Alcoa/RTI**

Autre évènement marquant, le producteur d'aluminium Alcoa a annoncé fin 2013 la création d'une JV avec VSMPO pour développer des synergies entre les deux groupes sur la production des forgés et des matricés de grandes dimensions : train d'atterrissage, composants de voilure etc. Dans ce cadre, Alcoa exploite la forge de 50.000 t de son site de Cleveland. En mars 2015, Alcoa a racheté le dernier producteur indépendant de titane RTI. Bien que RTI ne possède pas de capacités propres de production d'éponge, son rachat a permis à Alcoa d'élargir considérablement son offre dans la gamme de ses produits forgés en aluminium et en titane.

Avant de passer sous la bannière d'Alcoa, RTI avait mené une politique active de consolidation de ses capacités de transformation en rachetant plusieurs entreprises. En janvier 2012, RTI a consolidé sa position dans le domaine du médical en rachetant Remmele Engineering. Il a également fait l'acquisition en octobre 2013 d'Osborn Steel Extrusions (Royaume-Uni) et en janvier 2014 de racheter l'entreprise Direct Manufacturing (Austin, TX)

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	113/158

dont le cœur de métier est la fabrication de pièce par méthode additive (Direct Laser Sintering, Plastic Laser Sintering).

En novembre 2016, Alcoa devient Arconic et développe des méthodes alternatives de transformation du titane comme le procédé Ampliforge® qui combine une méthode de fabrication additive par dépôt de fil (DED – Direct Energy Deposition) d’une préforme qui est ensuite matricée à chaud pour obtenir in fine une pièce proche des cotes finales dans un état écroui. En avril 2020, Arconic décide de scinder ses activités en deux entités : Howmet Aerospace et Arconic Corps. La première regroupe les activités « composants pour moteurs aéronautiques », les fixations aéronautiques, les composants structuraux et pièces forgées en aluminium (correspondant à l’ancienne division « Engineering Products et Solutions operations » du groupe) et la seconde les activités « produits plats aluminium (tôles, plaques) », les pièces extrudées aluminium (anciennement division « Global Rolled Products »). Cette scission préfigure une possible consolidation avec d’autres entités industrielles américaines. Les conséquences de la crise du Covid-19 sur le groupe sont pour l’instant inconnues.

⇒ ATI

Le groupe ATI a lui aussi réalisé plusieurs acquisitions. Il a absorbé en mai 2011 le fabricant américain de pièces aéronautique Ladish Co (produits forgés, pièces de fonderie, capacités d’usinage et de parachèvement), en février 2014 Dynamic Flowform Corp. dans le domaine de la mise en forme par fluotournage et en juillet 2018, le fabricant américain Addaero spécialisée dans l’impression 3D de pièces pour l’aéronautique et la défense.

En juin 2019, le groupe ATI a vendu son activité de fonderie titane d’Albany (Oregon) au groupe américain Consolidated Precision Products. Comme pour les autres producteurs américains, la crise du Covid-19 a provoqué des plans de licenciement et la rationalisation des moyens de production avec la fermeture d’usine. Des investissements ont également été consentis en particulier pour moderniser la production de produits plats.

⇒ Perryman

Fondé en 1988, Perryman est un transformateur indépendant spécialisé dans les barres et fils en titane. En 2011, il a annoncé le doublement de sa capacité de production de produits longs pour répondre à la demande dans le domaine des fixations aéronautiques et dans le médical. En janvier 2020, Perryman a doublé sa capacité de fusion avec la mise en service de deux nouveaux fours de fusion : un four EBM et un four VAR de refusion.

IX.3.4 Russie

En juillet 2009, l’usine « Ural Boeing Manufacturing » issue d’une JV entre Boeing et VSMPO – AVISMA a été inaugurée. Situé à Salda en Russie, ce site réalise l’usinage des grandes pièces forgées chez VSMPO qui sont ensuite expédiées aux USA pour les dernières étapes de parachèvement. Ce premier investissement réalisé en prévision du programme B787 a été complété par une deuxième tranche en 2013 pour doubler la capacité d’UBM à partir de

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	114/158

2016. L'accord prévoit également l'extension du contrat d'approvisionnement entre les deux industriels jusqu'en 2023.

Dans le cadre de la JV conclue avec Alcoa en octobre 2013, le russe prévoit de fabriquer des fixations aéronautiques. Il a également financé la rénovation de la presse de 75.000 t pour les très grandes pièces forgées.

En 2018, la ligne de production de tubes sans soudure de VSMPO Titan en Ukraine a été démantelée et installée en Russie sur le site de Salda pour remplacer les capacités vieillissantes du producteur russe.

En 2020, VSMPO a annoncé la commercialisation de poudre de titane pour les méthodes additives à un tarif très concurrentiel de 80 \$/kg. Cette poudre serait fabriquée par un procédé à base de copeau de titane.

IX.3.5 Ukraine

En 2013, le producteur d'éponge ZTMK contrôlé par le groupe DF s'est équipé d'une capacité de fusion EB permettant de fabriquer des lingots ou des slabs. Il ambitionne d'améliorer la qualité de son éponge dans le but de la qualifier pour les applications aéronautiques.

IX.3.6 Chine

La Chine compte 31 producteurs de lingot. La capacité totale aurait atteint, selon la source officielle d'information chinoise^{vv}, 178.000 t/an en 2019. La quasi-intégralité des fours est en technologie VAR. Seuls deux industriels semblent disposer d'une capacité supérieure ou égale à 10.000 t/an : Baoji et Baosteel. En 2010, Baosteel est le second producteur après Baoji à avoir mis en service un four EBCH pour la production de slabs destinés au marché aéronautique. Ces slabs devraient être transformés en produits plats pour le futur avion chinois C919. Une nouvelle presse à extruder de 6.000 tonnes a également été mise en service pour produire des tubes non-soudés.

Selon les statistiques chinoises [réf.6], une trentaine d'industriels transforme le titane en produits plats et longs.

X NOUVEAUX PROCEDES D'EXTRACTION

Nous abordons dans ce chapitre les développements technologiques qui pourraient avoir un impact sur l'offre en titane. En premier lieu, nous faisons un point de situation sur les recherches de procédé d'extraction. Sur l'ensemble des recherches et études qui sont menées⁶²

^{vv} Chinese Titanium Association

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	115/158

pour remplacer le procédé Kroll, nous passerons en revue celles qui font l'objet de développements avec un potentiel d'industrialisation :

- Le procédé FFC développé par la société Metalysis (R.-U) ;
- Le procédé Armstrong développé par le groupe Cristal (Arabie-Saoudite) ;
- Le procédé MER développé par la société MER Corporation (USA) ;
- Le procédé JTS développé par l'association JTS (Japon) ;
- Le procédé HDH développé par la société ADMA (USA) ;
- Le procédé TiRO développé par le CSIRO (Australie) ;
- Le procédé CSIR développé par le CSIR (Afrique du Sud) ;
- Le procédé Bradford développé par l'Université (USA) ;
- Le procédé de réduction développé par la société Australian Strategic Materials (Australie) et son partenaire ZironTech (Corée).

Malheureusement, aucun de ces procédés ne paraît être en mesure de réellement remplacer le procédé Kroll. Tout au plus, peuvent-ils proposer une filière de production alternative pour certaines pièces industrielles ciblées. Le développement de ces procédés suivra donc plutôt le modèle d'un marché de niche que celui d'une technologie de rupture.

Parmi les développements en cours, il faut également citer les nombreux travaux menés dans l'objectif de réduire le coût de production du procédé Kroll, en particulier en tentant de le faire évoluer d'une technologie par batch (donc discontinue) à un processus continu. Dans ce domaine, ce sont les scientifiques japonais qui mènent les travaux les plus prometteurs avec le procédé JTS. Ces travaux sont importants car ils permettraient aux producteurs japonais de réduire le coût de production de l'éponge Kroll de l'ordre de 30%. Les japonais publient très peu d'information sur le niveau de maturité de ce procédé.

Alors que les publications sur l'émergence de nouveaux procédés d'extraction du titane avaient disparu depuis 2010, une équipe de l'Université de Bradford a présenté en 2014 ses travaux sur une nouvelle approche. En août 2020, la société australienne Australian Strategic Metals a déclaré avoir produit 21 kg de titane de pureté 99,83% en utilisant le procédé d'extraction par une nouvelle méthode électrolytique mise au point par l'entreprise sud-coréenne ZironTech. Aucune information technique n'a été publiée au sujet de ce procédé qui prétend économiser jusqu'à 70% de consommation électrique.

Enfin, compte tenu de la tendance des recherches à mettre au point des procédés « poudre », nous présentons, dans la dernière section, les travaux sur les techniques de mise en forme et de transformation associées.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	116/158

X.1 Procédé FFC

Le procédé FFC est un procédé d'extraction du titane métal par réduction électrolytique qui a été inventé en 1997 à l'Université de Cambridge (R.-U.) par D. Fray, G.Z. Chen et T. Farthing. Le matériau de départ, une poudre de TiO_2 , est compactée sous la forme de galettes que l'on empile sur un conducteur métallique qui joue le rôle de cathode dans un bain de chlorure de calcium $CaCl_2$ porté à $950^\circ C$. L'anode est constituée d'une tige de graphite qui plonge également dans le bain. Lorsque l'on applique un courant électrique entre les deux électrodes, l'oxygène présent dans l'oxyde de titane s'ionise et se dissout dans le bain de $CaCl_2$, laissant le métal réduit (libéré de l'oxygène) sur la cathode. On récupère ainsi une grappe de titane métal présentant un aspect visuel proche de celui de l'éponge de titane issue du procédé Kroll. Une analyse détaillée du procédé a été présentée dans un précédent rapport⁶³.

Très prometteurs à l'échelle du laboratoire, ces travaux n'ont toujours pas abouti à une production industrielle de titane malgré les nombreux financements qui y ont été consacrés en Europe^{ww} et aux USA^{xx}. La société de statuts anglais Metalysis (South Yorkshire, R.-U.) a racheté les droits d'exploitation du brevet initial pour l'extraction de tous les métaux et alliages à l'exception de ceux contenant plus de 40% de titane. La société poursuit les travaux en privilégiant l'application du procédé à l'extraction du Tantale dont la chimie semble moins complexe que celle du titane. Pour le titane pur et les alliages contenant plus de 40% de titane, c'est la société de statut norvégien « Norsk Titanium AS » issue d'une « joint-venture » entre la société anglaise British Titanium (BTi) et le producteur d'aluminium Norsk Hydro qui poursuit la mise au point du procédé dans le Centre de Recherche de Heroya au sud d'Oslo.

En 2006, Metalysis a créé la « joint-venture » « Metalysis Titanium Inc. » avec le groupe BHP Billiton pour mener un développement conjoint sur le procédé « Polar », très proche du procédé FFC. Depuis, la société a annoncé en 2008 la mise au point d'une unité pilote semi-continue destinée à produire prioritairement de la poudre de Tantale et de TA6V. Depuis, une première unité pilote d'une capacité d'une tonne/mois aurait été mise en service fin 2010 puis, une seconde de 50 t/an opérationnelle fin 2012/début 2013.

En 2013, Metalysis a déclaré être en mesure de produire des poudres de titane en contrôlant la granulométrie pour la rendre compatible des divers procédés de fabrication par méthode additive à un coût de l'ordre de 100 \$/kg. Des pièces destinées à une application automobile ont été réalisées en impression 3D à l'Université de Sheffield à partir des poudres Metalysis (partenariat avec Renishaw).

Au niveau des moyens de production des poudres de titane, Metalysis annonçait fin 2012 la création imminente d'une unité pilote qui précéderait une usine industrielle de 10.000 t/an pour 2013-2014. Ces moyens de production ne semblent pas avoir été mis en service. En 2016, Metalysis évoquait plutôt une capacité de 10 t/an.

^{ww} Financement de la « Defence Research Agency » puis de QinetiQ (R.-U)

^{xx} « DARPA Initiative in Titanium » piloté par Timet sur financement de la « Defence Advanced Research Projects Agency »

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	117/158

En février 2014, le groupe minier australien Iluka Ressources a annoncé une prise de participation à hauteur de 18,3% dans le capital de Metalysis. Iluka bénéficiera d'une licence mondiale non-exclusive pour la production de poudre de titane par le procédé FFC et sera consulté prioritairement pour toute commercialisation sur les autres métaux : tantale, terres rares etc. Iluka assurera par ailleurs l'approvisionnement en TiO₂ à forte concentration pour alimenter les sites de production industriels de poudres FFC.

Au niveau applicatif, le projet TiPOW a été financé en 2015 pour soutenir le développement de poudre titane FFC à bas coût pour la fabrication additive. Ce projet de 3,1 M€ est piloté par GKN Aerospace et implique également le groupe Safran pour des applications train d'atterrissage.

En 2019, Metalysis a annoncé la mise en service de la 5^{ième} génération de réacteur pour la mise en œuvre de son procédé. La capacité de l'unité pilote sera de 100 à 400 kg par batch. La production concernera de la poudre de titane pur et des alliages obtenus par réduction directe d'oxydes en métal. D'autres alliages font l'objet de développements comme : des poudres d'aluminures de scandium, des matériaux magnétiques, des alliages pour applications haute température, du platine etc.

X.2 Procédé Armstrong

Dans le cadre du même programme de la DARPA cité ci-dessus, la société International Titanium Powder – ITP (USA) a été financée pour développer un procédé continu de production de poudre de titane pur et d'alliages à basse teneur en O₂ pour les applications navales. Le principe d'obtention de la poudre par réduction chimique consiste à faire circuler des vapeurs de TiCl₄ dans un réacteur contenant un bain de sodium. La poudre présente une morphologie irrégulière semblable à du corail plutôt adapté à une consolidation directe de poudre. En contrôlant l'adjonction de composés chlorés de type AlCl₃ et VCl₄ on peut obtenir directement des poudres pré-alliées. Plus généralement, le procédé permet également de produire en continu nombre de métaux pouvant se présenter sous la forme d'halogénures volatiles. Le procédé a été présenté en détail dans un précédent rapport [réf.53].

La société ITP a été rachetée en 2008 par le groupe international d'origine saoudienne Cristal⁶⁴ offrant ainsi au procédé Armstrong une source d'approvisionnement intégrée en TiCl₄. Rebaptisé Cristal Metals, l'industriel a annoncé fin 2010 la construction d'une usine pilote assistée d'un centre de R&D à Lockport (Illinois, USA) et d'une usine de production à Ottawa (Illinois, USA). La poudre de TA6V produite viserait la fourniture de plaques transformées par laminage direct pour les blindages de l'US Army. La capacité de l'usine était annoncée à 2.000 t/an de poudre. Le catalogue de Cristal Metals propose du titane pur et du TA6V sous la forme de poudres, de poudres mouillées et de briquettes pré-compactées.

