



Observatoire  
de la sécurité des flux  
et des matières énergétiques

# LES MATIÈRES PREMIÈRES CRITIQUES DE L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE

Hafnium | Indium | Niobium | Zirconium

RAPPORT #11 – Mars 2022



<b>À PROPOS DE L'OBSERVATOIRE .....</b>	<b>4</b>
<b>À PROPOS DES AUTEURS .....</b>	<b>5</b>
<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>6</b>
<b>PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE .....</b>	<b>6</b>
<b>CARTE : RÉSERVES ET PRODUCTIONS MONDIALES DE MINÉRAIS STRATÉGIQUES POUR LA FILIÈRE NUCLÉAIRE .....</b>	<b>7</b>
<b>CARTE : LES ACTEURS DE LA PRODUCTION RAFFINÉE DE MINÉRAIS STRATÉGIQUES POUR LA FILIÈRE NUCLÉAIRE .....</b>	<b>8</b>
<b>PARTIE I – LES MATIÈRES PREMIÈRES DE L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE .....</b>	<b>9</b>
<b>À RETENIR.....</b>	<b>9</b>
<b>LA DYNAMIQUE MONDIALE DE LA FILIÈRE ÉLECTRONUCLÉAIRE .....</b>	<b>10</b>
LES PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DE L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE MONDIALE .....	10
LES PAYS EN TÊTE DES CHOIX TECHNOLOGIQUES DU NUCLÉAIRE .....	11
<b>LES MÉTAUX DANS L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE.....</b>	<b>13</b>
LES MINÉRAIS REQUIS POUR DES PARTIES CLÉS D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE .....	13
COMMENT QUANTIFIER LES BESOINS FUTURS EN MINÉRAIS ?.....	14
<b>PARTIE 2 - LES MÉTAUX DES GAINES DE COMBUSTIBLES NUCLÉAIRES.....</b>	<b>15</b>
<b>MISE AU POINT TECHNIQUE : LES COMBUSTIBLES NUCLÉAIRES ET LEURS ASSEMBLAGES.....</b>	<b>15</b>
<b>ZIRCONIUM : MATIÈRE VITALE DE L'ÉLECTRONUCLÉAIRE .....</b>	<b>16</b>
7 ÉLÉMENTS À RETENIR SUR LES DYNAMIQUES DU ZIRCONIUM NUCLÉAIRE .....	16
L'IMPORTANCE ÉCONOMIQUE DU ZIRCONIUM POUR L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE .....	17
LES RISQUES SUR LE MINÉRAI DE ZIRCONIUM.....	18
LES RISQUES SUR L'ÉPONGE DE ZIRCONIUM .....	22
LES RISQUES SUR LES ALLIAGES DE ZIRCONIUM .....	23
<b>NIOBIUM : DES BESOINS CROISSANTS À ANTICIPER .....</b>	<b>24</b>
5 ÉLÉMENTS À RETENIR SUR LES DYNAMIQUES DU NIOBIUM NUCLÉAIRE .....	24
L'IMPORTANCE ÉCONOMIQUE DU NIOBIUM POUR LA FILIÈRE NUCLÉAIRE.....	25
LES RISQUES SUR L'APPROVISIONNEMENT EN RESSOURCES DE NIOBIUM.....	26
FOCUS : LES PISTES POUR RÉDUIRE LA DÉPENDANCE À LA FILIÈRE BRÉSILIENNE .....	27
<b>FOCUS : LE TANTALE EN CHIFFRES CLÉS.....</b>	<b>30</b>
L'USAGE DU TANTALE.....	30