Toutefois, bien que l'activité industrielle ne semble pas s'être développée à ce jour (fin 2020), des publications scientifiques font état de travaux de recherche autour d'une méthode de fabrication additive par pulvérisation à froid de poudre de titane obtenue par le procédé Armstrong⁶⁵.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	118/158

X.3 Procédé MER

Le procédé électrolytique MER⁶⁶ développé par la société MER Corporation (Materials & Electrochemical Research Corp., USA) vise à corriger les inconvénients du procédé Kroll en provoquant la transformation in situ du TiO₂ en TiCl₄ puis en Ti. En évitant que la réaction s'initie sur les parois du réacteur comme c'est le cas dans le procédé Kroll, cette approche permet d'une part d'être entretenue dans un processus continu et d'autre part d'éviter la contamination par le fer. Le produit de réaction est une poudre de titane pur ou une poudre alliée si des chlorures métalliques sont introduits dans le réacteur pendant le processus.

Bien que la faisabilité de différentes pièces en titane^{yy} élaborées à partir de poudres MER et consolidées par prototypage rapide ait été démontrée, les débouchés industriels ne semblent pas aboutir. Les dernières publications associées au financement de la technologie par l'EPA^{zz} aux USA datent de 2011 et, sur le plan scientifique, un travail de thèse⁶⁷ datant de 2017 fait état des dernières avancées sur le procédé de production.

La commercialisation du procédé MER est assurée par la société MER Holdings LLC qui développe de nouvelles technologies dans le domaine des matériaux et des procédés. Elle valorise, entre-autres, les brevets MER et travaille sur les procédés de mise en forme comme l'impression 3D. Les moyens de R&D sont basés à Tucson (Arizona, USA).

X.4 Procédé JTS

Du nom de l'association japonaise du titane qui coordonne son développement, le procédé JTS est une évolution du procédé Kroll qui vise à produire du titane par un processus semi-continu. Ces travaux qui impliquent les deux producteurs japonais d'éponge Toho et Osaka Titanium Corp. et Kobe Steel sont financés par le Ministère de l'Industrie japonais.

Le procédé fonctionne en boucle fermée. Il utilise du TiCl₄ issu du procédé classique de chloration tel qu'on peut le trouver dans le procédé Kroll. Le TiCl₄ est injecté dans un réacteur et réduit en particules de titane dans un bain de calcium qui se recombine avec le chlore et est recyclé dans une cellule d'électrolyse fonctionnant en boucle fermée avec le réacteur. Les particules de titane sont entraînées en aval du réacteur et fondues par l'action d'un plasma ce qui permet d'isoler le titane du bain de CaCl₂.

Le principe n'est pas très éloigné du procédé Kroll si ce n'est que le magnésium est remplacé par le calcium dans la réaction de réduction. Le progrès le plus important réside dans le fait que le processus de réduction est continu et qu'il permet de supprimer l'étape de récupération du titane telle qu'elle apparaît dans la technologie par batch du procédé conventionnel. De ce fait, les Japonais estiment que le gain sur les coûts de production est de l'ordre de 30%.

^{yy} Plaques de protection balistique en alliage de titane et réalisation d'assemblages TiB₂/Ti par PTA (Plasma Transfer Arc)

^{zz} United States Environmental Protection Agency

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	119/158

La première ligne de production industrielle était prévue pour 2010 mais aucune annonce officielle n'a été faite pour confirmer cette échéance. Les industriels japonais n'ont pas donné de précision sur les niveaux de qualité du titane issu de ce procédé mais il semble être plutôt destiné aux applications ne nécessitant pas des matières de qualité supérieure.

X.5 Poudres d'hydrure de titane (procédé HDH)

Les poudres d'hydrure de titane (TiH_2) ont été mises au point initialement en Ukraine par des instituts de recherche et produites par ZTMK depuis 1990. Le procédé HDH vise à produire de la poudre de TiH_2 par un procédé Kroll modifié où le Mg liquide est partiellement remplacé par du H_2 gazeux pour la réduction du $TiCl_4$. La poudre ainsi obtenue est ensuite consolidée sous la forme de lingots puis transformées par les procédés conventionnels de métallurgie des poudres, filage, laminage, forgeage etc. Lors de la fabrication du lingot l'hydrogène est éliminé par chauffage et atteint des niveaux compatibles avec les exigences normatives.

Le procédé est maintenant est développé aux USA par la société ADMA⁶⁸ créée par les scientifiques ukrainiens à l'origine de l'invention. Selon le modèle technico-économique mis en avant par ADMA, la poudre HDH aurait un coût de revient comparable à l'éponge Kroll ce qui offre un avantage concurrentiel qui, au final, ne semble pas si important. La Figure 73 en annexe XXXII illustre les diverses voies possibles de mise en forme de produits issus de la poudre d'hydrure de titane.

ADMA a annoncé avoir bénéficié en 2012 d'un financement du Congrès américain^{aaa} pour construire une unité pilote à Twinsburg (Ohio, USA) de capacité 110t/an. La matière produite est destinée à des applications critiques (défense, aéronautique etc.). ADMA devrait ensuite augmenter la capacité de production jusqu'à 2.000 t/an en 2014/2015 puis, à partir de 2016, il est envisagé la construction d'une nouvelle usine à Sheffield Village (Ohio, USA) de capacité 20.000 t/an. Fin 2020, l'état d'avancement de ces projets n'est pas connu.

Par ailleurs, l'Université de l'Utah aux USA a développé une approche alternative pour l'emploi direct des poudres de TiH_2 selon un procédé de métallurgie qui tire profit de l'excellent comportement à la compaction de ces poudres. Ainsi, il a été prouvé que l'on pouvait obtenir directement des taux de densification supérieurs à 99%, sans frittage sous pression ni post-traitement. Les avantages du procédé résident dans :

- La capacité à contrôler la microstructure et la taille de grain en jouant sur la température et la pression d' H_2 pendant le frittage ;
- Le gain important sur le coût de fabrication des pièces ;
- La pureté des poudres et la sécurité de manipulation car les poudres de TiH_2 ne s'oxydent pas à l'air ;

^{aaa} Defense Appropriations Act Congressional Award

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	120/158

- La bonne cinétique de densification par l'autodiffusion du titane pendant le frittage.

X.6 Procédé TiRO

Le procédé TiRO est développé par l'organisation australienne CSIRO^{bbb}. Basée sur le même principe que Kroll, le procédé TiRO permet de produire du titane métal par réduction continue de $TiCl_4$ par le Magnésium. La différence porte sur le fait que les particules sont réduites alors qu'elles sont portées par un lit gazeux dans un réacteur. De ce fait, le procédé permet par un processus continu d'obtenir des particules métalliques directement sous la forme de poudres de granulométrie contrôlée. Ces poudres sont utilisables dans les méthodes de fabrication additive mais aussi le frittage par pressage isostatique à chaud (HIP), l'injection métallique (MIM), l'injection métallique par poudre (PIM), le formage laser, le dépôt cinétique de poudre à froid (Gas Dynamic Cold Spray - GDCS) etc.

Une première démonstration a été réalisée en laboratoire avec un réacteur permettant de produire 200 g/heure de poudre de titane. En 2013, une unité pilote offrant une capacité de 2 kg/h a été réalisée en partenariat avec le chimiste Coogee Chemicals sur leur site de Laverton (région de Victoria). La poudre est destinée à être utilisée pour les projets de CSIRO mais aussi à être commercialisée. Le procédé serait prêt pour une industrialisation. Les marchés visés sont : le médical, l'automobile, les tubes pour les applications industrielles.

X.7 Procédé CSIR

CSIR^{ccc} est un organisme sud-africain de recherche et développement qui a pour mission de valoriser les ressources nationales, minières en particulier. Compte tenu de la présence de riches gisements de titane, le CSIR a développé son propre procédé continu de production du titane métal par réduction du $TiCl_4$ en bain de sel⁶⁹.

En septembre 2012, CSIR a annoncé la signature d'un accord avec Airbus et Aerosud pour développer la technologie de fabrication additive par fusion laser de poudre (Laser additive Manufacturing – LAM). Le projet prévoit de démarrer une unité pilote en 2013 qui utiliserait les poudres (titane pur et alliages) fabriquées par CSIR à partir du 2^{ième} trimestre 2013 au rythme de 2 kg/h. Une publication de 2018⁷⁰ fait état des avancées récentes. En 2020, les travaux de développement du procédé semblent toujours actifs sur le plan de la recherche et du développement.

X.8 Procédé Bradford

En 2014, l'Université de Bradford a présenté ses travaux de laboratoire ayant pour objectif de réduire directement le TiO_2 (anastase) par réaction avec du calcium⁷¹. Le procédé présente l'intérêt de consommer très peu d'énergie (3.500 kJ/kg) en comparaison du procédé

^{bbb} Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation

^{ccc} Council for Scientific and Industrial Research

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	121/158

Kroll (335.000 kJ/mol) ou même du procédé FFC (125.000 kJ/mol). La réaction chimique est rapide puisque le cycle se déroule en 5 heures seulement (Kroll: 2 semaines, FFC: ~15 heures). A l'issue du processus, l'Université de Bradford a obtenu une éponge de pureté > 98% mais la démonstration n'a été faite que sur de très faibles quantités (100 g). Les travaux futurs porteront sur une étude de faisabilité pour transformer une quantité de 1 à 5 kg, la mise au point d'un procédé d'électrolyse pour recycler le Ca et l'application du procédé à d'autres métaux (Zr, Ta, Hf).

XI INNOVATIONS DANS LES PROCÉDES DE MISE EN ŒUVRE

XI.1 Technologies de fabrication additive

Par opposition aux procédés traditionnels de fabrication où on « retire » de la matière pour arriver au produit dans sa forme finale, la fabrication additive désigne *les procédés de mise en forme d'une pièce par ajout de matière, par empilement de couches successives. C'est aussi le nom donné à la technologie d'Impression tridimensionnelle (impression 3D)*⁷². Ces procédés sont, dans la majorité des cas, assistés par ordinateur.

Le premier avantage des méthodes additives est la réduction des déchets de production avec un impact espéré sur le coût de production et la réduction du « buy-to-fly » pour l'aéronautique. Comme les poudres utilisées sont issues des méthodes traditionnelles de production par atomisation (plasma, pulvérisation sous gaz, électrode rotative etc.), l'avantage économique des procédés additifs perd de son intérêt puisque les poudres elles-mêmes sont élaborées à partir de lingots de fusion. Malgré cela, les possibilités nouvelles en termes de géométrie ont mené à l'industrialisation de pièces de forme complexe où le gain économique est obtenu par la simplification de la gamme de fabrication.

La communauté scientifique et technique est mobilisée pour tenter de valoriser les poudres issues des nouveaux procédés d'extraction (FFC, Armstrong, ADMA etc.) avec les méthodes additives afin de cumuler les intérêts économiques des deux approches. Le principal écueil est que, pour l'instant, ces nouvelles poudres présentent des caractéristiques (morphologie des particules, tailles, répartition granulométrique, homogénéité etc.) non compatibles avec ces nouveaux procédés de consolidation.

Dans les techniques additives applicables au titane, on distingue :

- Les techniques par fusion qui consolide des grains de poudre grâce à l'apport thermique d'un laser ou d'un faisceau d'électrons déplacé sur la surface d'un lit de poudre (Electron Beam Melting (EBM) et Laser Beam Melting (LBM)). De telle méthode permettent de fabriquer des pièces de A à Z avec des formes géométriques quelconques ;
- Les techniques par déposition où l'apport de métal est fait soit par une buse projetant de la poudre placée sur l'axe de la tête laser (Laser Metal

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	122/158

Deposition) soit par la fusion sous faisceau ou par effet Joule d'un fil d'apport. La technique permet de fabriquer des pièces complètes mais également de procéder à des réparations par rechargement de matière sur des pièces existantes ;

- La technique de déposition par projection cinétique^{ddd}.

XI.2 Développements industriels

Les USA sont leader dans le domaine mais l'activité est également importante au Japon, en Europe et en Chine.

La société norvégienne Norks Titanium Components (NTIC) développe une technologie de consolidation par dépôt plasma pour la production de pièces en titane (technologie PTA - Plasma Transfer Arc). Le procédé aussi appelé « Rapid Plasma Deposition - RPD », permet grâce à une torche plasma robotisée de réaliser des pièces proches des cotes finies par consolidation progressive, couche par couche. La matière de consolidation est apportée sous la forme d'un fil d'apport. Cette technologie permet d'envisager la fabrication de pièces de structure aéronautique pouvant aller jusqu'à 200 à 300 kg. Actuellement, le procédé utilise comme matière première de l'éponge approvisionnée au Japon et du fil titane acheté aux USA. Toutefois, la société Norks Titanium poursuit ses recherches pour réduire le coût des matières premières. Des travaux sont en cours sur différents procédés électrolytiques, dont le procédé FFC et sur de nouvelles technologies de production directe de fil titane.

La société norvégienne a annoncé en 2016 la création d'une usine à Plattsburgh dans l'Etat de New-York. La filiale américaine de Norsk Titanium a reçu commande de l'Etat de New-York de 20 machines Merke IV RPD dans le cadre du programme de coopération technologique et industriel avec Alcoa. Ce site industriel aura une capacité de production de 400 t/an (environ 22 t/an/machine) opérationnelle en 2017. La cadence annoncée est de 6 kg/h, pour réaliser des pièces pouvant atteindre jusqu'à 1 mètre d'envergure. Le coût annoncé est de l'ordre de 55 \$/kg au niveau de la pièce ébauchée avant usinage de finition. Le projet prévoit à terme un doublement de la capacité à 800 t/an avec un doublement du parc machine (40 machines au total).

Aux USA, le groupe GE a également investi dans les techniques additives en rachetant deux acteurs européens du secteur, le suédois Arcam AB et l'allemand SLM Solutions Group. Ces deux entreprises étaient précurseurs du développement des techniques additives de production par voie de lits de poudre.

Ainsi, vu l'intérêt grandissant pour ces nouvelles technologies, la filière émergente de production par méthodes additives est captée par les grands groupes. On peut regretter que l'effet d'enrichissement de l'offre par des solutions alternatives de production ne bénéficie pas au plus grand nombre.

^{ddd} Voir plus loin le procédé « Joule Printing »

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	123/158

La majorité des techniques additives utilise des poudres de titane dont la demande est en forte progression. Lockheed Martin prétend utiliser plus de 900 pièces fabriquées par de telles méthodes dans des applications non structurales sur l'avion de combat F35 Lightning II. D'autres développements ont été réalisés comme par exemple la fabrication des pièces d'attache pour l'A350XWB d'Airbus par LZN (Laser Zentrum Nord).

L'émergence des méthodes additives étant assez récente, la Chine a pu investir très tôt dans la recherche. Les premiers développements datent de 1995 et ont été axés sur les méthodes de dépôt laser (LMD) à l'Université d'Aéronautique de Pékin et à l'Université Polytechnique du Nord-Ouest. Selon les publications chinoises, des pièces seraient en service sur les avions de combat J-15, J-16 et J-20 ainsi que sur l'avion de transport Y-20. Des pièces seraient également à l'étude pour le programme civil C919. Au niveau R&D, les chinois communiquent sur leur capacité à fabriquer des pièces de très grandes dimensions comme une poutre titane de plus de 3 mètres et un cadre titane pour structure d'avion de combat.

Pour exploiter les poudres aux morphologies irrégulières issues des nouveaux procédés d'extraction, de nombreux travaux sont menés pour mettre au point des méthodes de consolidation adaptées à ces poudres : laminage direct, extrusion directe, consolidation de poudre, injection rapide de poudre, compactage dynamique etc. In fine, ces nouvelles méthodes aboutiraient à de nouvelles filières de production en parallèle des filières traditionnelles « éponge – lingot – ½ produits – produits ».

Les procédés qui visent à écrouir la matière après la phase de consolidation sont particulièrement intéressants car ils permettent d'améliorer les caractéristiques métallurgiques et thermomécaniques des pièces fabriquées. Ainsi, le groupe Alcoa a développé une voie alternative de fabrication de pièces titane de grande dimension par un procédé combinant la méthode RPD et la forge (procédé Ampliforge). L'Université de Cranfield au Royaume-Uni propose un post-traitement d'écrouissage par laminage directement sur le cordon déposé par RPD.

La rentabilité des procédés de fabrication additive par lit de poudre est intimement liée au recyclage de celle-ci. La société LPW (Carpenter Additive) a présenté une analyse critique de ces règles, qualifiées « d'empiriques » par LPW. Dans un cas d'étude publié⁷³, un calcul de volume de poudre recyclé est estimé à 23,5 tonnes pour une quantité approvisionnée de 315 tonnes (7,5%). La perte matière se limite dans ce cas à seulement 3 tonnes au lieu des 26,5 t perdues sans recyclage. Sans recyclage, la perte de matière serait de 26,5 t. Selon LPW, le nombre de fois où la poudre est recyclée peut atteindre 10 itérations ce qui pose la question de la méthode de tri des grains de poudre pour en exclure les grains pollués par les procédés de fabrication. LPW explique le mécanisme d'oxydation des grains affectés par le faisceau laser lors de la fusion. En particulier, il est expliqué comment les grains présents dans la zone affectée thermiquement sont pollués par l'oxygène et l'azote. Une méthode de tri par analyse d'image est présentée pour repérer les grains oxydés avant recyclage de la poudre.

Singulière par son principe, la méthode de fabrication additive par projection cinétique (pulvérisation) de poudre de titane à froid (<100°C) a été industrialisée par l'entreprise

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	124/158

publique australienne Titomic sous l'appellation « Titomic Kinetic Fusion© » TKF®. Le procédé développé par l'Agence Nationale de Recherche australienne CISCO est dérivé de procédés de mise en forme d'origine russe. La cohésion de la pièce issue du procédé est obtenue par empilement sur une pièce martyre des particules de poudre qui se déforment plastiquement à l'impact sous l'effet cinétique. Les principaux avantages de la technologie sont :

- L'absence de problème d'oxydation et de distorsion thermiques car les particules ne sont pas portées en fusion ;
- La vitesse de fabrication des pièces ;
- La possibilité de fabrication de pièces de grande dimension ;
- La possibilité de réaliser des assemblages hétérogènes.

Pour répondre à la demande en poudre de qualité et à coût compétitif, les producteurs de titane développent l'offre. Le producteur russe VSMPO a annoncé la commercialisation de poudres de titane pour les méthodes additives à un tarif très concurrentiel de 80 \$/kg. Cette poudre serait fabriquée par un procédé à base de copeau de titane.

En octobre 2019, le suédois Sandvik a annoncé un investissement de 20 M€ pour la création d'une usine de production de poudre de titane et de zirconium à Sandviken et dont le démarrage est prévu pour 2020. La méthode utilisée est le procédé Osprey® par atomisation EIGA (Electrode Inert Gas Atomization). La production destinée à alimenter les besoins de l'industrie de production par méthodes additives et par frittage isostatique à chaud. Les qualités de poudre produites seront, dans un premier temps, centrées sur le TA6V et le TA6V ELI (Extra Low Interstitials – grade 23). Les moyens de production comprendront également 3 fours VAR pour titane et zirconium, une capacité de forge et étirage de barres, et la mise en forme de tubes sans soudures.

Le producteur japonais OTC également a présenté en 2019 ses développements sur un procédé de production directe de poudre destinée aux procédés de fabrication additive. Comme VSMPO, OTC a annoncé avoir mis au point un procédé pour le recyclage poudres par une méthode inspirée du procédé Kroll. Les moyens de production d'une capacité de 100 t/an ont vocation à être installés sur le site d'Amagasaki et mis en service en 2020. OTC cible les marchés de l'aéronautique et du médical en priorité. Selon le producteur japonais, la demande en poudre de titane passera de 300 t/an environ actuellement à près de 3.000 t/an en 2026. La plus forte demande vient du secteur médical. OTC a, par ailleurs, conclu un accord en mars 2019 avec Titomic pour distribuer la technologie TKF au Japon.

Autre méthode additive originale, la société Digital Alloys (Massachusetts, USA) a levé des fonds en août 2018 pour développer une nouvelle méthode de fabrication additive baptisée « Joule Printing ». Boeing et Lincoln Electric sont rentrés au capital de cette startup. Le procédé consiste à utiliser l'effet Joule (chauffage par dissipation d'énergie électrique) pour obtenir la fusion d'un fil d'apport en titane et procéder au dépôt continu par contact du fil sur le substrat de solidification. L'intérêt de la technologie réside en particulier dans l'instantanéité

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	125/158

du chauffage permettant des vitesses de dépôt élevées et une consommation électrique limitée (typiquement : 5-10 kg/heure pour une consommation inférieure à 1 kWh/kg). Les densités des dépôts dépassent 99,5% et la métallographie obtenue est isotrope. Les propriétés mécaniques sont comparables au matériau de base et les pièces obtenues peuvent se passer de traitement thermique. Grâce à l'emploi de fil d'apport, la perte de matière est minimale et le besoin de recyclage limité (avantage vis-à-vis des poudres). Digital Alloys cible la production de pièces en titane, base nickel, aciers inox, aciers durs... Comme toutes mes méthodes par dépôt de fil, l'état de surface médiocre nécessite un usinage de finition. Par ailleurs, les dimensions de pièce limitées par la taille de la machine. Le modèle économique de Digital Alloys est basé sur la vente des machines à partir de 2020. Les marchés visés sont : l'aéronautique, les biens de consommation, l'automobile...

XI.3 Développements dans les technologies de soudage

Les développements de technologies de soudage automatisées⁷⁴ pour la réalisation de grandes structures mécanosoudées se poursuivent aux USA (EWI) et au Royaume-Uni (TWI): soudure hybride laser + arc pulsé (GMAW-P), soudure linéaire par friction (Friction Stir Welding – FSW). Ces développements permettent d'envisager des réalisations dans de nombreux domaines : pièces de structures aéronautiques, superstructures navales, structures militaires terrestres aérotransportable (canons, caisses de véhicules). La technologie très prometteuse du FSW nécessite encore des améliorations sur la durée de vie des outils pour l'application au titane.

Dans le domaine de l'assemblage multi-matériaux, EWI a mis en évidence le potentiel des techniques de soudage en phase solide assistées par ultrason (Ultrasonic Additive Manufacturing – UAM). L'effet de malaxage de la matière à l'état solide comparable au FSW est obtenu, dans cette technique, par la vibration de l'outil sous lequel défilent les couches de matériaux métalliques à assembler. Des pièces de démonstration présentant des panneaux sandwich pour applications à fort gradient thermique ont illustré un exemple d'assemblage de feuillards combinant des alliages réfractaires (Mo, Ta, Nb...) avec des alliages « froids » (Titane, inox...).

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	126/158

CONCLUSION

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	127/158

XII CONCLUSION

Le prix spot sur le marché libre européen de l'éponge de titane de qualité métallurgique est resté relativement stable entre 6\$/kg et 8\$/kg depuis 2017. En comparaison, le prix de l'éponge sur le marché intérieur chinois a suivi une tendance haussière à des niveaux supérieurs, entre 8 et 12 \$/kg, avant de chuter brutalement sur l'année 2020 pendant la crise du Covid-19. Début 2021, les deux indicateurs de prix sont à des niveaux proche de 8,5/9 \$/kg. Sur la même période, le prix du scrap de titane (copeau de TA6V) a oscillé à des niveaux bas compris entre 1 et 3 \$/kg sur les marchés européens et américains avant de subir une forte augmentation sur les derniers mois de 2020 causée par une demande de matière de l'industrie sidérurgique pour la fabrication de ferrotitane.

Les alliages de titane sont élaborés grâce à l'adjonction d'éléments d'addition. Le vanadium est l'un des plus utilisés, il rentre dans la composition du TA6V par exemple, dans des proportions qui peuvent avoir un effet perceptible sur le coût de production de l'alliage. A partir d'octobre 2017 et pendant 12 mois, son prix a été multiplié par 3 en raison de la forte demande en lien avec le marché de la construction en Chine (nouvelle réglementation sur les armatures de béton). Depuis, les conditions de marché se sont détendues mais l'émergence de nouvelles applications comme les batteries au vanadium sont de nature à provoquer de nouvelles flambées des prix.

Du côté de la demande mondiale, la segmentation du marché du titane s'organise autour de deux grands domaines, les applications industrielles (chimie, énergies fossiles, nucléaire etc.) et l'aéronautique, et deux secteurs moins développés que sont les biens de consommation et le militaire. Avant la crise du Covid-19, la demande en titane a atteint un niveau record avec plus de 160.000 tonnes de titane consommé. Le marché du titane est cyclique, le dernier pic de consommation datait de 2011 (120.000 tonnes) suivi d'un point bas de la demande en 2013 avec 106.500 tonnes. En moyenne sur les sept dernières années, la consommation de titane a augmenté de 6,2%/an. Les effets économiques de la pandémie de Covid-19 se sont traduits par une chute brutale de la demande en 2020, surtout à cause de l'effondrement de l'activité aéronautique. Notre estimation est une chute de la consommation de titane de -30% en 2020 (113.000 tonnes) et une poursuite de la tendance à la baisse en 2021 avec un point bas cette année-là avec seulement 90 .000 tonnes de titane qui serait consommé au total. Selon ces prévisions, la crise aura fait chuter la demande de -45% entre 2019 et 2021. Au-delà, le rythme de croissance est estimé à environ 12%/an à l'horizon 2026 avec un retour au niveau de consommation de 2019 en 2027.

⇒ **Marché aéronautique**

Le titane est un métal indispensable à l'industrie aéronautique. Il est utilisé sous différentes formes dans les parties structurales et les moteurs en raison de ses bonnes performances mécaniques spécifiques (rapportée à sa densité). En particulier, son emploi s'est développé significativement avec l'introduction des matériaux composites pour les fuselages dans les derniers programmes long-courriers A350 et B787. Cette augmentation importante de

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	128/158

la consommation de titane a stimulé ces dernière années la recherche de solutions techniques en faveur de la réduction du ratio « buy-to-fly » (titane acheté/titane volant) et à une meilleure valorisation économique des déchets (récupération, recyclage etc.).

Pour les futures générations d'aéronefs (horizon 2035), les enjeux de conception reposent encore sur l'adoption de solutions matériau à hautes performances spécifiques dans un but d'allègement des structures. Le titane devrait donc y trouver sa place grâce à sa bonne compatibilité sur le plan des performances mécaniques, de la dilatation thermique et de la tenue au vieillissement avec les composites base carbone. Concernant les principes de propulsion de prochaine génération, l'avenir de l'emploi du titane est plus incertain. Tout dépendra des choix technologiques entre les principes de propulsion thermique et l'électrique.

Du côté de la consommation de titane aéronautique, les augmentations globales de cadences de production et l'introduction des nouvelles générations d'avions en composite ont eu pour effet de multiplier la demande par 2,5 en 10 ans. Elle est passée de 29.500 à 73.500 tonnes entre 2009 et 2019. L'arrivée du Covid-19 a chamboulé la donne pour le secteur aéronautique, à court, moyen et long terme. En 2020, les restrictions sur les déplacements pour limiter la propagation de l'épidémie ont eu pour effet de réduire de -67% le nombre de passagers. Les vols long-courriers ont particulièrement été impactés (-72%) avec la fermeture des frontières, les restrictions sur les voyages d'affaires etc. La reprise du trafic est espérée en milieu d'année 2021 avec un retour au niveau d'avant crise à l'horizon 2023 – 2025. A court terme, la crise a accéléré la fin des jumbos jets (B747, A380) dont les derniers exemplaires seront assemblés en 2021/2022. Le segment des avions court-courriers (A220, A320, B737) est porté par une attente forte de la clientèle commerciale pour les vols intérieurs et régionaux. Ceux-ci ont relativement bien résisté à la crise et ils pourraient bénéficier d'une évolution structurelle du trafic aérien au profit d'une régionalisation des trajets et la fin des réseaux en étoile. Les perspectives sont plus incertaines pour les long-courriers à cause des possibles effets à long terme de la crise du Covid-19 sur les habitudes de consommation : moins de voyages d'affaires, réduction de l'impact environnemental, avihonte^{ccc} etc. Les avionneurs se sont adaptés aux effets de la crise en baissant très fortement leurs cadences de production. La situation est particulièrement critique pour Boeing déjà impacté avant la crise par des problèmes techniques graves sur le B737MAX à partir de mars 2019 et sur le B787 en décembre 2020. Avec 450 avions B737MAX parqués en attente de livraison fin 2020, des annulations en cascade et des stocks matières importants sur toute la chaîne de valeur, les perspectives de reprise de la consommation de titane pour Boeing sont retardées d'au moins 9 mois. En conséquence, les effets combinés de la crise de Covid-19 et de celle de Boeing impliquent une baisse de la consommation de titane estimée à -50% en 2020 et de -60% en 2021. Au total, elle chuterait en 2 ans de 73.500 tonnes à 14.700 tonnes soit -80%. Selon nos projections, la reprise de la demande sera modeste en 2022 avec un redémarrage d'abord pour les motoristes des avions monocouloirs. L'activité chez Airbus sur l'A320 pourrait retrouver son niveau d'avant la crise début 2023 tandis que Boeing ne sera encore qu'à 50% de ses cadences sur le B737MAX. Les perspectives incertaines pour la demande en avions long-courriers et l'état des carnets de commande actuels conduisent à des projections de cadences de production réduites.

^{ccc} Honte de prendre l'avion, *flight shaming*.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	129/158

Ces programmes étant les plus gros consommateurs de titane, les perspectives de reprise de demande en titane dans le secteur aéronautique à l’horizon 2026 restent inférieures d’environ un quart au niveau pré-Covid.

A côté du duopole Airbus/Boeing, le nouvel entrant chinois COMAC profite de la crise du Covid-19 pour rattraper son retard avec la mise en service de l’avion monocouloir C919 en 2021. Du côté de l’aviation régionale, l’avion chinois ARJ21 monte en puissance avec une cadence de 20 avions/an. Le programme d’avion long-courrier CRJ929 en collaboration avec la Russie semble en position moins favorable avec un report de sa mise en service en 2025 voire 2028/2029 sur fond de désaccord entre les partenaires russes et chinois.

⇒ Applications industrielles

Le titane trouve des applications dans le domaine industriel en raison de son excellente résistance à la corrosion : industrie chimique, technologies d’extraction et de transformation de ressources naturelles (pétrole, gaz, dessalement...), production d’énergie (nucléaire, charbon, cycles combinés...). Comparables en volume au secteur aéronautique, les applications du titane dans l’industrie se développent avec l’augmentation de la demande en particulier en Asie et au Moyen – Orient. Le titane est employé principalement sous sa forme pure ou faiblement allié avec un niveau de technicité moins élevé que pour l’aéronautique. Il faut toutefois noter que certains marchés, comme le nucléaire, imposent des niveaux d’exigence et de traçabilité comparable à ceux pratiqués en aéronautique.