LES RISQUES SUR LES RESSOURCES DE TANTALE .....	30
<b>PARTIE 3 : LES MÉTAUX DES BARRES DE CONTRÔLE .....</b>	<b>31</b>
MISE AU POINT TECHNIQUE : LES BARRES DE CONTRÔLES .....	31
<b>INDIUM : UNE MATIÈRE CRUCIALE POUR LE CONTRÔLE DES RÉACTEURS PWR.....</b>	<b>32</b>
5 ÉLÉMENTS À RETENIR SUR LES DYNAMIQUES DE L'INDIUM NUCLÉAIRE .....	32
L'IMPORTANCE ÉCONOMIQUE DE L'INDIUM POUR LA FILIÈRE NUCLÉAIRE .....	33
LES RISQUES SUR L'APPROVISIONNEMENT EN INDIUM .....	34
LES RISQUES SUR LA PRODUCTION D'INDIUM.....	35
<b>HAFNIUM : REGAIN D'INTÉRÊT POUR LA MATIÈRE HISTORIQUE DES BARRES DE CONTRÔLE .....</b>	<b>38</b>
5 ÉLÉMENTS À RETENIR SUR LES DYNAMIQUES DE LE HAFNIUM.....	38
L'IMPORTANCE ÉCONOMIQUE DU HAFNIUM POUR LA FILIÈRE NUCLÉAIRE.....	39
LES RISQUES SUR LES RESSOURCES MINIÈRES DE HAFNIUM.....	40
LES RISQUES POUR LA PRODUCTION DE HAFNIUM .....	41
FOCUS SUR LES STRATÉGIES DE LA CHINE, DE L'INDE ET LA RUSSIE POUR RÉDUIRE LEUR DÉPENDANCE AU DUOPOLE FRANCO-AMÉRICAIN .....	42
FOCUS SUR LE PROJET DE DUBBO EN AUSTRALIE : UNE NOUVELLE SOURCE DE HAFNIUM ? ....	43
<b>FOCUS SUR LE CADMIUM .....</b>	<b>44</b>
L'IMPORTANCE ÉCONOMIQUE DU CADMIUM POUR LA FILIÈRE NUCLÉAIRE.....	44
LES RISQUES SUR L'APPROVISIONNEMENT EN CADMIUM .....	44
<b>FOCUS SUR LE CARBURE DE BORE.....</b>	<b>45</b>
L'IMPORTANCE DU CARBURE DE BORE POUR LA FILIÈRE NUCLÉAIRE.....	45
LES RISQUES SUR LES APPROVISIONNEMENTS EN CARBURE DE BORE .....	45
<b>PARTIE III – LES MATIÈRES PREMIÈRES POUR LA CONSTRUCTION DES CENTRALES.....</b>	<b>46</b>
<b>À RETENIR .....</b>	<b>46</b>
<b>FOCUS SUR LE BÉTON .....</b>	<b>47</b>
<b>FOCUS SUR L'ACIER .....</b>	<b>48</b>
<b>FOCUS SUR L'ALUMINIUM.....</b>	<b>49</b>
<b>FOCUS SUR LES TERRES RARES.....</b>	<b>50</b>
<b>FOCUS SUR LE BÉRYLLIUM .....</b>	<b>51</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>52</b>



Observatoire  
de la sécurité des flux  
et des matières énergétiques

L'**Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques** (OSFME) est coordonné par l'Institut de relations internationales et stratégiques (**IRIS**), en consortium avec **Enerdata** et **Cassini**, dans le cadre d'un contrat avec la direction générale des Relations internationales et de la Stratégie (**DGRIS**) du ministère des Armées.

Plusieurs autres rapports de l'Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques (OSFME) sont déjà accessibles en ligne sur :

[www.iris-france.org/observatoires/observatoire-securite-flux-energie/](http://www.iris-france.org/observatoires/observatoire-securite-flux-energie/)

<b>Septembre 2019</b>	<b>Rapport #1 - La Belt and Road Initiative et la stratégie de sécurisation des approvisionnements énergétiques chinois en Afrique</b>
<b>Décembre 2019</b>	<b>Rapport #2 - Les investissements chinois, russes et américains dans le secteur énergétique européen</b>
<b>Mars 2020</b>	<b>Rapport #3 - Les nouvelles configurations des marchés du GNL et leurs implications géopolitiques</b>
<b>Juin 2020</b>	<b>Rapport #4 - La compétition internationale pour les technologies bas carbone : vers une nouvelle géopolitique de l'énergie ?</b>
<b>Septembre 2020</b>	<b>Rapport #5 - Les stratégies nucléaires civiles de la Chine, des États-Unis et de la Russie</b>
<b>Décembre 2020</b>	<b>Rapport #6 - L'alliance européenne des batteries : enjeux et perspectives européennes</b>
<b>Mars 2021</b>	<b>Rapport #7 - Les perspectives d'évolution des biocarburants : jeux des acteurs et enjeux fonciers</b>
<b>Juin 2021</b>	<b>Rapport #8 - Les enjeux énergétiques des pays rive sud de la Méditerranée : Algérie, Libye, Égypte</b>
<b>Septembre 2021</b>	<b>Rapport #9 - Les stratégies de transition énergétique des armées : Allemagne   Australie   Canada   Danemark   États-Unis   Pays-Bas   Royaume-Uni</b>
<b>Décembre 2021</b>	<b>Rapport #10 – Les enjeux géostratégiques de la filière hydrogène</b>
<b>Mars 2021</b>	<b>Rapport #11 – Les matières premières critiques de l'industrie nucléaire : Hafnium   Indium   Niobium   Zirconium</b>