Les approvisionnements sont négociés en contrat spot et au gré des besoins des projets industriels concernés. Ce segment de marché est donc par nature un marché d’acheteur ou la concurrence est rude avec des dérives d’attribution de marchés « au moins disant ». Ces dernières années, les appels d’offre liés aux programmes nucléaires indiens ont créé les conditions pour favoriser le développement d’une offre asiatique de qualité médiocre à très bas coût. La Chine n’a pas fait la même erreur : elle a interdit l’emploi de titane chinois ou indien sur tous ses programmes nucléaires. Depuis la catastrophe de Fukushima en mars 2011, l’augmentation des besoins énergétiques mondiaux et le rejet des sources fossiles les plus polluantes comme le charbon ont redonné au nucléaire des perspectives en particulier en Asie (Chine, Inde), en Russie et aux Emirats arabes. Le besoin en titane est associé aux centrales nucléaires en environnement agressif : bord de mer, cours d’eau chargé en particules etc. Autre segment porteur pour la demande en titane, la production, le transport et le stockage de gaz naturel dont la consommation est en prévision de croissance de +5,8%/an à l’horizon 2026. Le titane est un matériau de choix en raison de son bon comportement à très basse température.

Dans le secteur des énergies renouvelables, l’énergie thermique des mers (ETM) a représenté ces dernières années un nouveau domaine d’emploi du titane à très fort potentiel de consommation (quelques dizaines de milliers de tonnes/an). Après plusieurs années de développement et des démonstrations de concept sur de petites unités, la plupart des initiatives industrielles dans le domaine semblent infructueuses. Les autres technologies d’énergie verte plébiscité dans le cadre de la transition énergétique comme l’éolien ou le solaire ne sont pas consommatrice de titane.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	130/158

Historiquement gros consommateur de titane (de quelques centaines à plusieurs milliers de tonne par projet), le marché du dessalement a quasiment disparu du panorama de la demande dans le secteur industriel en raison de la substitution des techniques thermiques de distillation par la méthode de filtration par osmose inverse.

Enfin, l'essentiel de la consommation de titane dans le secteur industriel est lié à la production chimique. Elle représente environ 90% de la demande industrielle. Le titane y est utilisé pour sa résistance exceptionnelle aux ambiances corrosives sévères. Depuis 2009, la Chine est le premier producteur mondial avec plus de 35% de part de marché devant l'Europe et les USA. La plupart des dernières capacités mondiales de production ont été investies dans ce pays et devraient entrer en service dans la période 2020 – 2023. Selon nos estimations, après une baisse de consommation à cause du Covid-19, la consommation mondiale de titane dans le secteur de la chimie devrait reprendre un rythme de croissance de l'ordre de 9,7%/an jusqu'en 2026.

Moins impacté que l'aéronautique, nous estimons que le secteur industriel retrouvera son niveau de consommation de titane d'avant la crise à partir de 2024.

⇒ Applications militaires

Les propriétés uniques du titane sont exploitées dans de nombreuses applications militaires, dans les airs (avions, missiles, drones, satellites), dans les mers (bateaux, sous-marins) et sur terre (blindés, artillerie, engins du génie). Il est utilisé principalement sous la forme d'alliage à hautes performances et est soumis à des conditions d'emploi extrêmes. Les quantités de titane consommées représentent une faible portion de la demande mondiale (11,5% avant la crise du Covid-19), mais il est crucial de sécuriser sa production, ou à défaut son approvisionnement, pour les pays dotés d'une industrie de défense.

Après le démantèlement des capacités soviétiques, les USA ont été les plus gros consommateurs de titane dans le domaine de l'armement. Ils sont maintenant rattrapés par les superpuissances émergentes comme la Chine qui développe son industrie militaire. Le Russie profite également de cette dynamique par le biais de la coopération militaro-industrielle avec la Chine et l'Inde.

Contrairement aux autres secteurs, la consommation de titane est en prévision de croissance de +44% en passant de 14.000 à 20.000 tonnes sur la période 2019 – 2023. Cette croissance est associée à l'effort budgétaire consacré en particulier aux USA en soutien aux activités industrielles dans le contexte de crise liée au Covid-19. Les trois armes sont concernées par le fléchage des budgets militaires mais la production aéronautique est de loin la plus grande consommatrice de titane avec en particulier la montée en cadence du programme d'avion multi-rôle F-35 *Joint Strike Fighter*.

Au-delà de 2023, nous prévoyons une baisse de la demande en titane dans le domaine militaire avec un niveau de 15.600 t à l'horizon 2026, soit un niveau encore supérieur à celui avant la crise.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	131/158

⇒ Biens de consommation

Enfin, dans le secteur des biens de consommation, le titane est utilisé pour ses propriétés physiques et sa réputation de matériau « high-tech ». Il entre dans la composition de produits techniques dans les domaines du sport, du médical, de l'automobile et dans des produits « haut de gamme » et de luxe. Son potentiel d'emploi est considérable mais le principal frein est son prix.

Un des marchés les plus porteurs est celui des implants médicaux qui croît avec le vieillissement général de la population et le développement des classes moyennes et aisées. Le titane est un matériau de prédilection en raison de sa propriété de biocompatibilité. En 2020, la crise du Covid-19 a bouleversé l'activité dans le secteur médical. La grande majorité des opérations chirurgicales ont été reportées pour laisser place à l'accueil des patients atteints par la pandémie. Au final, l'impact sur le marché des implants, en particulier ceux en titane, semble s'adapter avec des effets de rattrapage de la demande et les perspectives de croissance dans les dix prochaines années restent identiques à celles d'avant la crise à savoir 4,7%/an.

Identifiée comme application à fort potentiel, la pile à combustible développée par les besoins de la Toyota Mirai n'a pas atteint ses objectifs de développement. Entrée en production en 2015, ce véhicule n'est fabriqué qu'à 3.000 véhicules/an alors que Toyota espérait en vendre 200.000 en 2020.

Globalement, nous estimons que le secteur des biens de consommation va perdre un quart de demande en titane entre 2019 et 2021 et qu'il retrouvera son niveau d'avant la crise en 2026 avec un rythme de progression de 5,7%/an.

Du côté de l'offre mondiale, les capacités mondiales de production d'éponge de titane se sont développées sur la période de 2003 à 2012 pour culminer à 322.400 t/an. A partir de 2013, la baisse de l'activité dans le secteur industriel a obligé la Chine à fermer 40% de ses sites de production. La capacité chinoise est ainsi passée de 149.500 tonnes/an en 2012 à 88.000 tonnes/an en 2015. En 2017, les USA ont perdu environ 50% de leurs capacités de production d'éponge avec la fermeture de l'usine d'Allegheny alors que la Chine rouvrait de nouvelles capacités. Deux ans plus tard, la dernière usine de production d'éponge américaine a cessé son activité alors qu'au même moment un nouveau pays entrait dans le cercle des pays producteur : l'Arabie – Saoudite. En 2020, les capacités mondiales de production d'éponge sont de 323.800 tonnes/an. Presque la moitié est localisée en Chine, le reste est situé en Europe de l'Est (Russie, Kazakhstan et Ukraine), au Japon et Arabie-Saoudite.

Aucune capacité de production d'éponge chinoise n'est qualifiée pour un usage aéronautique. La Chine est obligée d'importer cette qualité de matière première pour ses besoins. Les seuls producteurs qualifiés sont japonais, russes et kazakhes. Compte-tenu des enjeux capacitaires autour de cette qualité supérieure d'éponge, la Chine s'est fixée comme objectif prioritaire de la développer sur son territoire pour servir ses ambitions stratégiques dans l'aéronautique, l'espace, le nucléaire, la défense etc. La disparition de la dernière usine d'éponge aux USA a déclenché un plan d'action visant à sécuriser l'accès à cette matière

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	132/158

première stratégique pour l'industrie américaine. En particulier, des négociations ont été menées avec les pays producteurs d'éponge de qualité aéronautique pour garantir son approvisionnement. D'autres initiatives non confirmées officiellement, concerneraient le redémarrage d'un stock stratégique de titane sous la forme de lingot d'alliage TA6V et le projet de prise de contrôle de la toute nouvelle usine saoudienne. Cette usine étant le fruit de la collaboration avec le producteur japonais Toho, une qualification aéronautique de l'éponge est tout à fait envisageable à court terme.

Concernant les moyens de fusion, les dernières augmentations significatives de capacité ont été faites en Chine. Sur un total de 481.250 tonnes liquides/an, la Chine a dépassé les USA en 2019 avec 37% des capacités mondiales. Les USA sont en seconde position avec 33% (en incluant les filiales européennes) et le reste des capacités mondiales est localisé au Japon et sur le continent européen (Russie, Kazakhstan, Ukraine, France, Italie).

En Europe occidentale, la société franco-kazakhe UKAD a inauguré en septembre 2017 sa nouvelle usine de retraitement EcoTitanium localisée en France et disposant d'une unité de fusion plasma compatible avec les exigences de qualité aéronautique. Après la fermeture de la branche titane du groupe allemand Thyssen en 2009, la France est le seul pays européen à s'être doté d'une filière industrielle cohérente, sécurisée en amont et disposant de sa propre capacité de recyclage. En marge de l'activité principale centrée sur les alliages aéronautiques classiques, l'entreprise s'intéresse également au recyclage des alliages intermétalliques TiAl pour accompagner le développement de la production de pièces pour les moteurs aéronautiques de dernière génération.

Aux USA, les trois grands acteurs de la filière de production PCC, ATI et Howmet ont engagé des opérations de rationalisation de leurs outils de production en réponse à la crise du Covid-19. Des plans de licenciements et des fermetures d'usines sont mis en œuvre pour préserver les équilibres financiers et, en parallèle, des investissements sont consacrés, en particulier pour la production de produits plats (tôles, plaques), pour dimensionner une offre compétitive au moment du redémarrage de l'activité.

Sur le plan technologique, les recherches visant à remplacer le procédé Kroll pour la production d'éponge de titane par des méthodes plus économiques ne débouchent pas. Les progrès les plus significatifs concernent le développement des technologies de fabrication additive qui ouvrent des perspectives de filières de production compétitives sur des cas d'application très ciblés. La généralisation de ces nouvelles approches n'est pas à l'ordre du jour tant que les coûts de production, en particulier des matières premières (poudres, fil), ne baisseront pas significativement.

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	133/158

ANNEXES

XIII ANNEXE : TECHNIQUES DE FUSION A FOYER FROID

Soutenus par les programmes de la Défense, les producteurs américains de titane ont mis au point des procédés de fusion permettant de recycler massivement les déchets de titane afin de réduire le coût de la matière première dans la fabrication des lingots de titane.

Ces développements ont abouti aux technologies de fusion à foyer froid. Deux techniques sont utilisées aujourd'hui : la fusion par faisceau d'électrons (Electron Beam – EB) et la technique par torche plasma (Plasma Arc Melting –PAM). Une représentation des procédés EB et PAM est donnée dans les figures suivantes.

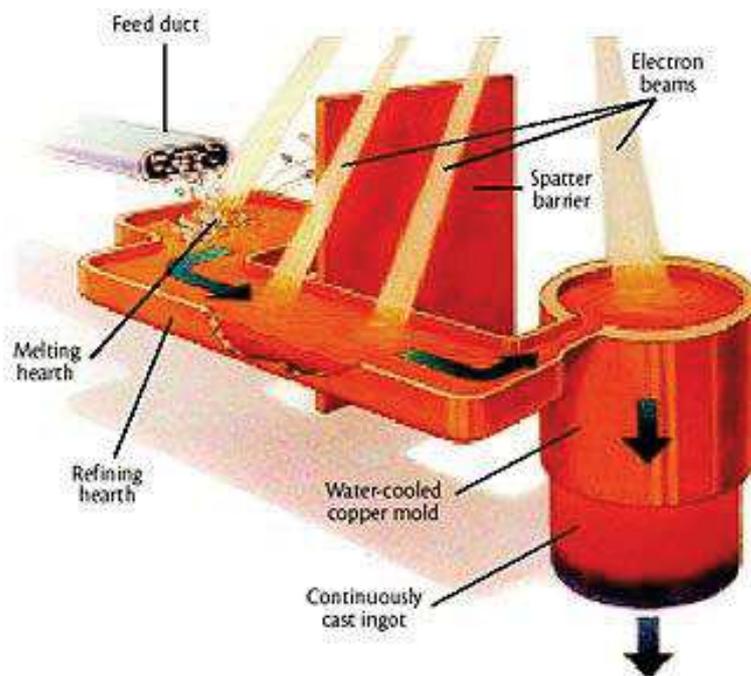


Figure 59: Principe de fusion à foyer froid par faisceau d'électrons EB (source :Timet)

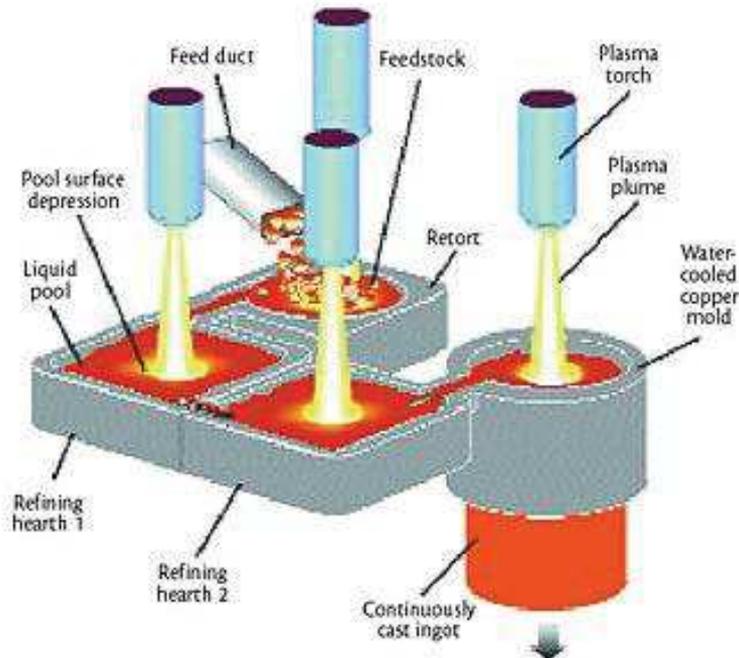


Figure 60: Principe de fusion à foyer froid par torche plasma PAM (source Timet)

Ces principes de fusion permettent l'utilisation de grande quantité de scrap en raison du mode d'introduction de la matière première qui se fait par le biais d'un large canal où la matière est déversée. La circulation du bain de métal se faisant de bac en bac, l'écoulement de la matière et le brassage du liquide permet d'éviter les problèmes de ségrégation et de présence d'inclusion de métaux lourds (High Density Inclusion – HDI). Ces problèmes sont bien connus dans la technologie classique de la fusion VAR. On peut ainsi envisager une seule fusion alors que par le procédé VAR, il faut deux voire trois fusions successives. Dans la pratique, trois fusions VAR sont remplacées par une fusion EB ou PAM suivie d'une fusion VAR. Les techniques EB et PAM permettent également de limiter l'apparition des inclusions de phase alpha (Hard Phase Inclusion – HAI) qui ont été identifiées comme étant la cause du crash historique en 1989 d'un DC10 à Sioux City.