## COORDINATION ET ÉDITION

---

### Pierre Laboué

**Pierre Laboué** est chercheur à l'IRIS au sein du programme « Climat, énergie et sécurité ». Spécialisé sur les questions énergétiques, il pilote l'Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques pour le compte de la DGRIS du ministère des Armées. Il enseigne à l'IRIS Sup et gère la formation Enjeux géostratégiques de l'énergie. Avant de rejoindre l'IRIS, Pierre Laboué a travaillé à The Oil & Gas Year, Xerfi et à l'ambassade de France en Ouzbékistan comme attaché économique.

## À PROPOS DE L'AUTEUR

---

### Teva Meyer

**Teva Meyer** est maître de conférences en géographie et géopolitique au sein du Centre de Recherches sur les Économies, les Sociétés, les Arts et les Techniques (CRESAT-UHA Mulhouse). Spécialiste de l'analyse des dynamiques spatiales du nucléaire militaire et civil, il dirige différents programmes de recherche en France, aux États-Unis et en Grande-Bretagne sur cette thématique et enseigne la géopolitique et la géographie critique dans plusieurs universités, dont l'Institut Français de Géopolitique et l'Université de Haute-Alsace.

## À PROPOS DU CARTOGAPHE

---

### David Amsellem

**David Amsellem** a travaillé plusieurs années en tant que consultant indépendant pour des entreprises et groupes multinationaux. Il décide de créer le cabinet de conseil Cassini, pour promouvoir la géographie et la carte géopolitique comme outil d'analyse, de communication et d'aide à la décision. Docteur en géopolitique, David Amsellem s'est spécialisé dans les questions d'aménagement urbain, de transport public et de gestion des ressources énergétiques, en particulier au Proche et au Moyen-Orient.

## REMERCIEMENTS

L'OSFME tient à remercier les personnes suivantes pour leur soutien :

- **Maxime Kertzinger**, ingénieur d'étude stagiaire au CRESAT
- **Thomas Lapi**, assistant de recherche à l'IRIS au sein du programme « Climat, énergie et sécurité ». Grâce à ses travaux de veille, de recherche bibliographique et de rédaction, il contribue directement au développement des projets de recherche de l'IRIS sur les questions énergétiques. Avant de rejoindre l'IRIS, Thomas Lapi a réalisé un stage au LIED, le laboratoire des interdisciplinaires des énergies de demain, sous la direction d'Alain Prinzhofer, directeur scientifique du GEO4U (Brésil). Thomas Lapi développe une spécialisation sur l'hydrogène naturel. Il prépare un master 2 en Énergie, Écologie, Société (E2S) de l'université de Paris.