Un inconvénient de ces deux techniques est la complexité des réglages de teneur en éléments d'addition à cause des faisceaux d'énergie qui favorisent l'évaporation des métaux à faible tension de vapeur. Le problème est crucial pour l'aluminium. Par ailleurs, ces méthodes énergétiques sont complexes et coûteuses en entretien.

Aujourd'hui, la moitié des lingots produits aux USA sont fabriqués avec les procédés EB et PAM.

XIV ANNEXE : HISTORIQUE DU PRIX DE L'EPONGE

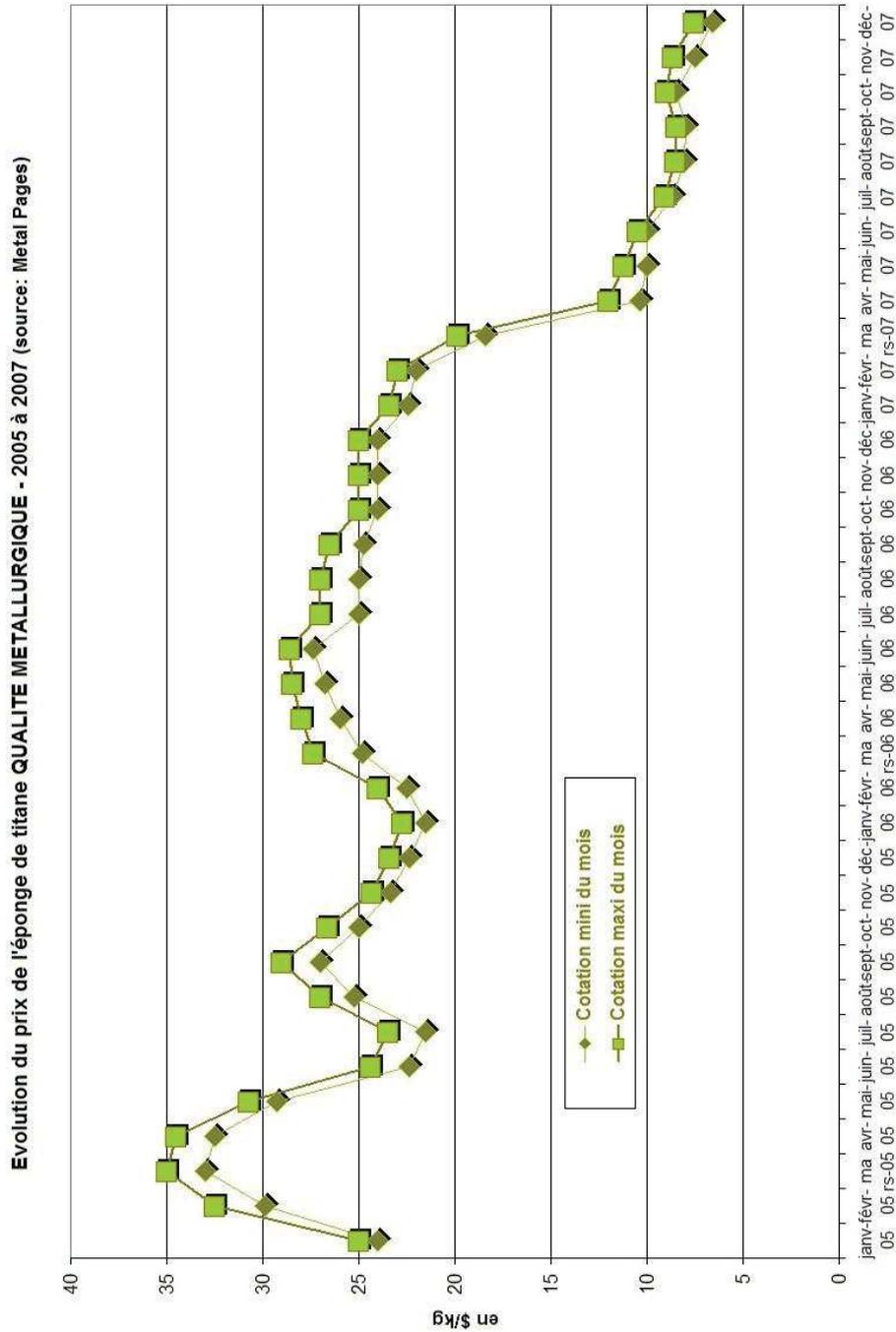


Figure 61: Évolution du prix de l'éponge de qualité métallurgique entre 2005 et 2007 [réf.3]

XV ANNEXE : HISTORIQUE DU PRIX DU FERROTITANE 70%

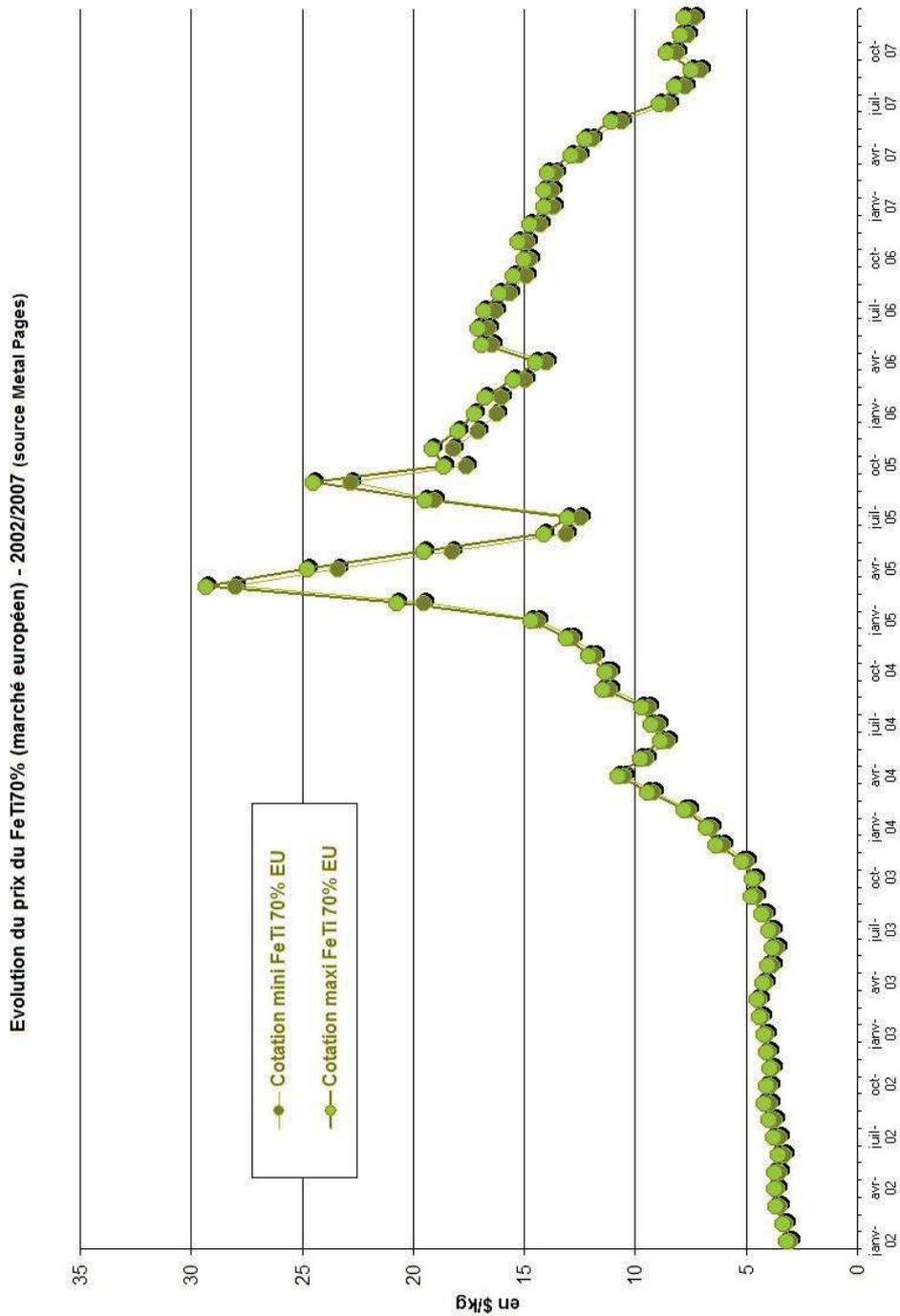


Figure 62: Évolution du prix du ferrotitane 70% entre 2002 et 2007 [réf.3]

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	138/158

XVI ANNEXE : SCENARII D'EVOLUTION DU PRIX DES MATIERES PREMIERES

Scenario « générique » en phase de reprise de la demande

1. La chute de la demande a été causée par une crise de dimension internationale dont les effets affectent l'ensemble de l'économie ;
2. Les premiers signes de reprise sont perçus d'abord par l'industrie sidérurgique en raison de ses liens avec les produits de grande consommation ;
3. La filière titane subissant la crise, les usines produisent peu de déchets et les moyens de production d'éponge tournent à régime réduit : en conséquence les stocks de scrap sont au plus bas et la disponibilité en éponge, faible ;
4. Avec la relance de la production d'acier, les sidérurgistes stimulent la production de ferrotitane 70% ce qui provoque la montée des prix du scrap ;
5. Les prix du FeTi70% montent d'autant plus que la disponibilité en scrap est faible : cela pousse les sidérurgistes à chercher une alternative avec l'éponge de qualité métallurgique ;
6. Le redémarrage des usines d'éponge est un processus progressif. Tant que l'offre n'est pas suffisante, l'inflation des prix sur le FeTi70% et le scrap est entretenue ;
7. Lorsque la demande en titane repart, les prix des matières premières sont élevés et leur disponibilité est très limitée. Toutes les conditions sont réunies pour une augmentation des coûts de production et un allongement des délais de livraison pour les fabricants de titane.

Scenario générique en phase de chute de la demande

1. Une crise de dimension internationale se déclenche ;
2. La chute de la demande induit un ralentissement des cadences de production d'éponge, de scrap de titane et de ferrotitane ;
3. La disponibilité en éponge sur le marché spot augmente dans un premier temps (elle n'est pas transformée en lingot), puis se raréfie ;
4. Le stock disponible en scrap s'accumule et les prix s'écroulent ;
5. La majorité du stock de scrap finit par s'écouler à des niveaux de prix bas ;

Tableau 14: Mécanisme d'évolution des prix et de disponibilité des matières premières

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	139/158

XVII ANNEXE : REFERENCES HISTORIQUES DE PRIX DES MATIERES PREMIERES

Évènement	Prix (\$ constant)
• Valeurs pic lors de la très forte demande en mars 2005	
○ de l'éponge de titane de qualité métallurgique	35 \$/kg
○ du FeTi70%	29 \$/kg
○ du scrap de titane TA6V traité	27 \$/kg
• Valeur moyenne de l'éponge de titane de qualité métallurgique en phase de demande soutenue (période de juillet 2005 à fin 2006)	25 \$/kg
• Valeur moyenne de l'éponge de titane de qualité métallurgique en période « normale » avec une bonne disponibilité en matière (période avril 2007 à septembre 2008)	8 – 9 \$/kg
• Valeur basse en phase de crise de la demande (1 ^{er} semestre 2009)	
○ de l'éponge de titane de qualité métallurgique	2,5 \$/kg
○ du FeTi70%	2,5 \$/kg
• Seuil apparent de rentabilité pour la production de FeTi30%	7 – 8 \$/kg

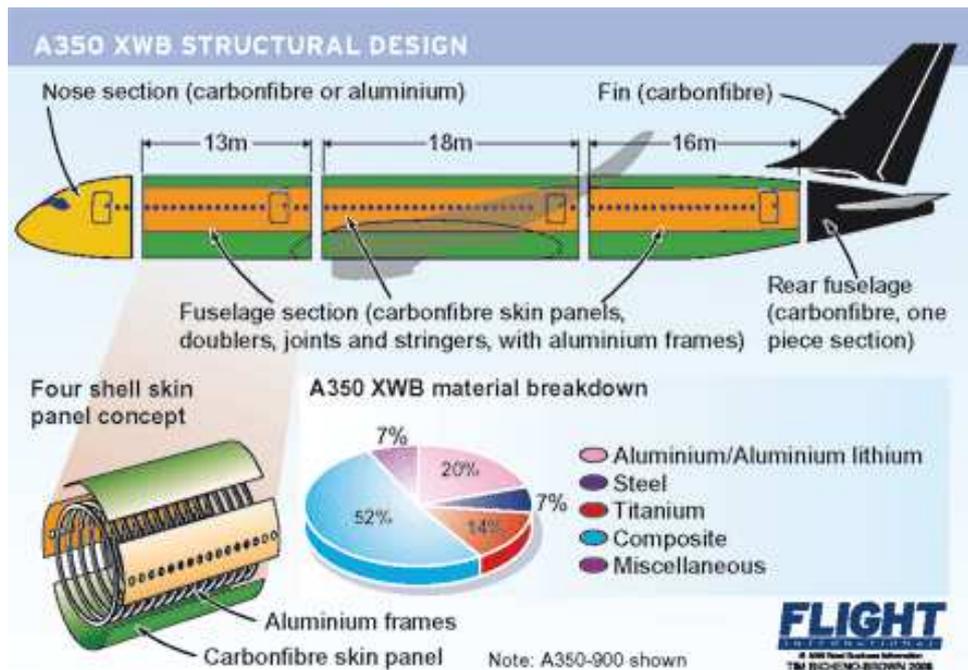
Tableau 15: Prix des matières premières en fonction de l'équilibre offre-demande

XVIII ANNEXE : HISTORIQUE CONSOMMATION MONDIALE 2003-2009

(x 1000 tonnes)	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Aéronautique commerciale	14-18	17-20	20-24	24-28	34-38	42-46	29-30
Applications industrielles	20-23	23-25	22-25	25-27	32-34	36-38	26-28
Applications militaires	8-10	9-12	9-12	11-13	10-12	10-11	8-9
Biens de consommation	6-7	7-8	7-8	9-10	11-13	11-13	7-9
Total	48-58	56-65	58-69	69-78	87-97	99-108	70-76

Tableau 16: Evolution de la consommation mondiale de titane entre 2003 et 2009

XIX ANNEXE : EMPLOI DES COMPOSITES DANS LES AVIONS DE NOUVELLE GENERATION



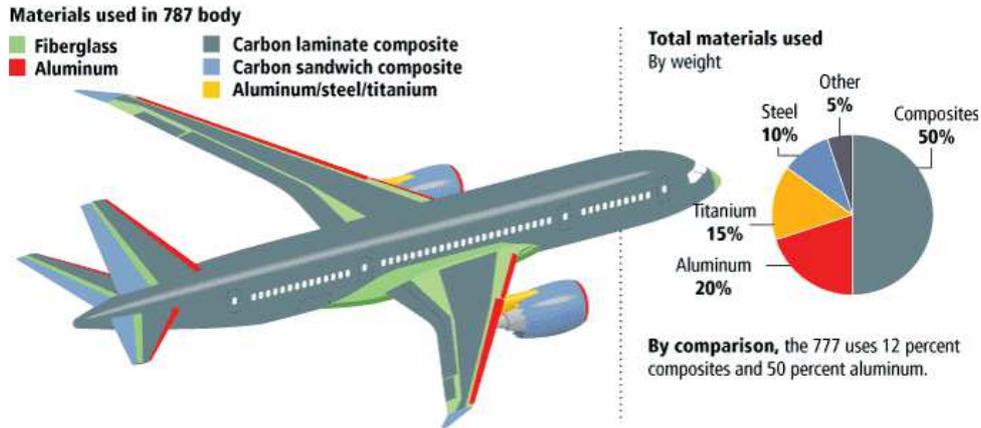


Figure 63: Utilisation des matériaux composites et des métaux dans l'A350 et le B787

XX ANNEXE : HISTORIQUE DE PRODUCTION D’AIRBUS ET BOEING

Livraisons d'avions de ligne

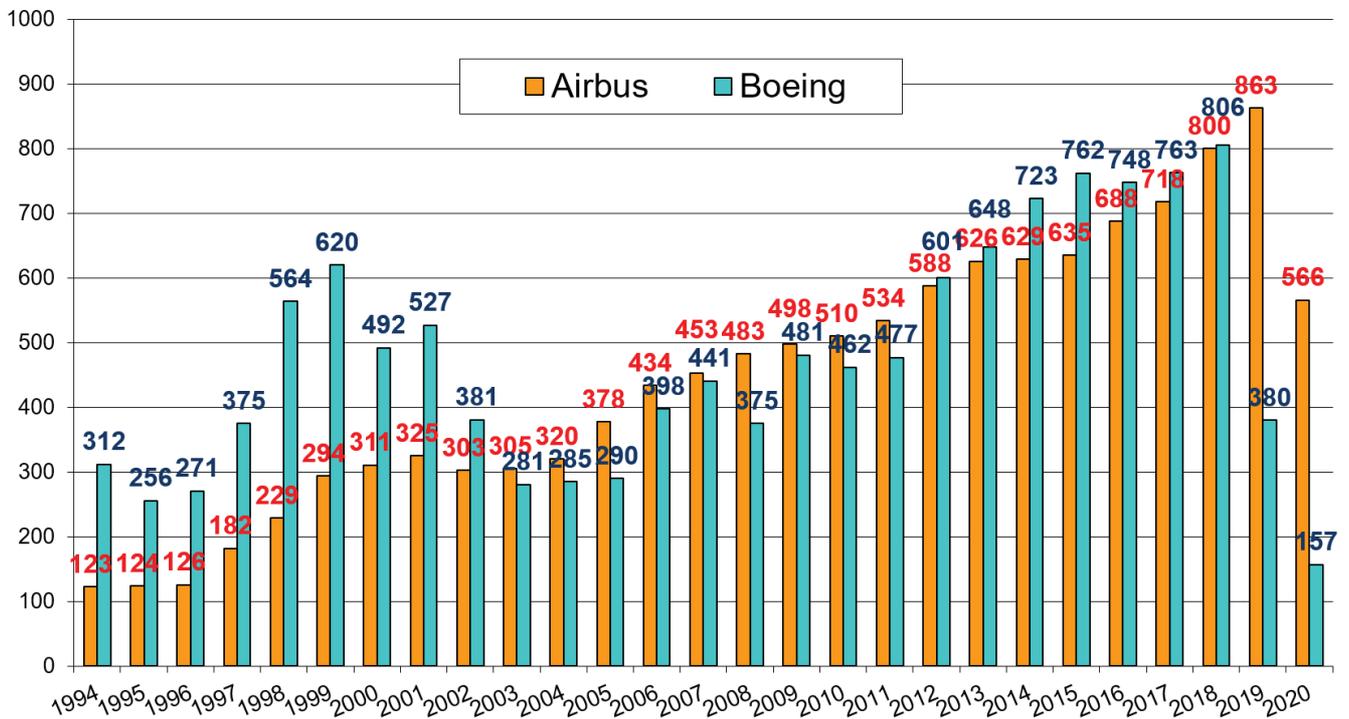


Figure 64: Historique des livraisons annuelles d'avions d'Airbus et Boeing (1994-2020)

XXI ANNEXE : PRISES DE COMMANDE D’AIRBUS ET DE BOEING

Avions de ligne: commandes nettes d'avions

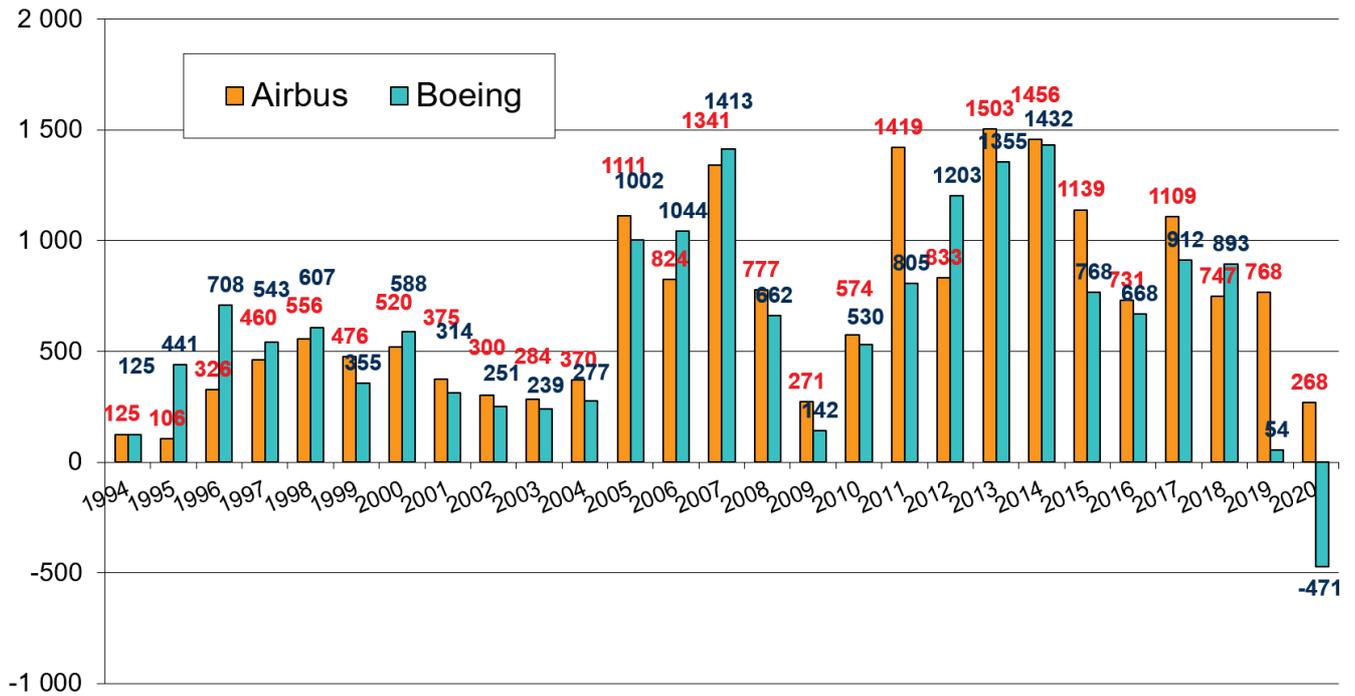


Figure 65: Historique des prises de commande d’Airbus et de Boeing (1994-2020)

XXII ANNEXE : BACKLOG DE COMMANDE AIRBUS & BOEING

Avions de ligne: carnet de commande (Backlog)

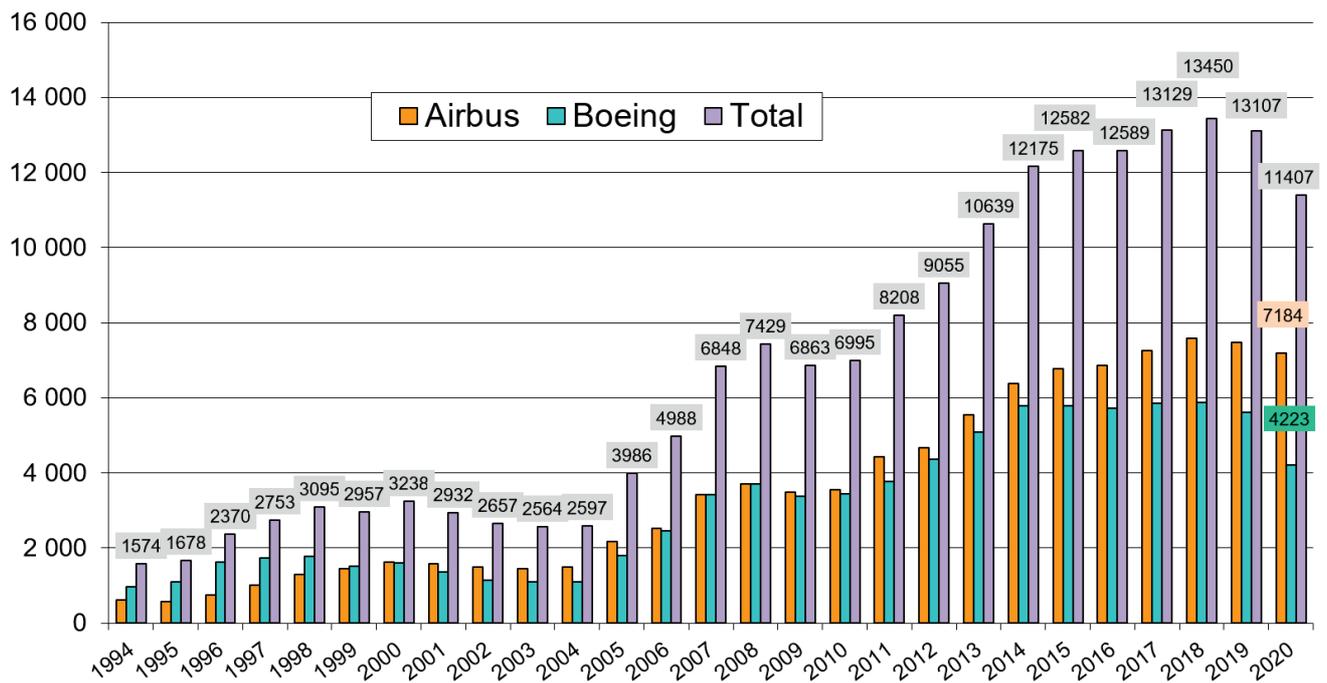


Figure 66: Évolution du backlog d'Airbus et de Boeing (1994-2020)

XXIII ANNEXE : NACELLE DU C919 (CHINE)

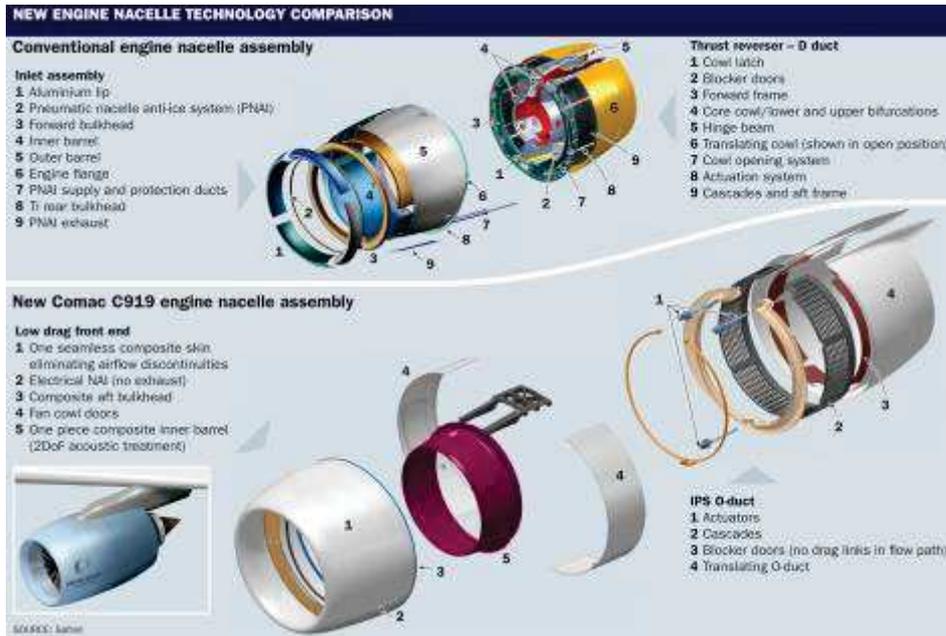


Figure 67: Nouvelle technologie de nacelle « moteur » de l’avion chinois C919

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	145/158

XXIV ANNEXE : BLINDAGES EN TITANE



Figure 68: Exemples de kits de protection balistique en titane [réf. 21]

XXV ANNEXE : CANON HOWITZER 155MM CHASSIS EN TITANE



Figure 69: Châssis en titane du canon d'artillerie Howitzer de 155mm [réf.23]

XXVI ANNEXE: CHASSIS EN TITANE POUR LE FUTUR VEHICULE FCS



Figure 70: Projet de châssis en titane du “Futur Combat System” (US Army)

XXVII ANNEXE : PROGRAMMES NUCLEAIRES

TABLE 1. OVERVIEW OF POWER REACTORS AND NUCLEAR SHARE, 31 DEC. 2019

Country	Operational reactors		Reactors in long term shutdown		Reactors under construction		Nuclear electricity supplied in 2019	
	No. of units	Net capacity MW(e)	No. of units	Net capacity MW(e)	No. of units	Net capacity MW(e)	TW·h	% of total
ARGENTINA	3	1641			1	25	7.9	5.9
ARMENIA	1	375					2.0	27.8
BANGLADESH					2	2160		
BELARUS					2	2220		
BELGIUM	7	5930					41.4	47.6
BRAZIL	2	1884			1	1340	15.2	2.7
BULGARIA	2	2006					15.9	37.5
CANADA	19	13554					94.9	14.9
CHINA	48	45518			11	10564	330.1	4.9
CZECH REP.	6	3932					28.6	35.2
FINLAND	4	2794			1	1600	22.9	34.7
FRANCE	58	63130			1	1630	382.4	70.6
GERMANY	6	8113					NA	NA
HUNGARY	4	1902					15.4	49.2
INDIA	22	6255			7	4824	40.7	3.2
IRAN, ISL. REP.	1	915			1	974	5.9	1.8
JAPAN	33	31679			2	2653	65.7	7.5
KOREA, REP. OF	24	23172			4	5360	138.8	26.2
MEXICO	2	1552					10.9	4.5
NETHERLANDS	1	482					3.7	3.1
PAKISTAN	5	1318			2	2028	9.1	6.6
ROMANIA	2	1300					10.4	18.5
RUSSIA	38	28437			4	4525	195.5	19.7
SLOVAKIA	4	1814			2	880	14.3	53.9
SLOVENIA	1	688					5.5	37.0
SOUTH AFRICA	2	1860					13.6	6.7
SPAIN	7	7121					55.9	21.4
SWEDEN	7	7740					64.4	34.0

Country	Operational reactors		Reactors in long term shutdown		Reactors under construction		Nuclear electricity supplied in 2019	
	No. of units	Net capacity MW(e)	No. of units	Net capacity MW(e)	No. of units	Net capacity MW(e)	TW·h	% of total
SWITZERLAND	4	2960					25.4	23.9
TURKEY					1	1114		
UAE					4	5380		
UK	15	8923			2	3260	51.0	15.6
UKRAINE	15	13107			2	2070	78.1	53.9
USA	96	88152			2	2234	809.4	19.7
TOTAL	443	392098			54	57441	2586.2	

Notes:

- The total includes the following data from Taiwan, China:
 - 4 units, 3844 MW(e) in operation; 2 units, 2600 MW(e) under construction;
 - 31.1 TW·h of nuclear electricity generation, representing 13.4% of the total electricity generated there.
- Nuclear electricity statistics do not include data from German reactor units, as information for these units was not submitted by the time of publication.