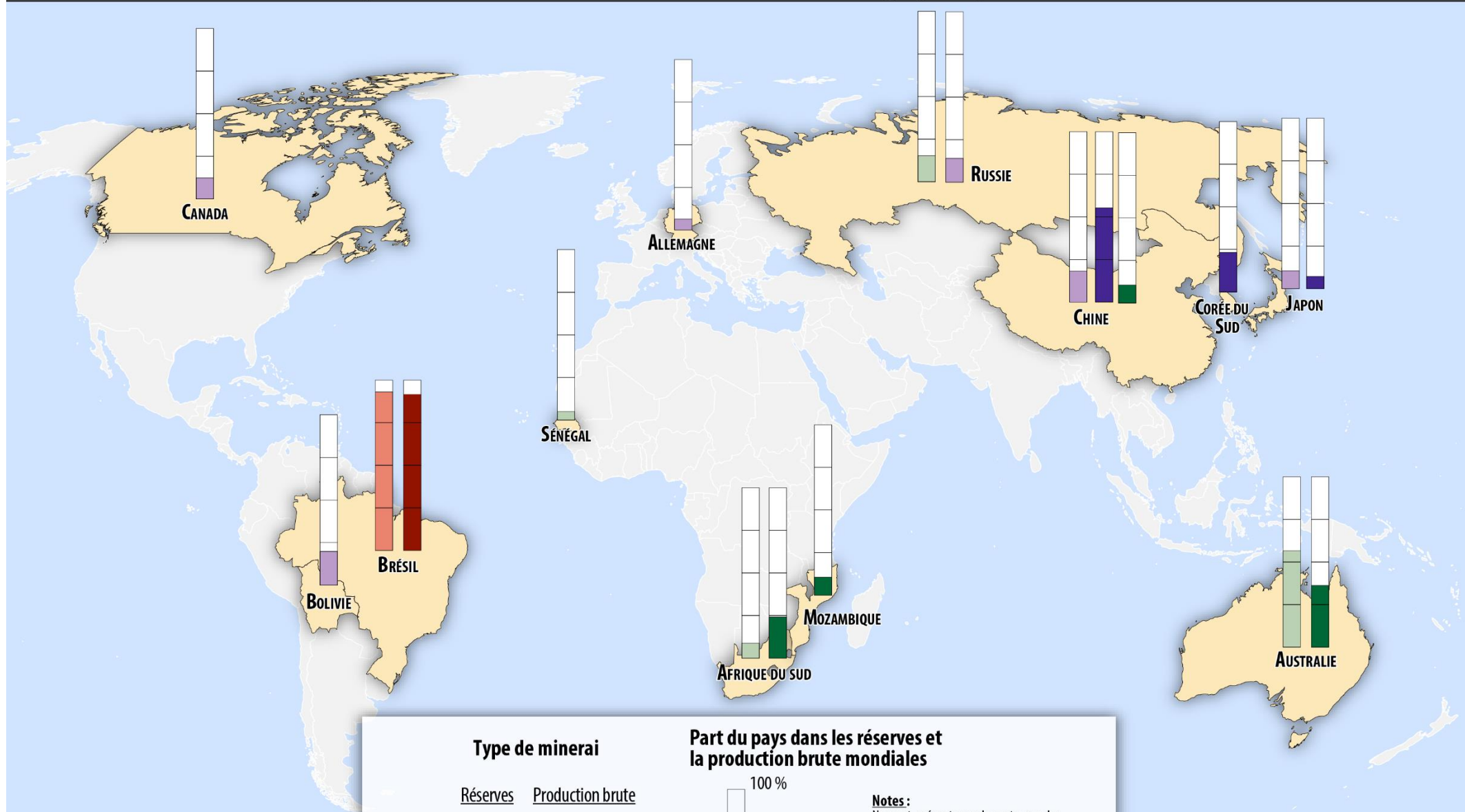
## PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE

- Ce rapport se concentre principalement sur les matières de gainage et de contrôle de la réaction, en raison de leur **durée de remplacement courte nécessitant des flux réguliers** et de leur **criticité dans le fonctionnement quotidien** des centrales nucléaires.
- Les matières premières nécessaires à la construction des centrales sont résumées en fin de rapport. Ces matières apparaissent ne sont nécessaires qu'au moment de la construction des îlots nucléaires et conventionnels.
- Les enjeux de **l'uranium** ne seront par abordés ici, car ils ont déjà été traités dans le rapport 5 de l'OSFME : MEYER Teva, COPINSCHI Philippe (septembre 2020) Les stratégies nucléaires civiles de la Russie, de la Chine et des États-Unis, OSFME, disponible sur le site Internet de l'IRIS.

### AVERTISSEMENT

L'Observatoire de la sécurité des flux et matières énergétiques (OSFME) a vocation à contribuer au débat public sur les questions d'énergie et de sécurité. Les publications et les analyses de l'OSFME n'engagent que leurs auteurs et ne peuvent d'aucune manière être attribués au ministère des Armées.