Tableau 17: Réacteurs nucléaires en service et en cours de construction [réf.38]

XXVIII ANNEXE : ENERGIE THERMIQUE DES OCEANS (OTEC)

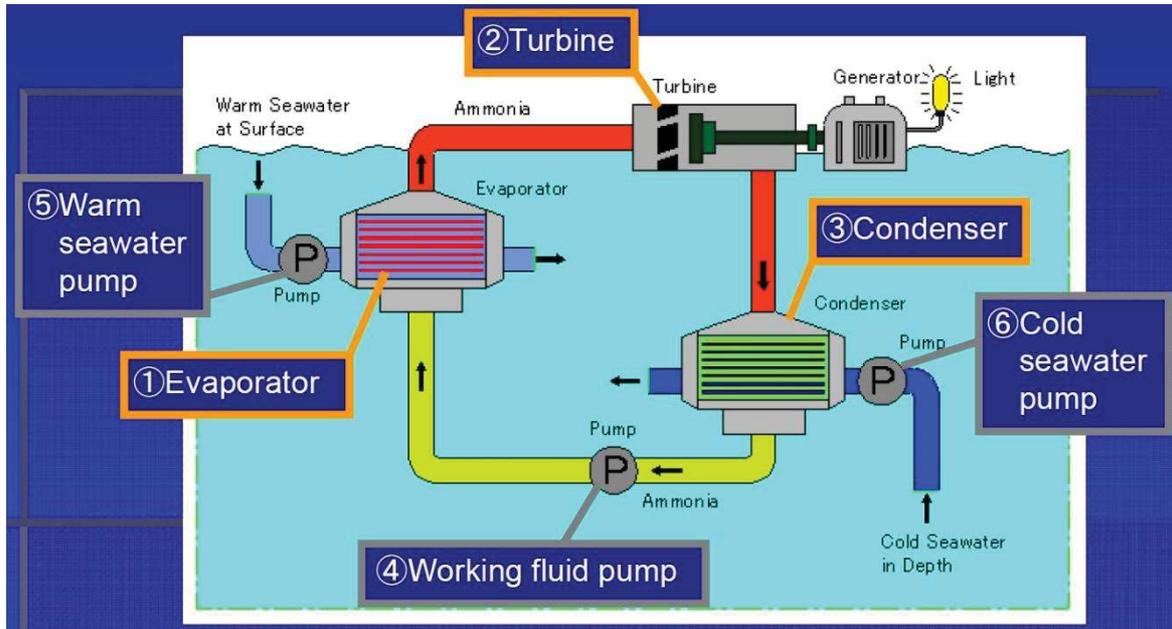


Figure 71: Principe de la technologie OTEC^{75,76}

Le procédé OTEC « Ocean Thermal Energy Conversion » (ou ETM – Energie thermique des mers) est une technique de production d’énergie qui exploite les différences de température entre eaux profondes et eaux de surface. La faisabilité est démontrée en 1930 par l’ingénieur français G. Claude qui met en œuvre une première usine flottante en 1935. Au premier choc pétrolier, les études sont relancées et un projet d’une mini-centrale de 5MW est initié pour Tahiti en 1979. Ce projet est stoppé avec le contre-choc pétrolier. En 1974, les américains lancent le « Natural Energy Laboratory of Hawaii » qui accueille dès 1979 une usine

« mini-OTEC » à Keahole Point à la pointe de l’île de Big Island, une des îles d’Hawaï. L’usine réalise la première production nette d’électricité par le biais d’une centrale en cycle fermé. Le projet se développe et en 1985, l’Etat législatif d’Hawaï crée le HOST (Hawaï Ocean Science and Technology) qui développe une économie locale exploitant deux systèmes de canalisations en profondeur et en surface et une troisième, la plus large et profonde au monde allant jusqu’à 900 mètres, est en voie de développement.

Outre les développements menés en France par NAVAL GROUP et Lockheed Martin aux USA (voir paragraphe V.1.5), les japonais s’intéressent aussi à la technologie et en 2003, un site d’expérimentation démarre au Japon en partenariat avec l’IOES^{fff} de l’Université de Saga. En plus de la production d’électricité (30 kW), les ingénieurs japonais ont développé une technique de dessalement (10 tonnes/jour), de production et de stockage d’hydrogène, et d’extraction de lithium. La même année, un site de production de glaçons d’eau de mer de 10 tonnes/jour a été installé au Japon. D’autres projets sont également à l’étude pour exploiter les propriétés des eaux profondes pour développer la biomasse océanique et répondre ainsi globalement aux besoins des populations côtières en énergie, eau douce et nourriture.

La liste des projets actuellement en cours dans le monde⁷⁷ est donnée dans la figure ci-dessous.

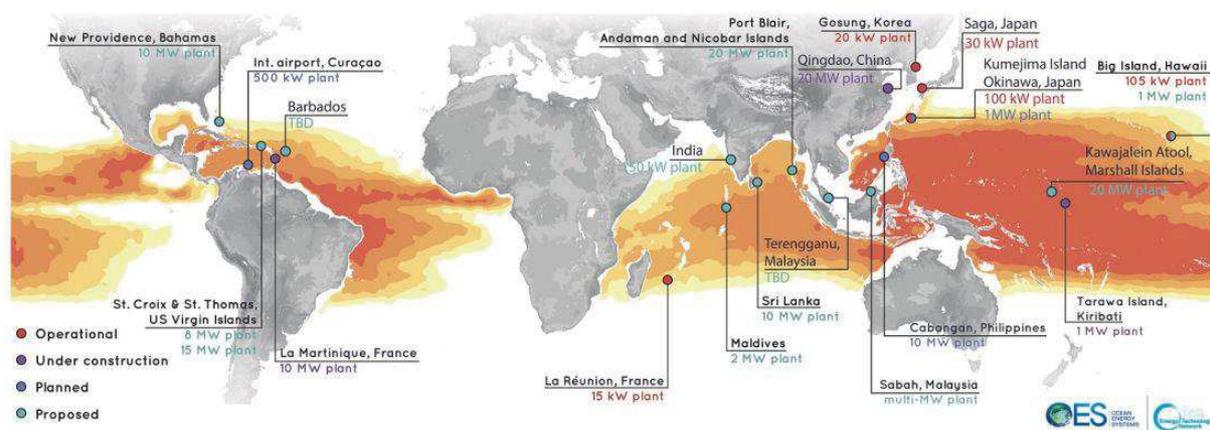


Tableau 18: Projets OTEC dans le monde (mai 2017) [réf.77]

^{fff} Institut of Ocean Energy

XXIX ANNEXE : TECHNOLOGIE DE PRODUCTION D'ÉPONGE**Technology Comparison of Titanium Sponge Production in China & Abroad**

Country	China	Japan	America	Russia	Kazakstan	Ukraine
Raw material	92% high-Ti slag	95% rutile	95% rutile	87% high-Ti slag	87% high-Ti slag	87% high-Ti slag
Chlorination	φ1.2 ~ 2.6m boiling chlorinator	φ1.9 ~ 3m boiling chlorinator	φ3m boiling chlorinator	φ5m salt chlorinator	φ5m salt chlorinator	φ5msalt chlorinator
Refining	Removing vanadium by copper thread-float valve tower	Removing vanadium by mineral oil -float valve tower	Removing vanadium by mineral oil-float valve tower	Removing vanadium by aluminum powder-bubble cap tower distillation	Removing vanadium by aluminum powder - bubble cap tower distillation	Removing vanadium by aluminum powder - bubble cap tower distillation
Reduction-distillation	5 ~ 8 t upside-down U type consolidate stove, 3 ~ 4 t I type half consolidated stove	5 ~ 10 t upside-down U type consolidate stove	8 ~ 10 t upside-down U type consolidate stove	4 ~ 5 t I type half consolidated stove	4 ~ 5 t I type half consolidated stove	4 t I type half consolidated stove
Magnesium electrolysis	110KA electrolysis slot without separating board	Homo-polar electrolysis slot	electrolysis slot without separating board	150 ~ 170KA electrolysis slot without separating board	150 ~ 170KA electrolysis slot without separating board	150 ~ 170KA electrolysis slot without separating board

Source: Beijing General Research Institute of Nonferrous Metals Publications

Tableau 19 : Comparaison des différentes technologies de production d'éponge [Réf.78]

XXX ANNEXE : STANDARDS DE QUALITE D'EPONGE DE TITANE

China sponge national standard

Grade	Brand	No less Than	Chemical Elements (quality grade)%									brinell hardness	
			impurity, No More Than										HBW/10/14700/30
			Fe	Si	Cl	C	N	O	Mn	Mg	H		
0 级	MHT-100	99.7	0.06	0.02	0.06	0.02	0.02	0.06	0.01	0.06	0.005	100	
1 级	MHT-110	99.6	0.1	0.03	0.08	0.03	0.02	0.08	0.01	0.07	0.005	110	
2 级	MHT-125	99.5	0.15	0.03	0.1	0.03	0.03	0.1	0.02	0.07	0.005	125	
3 级	MHT-140	99.3	0.2	0.03	0.15	0.03	0.04	0.15	0.02	0.08	0.01	140	
4 级	MHT-160	99.1	0.3	0.04	0.15	0.04	0.05	0.2	0.03	0.09	0.012	160	
5 级	MHT-200	98.5	0.4	0.06	0.3	0.05	0.1	0.3	0.08	0.15	0.03	200	

Japanese makers standard

Grade	Ti (%min)	Impurity									BHN
		Fe	Cl	Mn	Mg	Si	N	C	H	O	
Soft	99.8	0.03	0.08	0.002	0.04	0.02	0.006	0.01	0.003	0.05	90
Sponge	99.7	0.04	0.08	0.002	0.04	0.02	0.006	0.01	0.003	0.06	95
Mild	99.6	8	0.1	0.005	0.05	0.02	0.01	0.02	0.004	0.07	100
Sponge	99.5	0.12	0.12	0.01	0.06	0.02	0.015	0.02	0.005	0.1	120

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	153/158

Grades CEI	Ti (min.%)	Fe (max.%)	Si (max.%)	Ni (max.%)	C (max.%)	Cl (max.%)	N (max.%)	O (max.%)
TG-90	99.74	0.05	0.01	0.04	0.02	0.08	0.02	0.04
TG-100	99.72	0.06	0.01	0.04	0.3	0.08	0.02	0.04
TG-110	99.67	0.09	0.02	0.04	0.03	0.08	0.02	0.05
TG-120	99.64	0.11	0.02	0.04	0.03	0.08	0.02	0.06
TG-130	99.56	0.13	0.03	0.04	0.03	0.10	0.03	0.08
TG-150	99.45	0.20	0.03	0.04	0.03	0.12	0.03	0.10
TG-Tv	97.75	1.90	-	-	0.10	0.15	0.10	-

Tableau 20: Standards de qualité des éponges chinoises, japonaises⁷⁸

XXXI ANNEXE : PROCEDE DE TRAITEMENT DE L'EPONGE DE TITANE

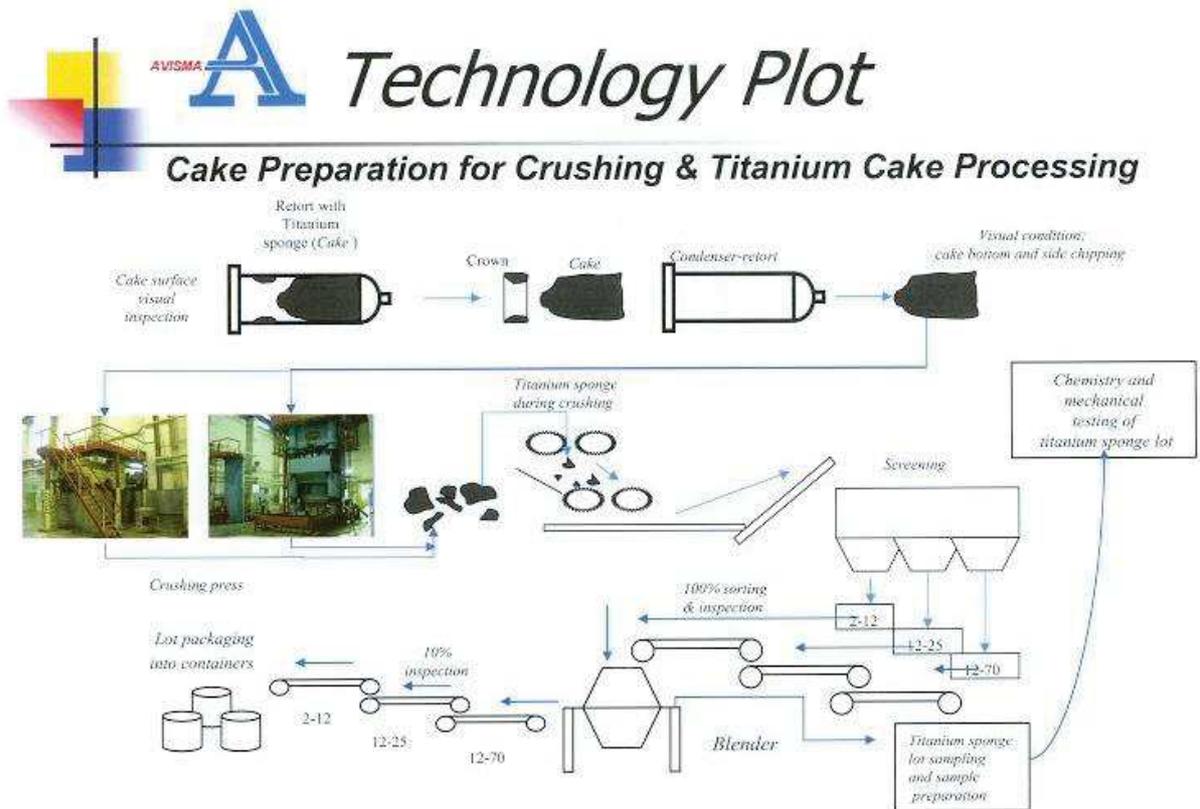


Figure 72: Procédé de traitement de l'éponge de titane chez VSMPO-AVISMA (Russie)

XXXII ANNEXE : MISE EN FORME DES POUDRES ADMA (HDH)

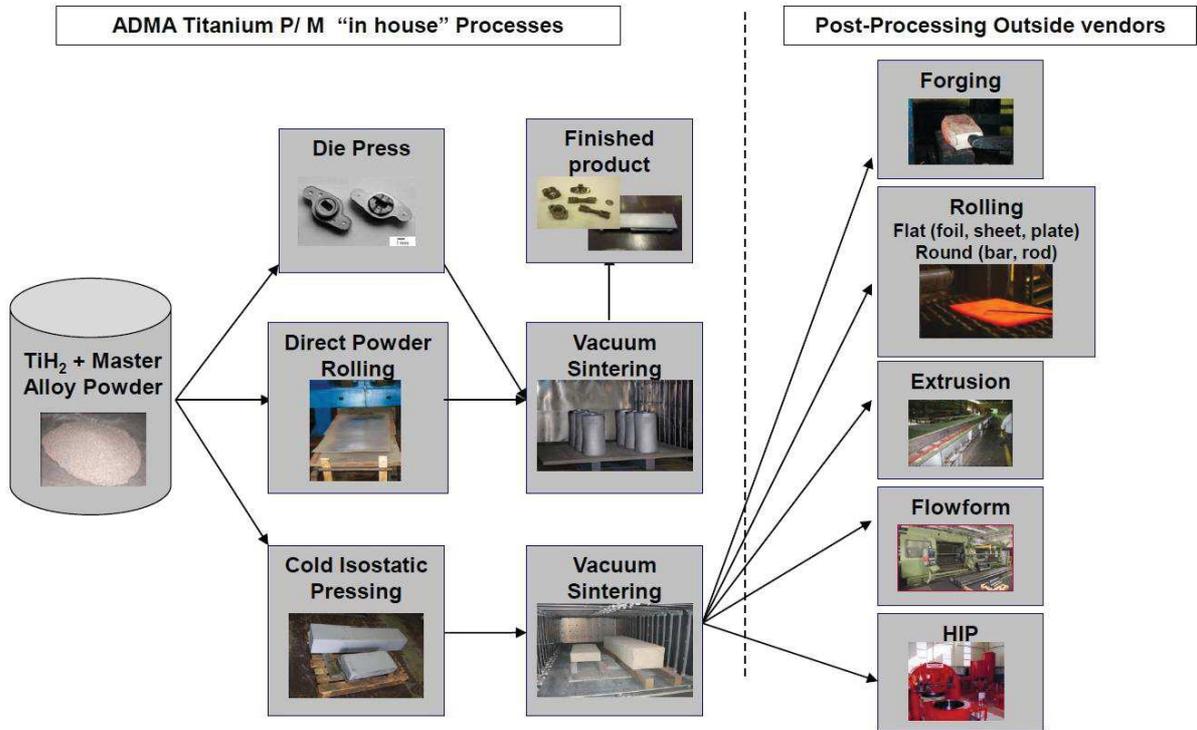


Figure 73: Mise en forme et transformation de produits titane élaboré à partir de TiH₂ [réf. 68]

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	156/158

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ¹ Black sand, The history of Titanium, Kathleen L. Housley, Metal Management Inc., ISBN 0-935297-43-X, 2007
- ² U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Titanium mineral concentrates, January 2020, p.176-177
- ³ Argus Media, <https://direct.argusmedia.com/>
- ⁴ U.S. Geological Survey, Mineral Industry Survey, Minerals Yearbook Titanium 2007 to 2018, Titanium in the fourth quarter 2018 & 2019 (<http://minerals.usgs.gov/minerals>)
- ⁵ Russian titanium market update, M. Metz, Proc. International Titanium Conference 2014 à 2019
- ⁶ Annual Review Chinese Titanium Market, Metal Pages Research, 2010 to 2019
- ⁷ Japanese Titanium Statistics by JTS (The Japan Titanium Society), <http://www.titan-japan.com>
- ⁸ Statistical review 2005 – 2009, International Titanium Association
- ⁹ Statistical review 2009 – 2011, International Titanium Association
- ¹⁰ Statistical review 2011 – 2015, International Titanium Association
- ¹¹ Statistical review 2014 – 2018, International Titanium Association
- ¹² Cirium Airline Insights Review 2020, January 2021, <https://cirium.lookbookhq.com/2020-airline-insights-review/2020-airline-insights-review>
- ¹³ IATA Annual Review 2020, <https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/iata-annual-review-2020.pdf>
- ¹⁴ IATA Aviation Technology Roadmap to 2050, March 2020, <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/technology20roadmap20to20205020no20foreword.pdf>
- ¹⁵ Airbus Global Market Forecast 2019-2038, <https://www.airbus.com/content/dam/corporate-topics/strategy/global-market-forecast/GMF-2019-2038-Airbus-Commercial-Aircraft-book.pdf>
- ¹⁶ 2020 Boeing Market Outlook, http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/market/assets/downloads/2020_CMO_PDF_Download.pdf
- ¹⁷ Embraer Market Outlook 2020, <https://www.embraermarketoutlook2020.com/>
- ¹⁸ Embraer Commercial Aviation, Market Outlook 2017-2036, www.embraer.com
- ¹⁹ Stockholm International Peace Research Institute, Trends in world military expenditure 2019, April 2020 https://www.sipri.org/sites/default/files/2020-04/fs_2020_04_milex_0_0.pdf
- ²⁰ MIL-DTL-46077G, Armor Plate, Titanium Alloy, Weldable, 28 september 2007
- ²¹ New titanium add-on armor provides enhanced soldier protection in a lightweight solution, S. Luckowski, Proc. International Titanium Association, Titanium 2009, Waikoloa, Hawaiï, USA
- ²² Jacob Marx et al., Ballistic performance of composite metal foam against large caliber threats, Composite Structures, Volume 225, October 2019
- ²³ LW155, advanced planning briefing to industry, J. Shields, May 2002
- ²⁴ R. Paytan, R. Mazor, “Titanium Road wheels: A Cost-Effective Low-Risk Alternative for Legacy and Next Generation Combat Vehicles”, In Proceedings of the Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium (GVSETS), NDIA, Novi, MI, Aug. 13-15, 2019
- ²⁵ Trends in the defense market: a titanium perspective, H. Seiner, Proc. International Titanium Conference, Titanium Europe 2017, May 2017, Amsterdam, Netherlands
- ²⁶ Report to Congressional Committees, GAO-17-370, March 2017, <http://www.gao.gov/assets/690/683688.pdf>
- ²⁷ ExxonMobil 2019: Outlook for energy a perspective to 2040, October 2019, <https://www.ief.org/resources/files/events/ief-lecture-exxonmobils-2019-outlook-for-energy-a-perspective-to-2040/exxonmobil-2019-outlook-for-energy-a-perspective-to-2040.pdf>
- ²⁸ Accord de Paris sur le réchauffement climatique approuvés le 12 décembre 2015, http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php
- ²⁹ UNEP. The Emissions Gap Report 2018. United Nations Environment Programme, Nairobi, November 2018 http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26895/EGR2018_FullReport_EN.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- ³⁰ IEA (2020), World Energy Outlook 2020, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	157/158

- ³¹ ExxonMobil Outlook for Enrgy: a perspective to 2040, october 2019 https://corporate.exxonmobil.com/-/media/Global/Files/outlook-for-energy/2019-Outlook-for-Energy_v4.pdf
- ³² BP Energy Outlook 2020, September 2020, <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2020.pdf>
- ³³ BP Statistical Review of World Energy 2020, 69th edition, June 2020, <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>
- ³⁴ Annual Energy Outlook 2020 with projections to 2050, US Energy Information Administration, January 2020 <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2020%20Full%20Report.pdf>
- ³⁵ S.S. Ushkov and B.G. Ushakov, "Titanium structural alloys," Advanced Materials and Technologies, St. Petersburg, TsNII KM Prometei, 1993, pp. 35 - 36
- ³⁶ International Gas Union (IGU) 2020 World LNG Report, February 2020, <https://www.igu.org/app/uploads-wp/2020/04/2020-World-LNG-Report.pdf>
- ³⁷ Global gas & LNG outlook to 2035, Energy Insights by McKinsey, September 2019 <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-gas-and-lng-outlook-to-2035>
- ³⁸ IAEA, Nuclear power reactors in the world, reference data series No.2, 2019 edition, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-40_web.pdf
- ³⁹ IAEA, Power Information Sytem, December 2020, <https://pris.iaea.org/pris/>
- ⁴⁰ IAEA, Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, Reference Data Series No. 1, IAEA, Vienna (2020), https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-1-40_web.pdf
- ⁴¹ The big, green, clean machine – a nuclear renaissance update for the titanium industry, D. Schumerth, Proc. International Titanium Association, Titanium 2009, Waikoloa, Hawaiï, USA
- ⁴² OTEC Océanothermie, David Levrat, rapport ingénieur ENSEEIHT 2003, juin 2004 révisée octobre 2004.
- ⁴³ OTEC Technology- A World of Clean Energy and Water, R. Magesh, Proc. of the World Congress on Engineering 2010 Vol II, WCE 2010, June 30 - July 2, 2010, London, U.K., http://www.iaeng.org/publication/WCE2010/WCE2010_pp1618-1623.pdf
- ⁴⁴ 2007 Survey of Energy Resources World Energy Council 2007, www.worldenergy.org/documents/otec_country_notes.pdf
- ⁴⁵ OTEC & TIDAL energy, P. Bansal, <http://www.che.iitm.ac.in/~sjayanti/presentations/final1.ppt>
- ⁴⁶ Ocean thermal energy conversion : information needs assessment, National Oceanic & Atmospheric Administration, september 2012, <http://coastalmanagement.noaa.gov/otec/docs/otecassessment.pdf>
- ⁴⁷ Ocean thermal energy conversion : assessing potential physical, chemical and biological impacts and risks, National Oceanic & Atmospheric Administration, June 22-24, 2010, http://crrc.unh.edu/sites/crrc.unh.edu/files/media/docs/Workshops/otec_2/OTECII_effects_withappendix.pdf
- ⁴⁸ Annual report, Ocean Energy Systems, 2016, <https://report2016.ocean-energy-systems.org/>
- ⁴⁹ http://www.otecnews.org/wp-content/uploads/2013/11/Ikegami_Mutair_Saga_University.pdf
- ⁵⁰ An assessment of the performance and potential of OTEC innovation clusters worldwide, Master thesis, Kevin Salz, May 2018, <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A863035f9-ed11-4737-aa76-d854641da6e0>
- ⁵¹ CEFIC 2020 Facts & Figures of the European Chemical Industry
- ⁵² Implantable Medical Devices Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast 2016 – 2024, Transparency Market Research, August 2016
- ⁵³ Le marché du titane métal: comment bâtir une stratégie d’approvisionnement à court, moyen et long termes, P.-F. Louvigné, convention n°2004-00290-00-07, novembre 2007
- ⁵⁴ Opportunities for low cost titanium in reduced fuel consumption, improved emissions, and enhanced durability heavy-duty vehicle, EHK Technologies, Juillet 2002, www.ehktechnologies.com
- ⁵⁵ Titanium in automotive production, Olivier Schauerter, Volkswagen AG Wolfsburg, Advanced Engineering Materials June 2003,5,N°6, p.411-418.
- ⁵⁶ Toyota MIRAI Fuel Cell Vehicle and Progress Toward a Future Hydrogen Society, Toshihiko Yoshida, The Electrochemical Society Interface, Summer 2015, 45-49
- ⁵⁷ Rutile and its applications in earth sciences, G. Meinhold, Earth-Science Reviews 102 (2010), 1-28
- ⁵⁸ A review of the production cycle of titanium dioxide pigment, M. Gazquez, J. Bolivar, R. Garcia-Tenorio and F. Vaca, Materials Sciences and Applications, 2014, 5, 441-458
- ⁵⁹ A new method for production of titanium dioxide pigment, S. Middlemas, Z. Fang and P. Fan, Hydrometallurgy 131-132 (2013), 107-113

Etude de veille sur le marché du titane 2018 – 2020	Page
Edition publique	158/158

- ⁶⁰ Chemistry and mineralogy of titania-rich slags. Part 1 – Hemo-ilmenite; sulphate and upgraded titania slags, M. Guéguin and F. Gardarelli, *Mineral Processing & Extractive Metall. Rev.*, 28, 2007, 1-58,
- ⁶¹ Outlook of Japan's titanium industry 2013, S. Higuchi, Proc. International Titanium Conference, October 6-9 2013, Las Vegas, Nevada, USA
- ⁶² Summary of emerging titanium cost reduction technologies, EHK Technologies, January 2004
- ⁶³ Impact des différents scénarii d'évolution des filières industrielles du titane sur les conditions d'approvisionnement à l'horizon 2005-2010, P.-F. Louvigné, conv. n°01830007, MINEFI, DGEMP/DIREM, Novembre 2003
- ⁶⁴ Non-melt processing of "low-cost" Armstrong titanium and titanium alloys powders, W. Peter, Proc. of the Light Metals Technology Conference 2007
- ⁶⁵ D. Macdonald, R. Fernández, F. Delloro, B. Jodoin. Cold Spraying of Armstrong Process Titanium Powder for Additive Manufacturing. *Journal of Thermal Spray Technology*, ASM International/Springer, 2017, 26 (4), pp.598-609
- ⁶⁶ Novel processing to produce Ti and Ti alloy powders on a continuous basis, J. C. Withers, Proc. International Titanium Association, Titanium 2009, Waikoloa, Hawaiï, USA
- ⁶⁷ Production of Titanium Metal by an Electrochemical Molten Salt Process, F. Fatollali-Frad, theses, May 2017
- ⁶⁸ Innovative process for manufacturing hydrogenated titanium powder for solid state production of P/M titanium alloy components, O. Ivasishin, Proc. International Titanium Conference, Titanium 2010, Orlando, Florida, USA
- ⁶⁹ Titanium—an opportunity and challenge for South Africa. The 7th International Heavy Minerals Conference 'What next', The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, D.S. van Vuuren, 2009
- ⁷⁰ S J Oosthuizen and J J Swanepoel 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 430 012008
- ⁷¹ Separation of Ultra High Purity Alpha Titanium Sponge (>98%) from Titanium dioxide by Direct Reduction, J. Ephraim, Proc. International Titanium Association, Titanium Europe 2014, Sorrento, Italy, May 19-21, 2014
- ⁷² http://fr.wikipedia.org/wiki/Fabrication_additive
- ⁷³ <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/2/261/pdf>
- ⁷⁴ Friction stir welding and hybrid laser welding provide new solutions for titanium manufacturing, J. Bernath, Proc. International Titanium Association, Titanium 2009, Waikoloa, Hawaiï, USA
- ⁷⁵ Ocean Thermal Energy Corporation, <http://www.otecorporation.com>
- ⁷⁶ A high performance titanium sheet for plate type heat exchanger, D. Hayashi, Proc. International Titanium Conference, Titanium 2010, Orlando, Florida, USA
- ⁷⁷ Ocean Energy System working group 11 on OTEC: <http://tidalenergytoday.com/2017/06/19/global-map-of-otec-plants-comes-to-light/>
- ⁷⁸ China Titanium Metal Import & Export Trends, F. Faizulla, Proc. International Titanium Association, Titanium 2007, Orlando, Florida, USA