# Réserves et productions mondiales de minerais stratégiques pour la filière nucléaire

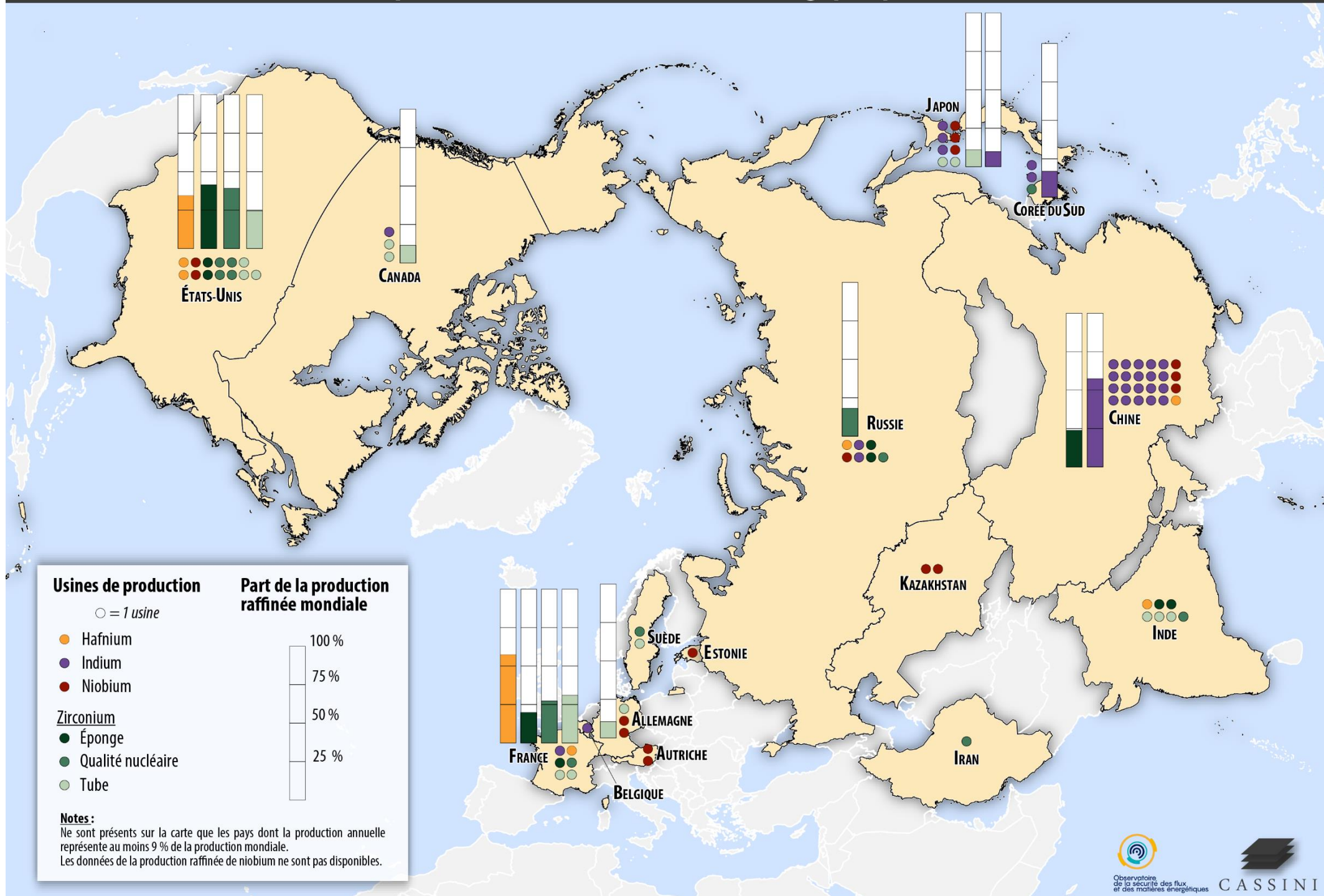


Type de minerai	Part du pays dans les réserves et la production brute mondiales	
	Réserves	Production brute
Indium		
Niobium		
Zirconium		

100 %  
75 %  
50 %  
25 %

**Notes:**  
Ne sont présents sur la carte que les pays dont les réserves cumulées représentent au moins 80 % des réserves mondiales.  
Ne sont présents sur la carte que les pays dont la production brute cumulée représente au moins 80 % de la production brute mondiale.

# Les acteurs de la production raffinée de minerais stratégiques pour la filière nucléaire



Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques

CASSINI



# PARTIE I – LES MATIÈRES PREMIÈRES DE L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE

## 7 ÉLÉMENTS À RETENIR SUR LES BESOINS EN MINÉRAIS DE LA FILIÈRE NUCLÉAIRE

Le gainage du combustible nucléaire utilise du zirconium de qualité nucléaire et des alliages de zirconium-niobium avec des ajouts mineurs de nickel, d'étain et de chrome.

Le segment des barres de contrôles s'articule autour de trois types de matières : le carbure de bore, le hafnium et les alliages argent-indium-cadmium.

La construction d'une centrale nucléaire fait appel à de nombreuses matières, dont le béton, l'acier et l'aluminium.

Six minerais étudiés apparaissent stratégiques pour la filière nucléaire à l'horizon 2050 : le zirconium, le niobium, le hafnium, le bore, l'indium et le cadmium.

La quantification des besoins en minerais pour l'industrie nucléaire se heurte à plusieurs difficultés. Elle dépendra de la croissance du parc nucléaire mondial, des technologies nucléaires déployées et des solutions de substitutions disponibles.

Le volume de minerais bruts consommés par la filière nucléaire pourrait être multiplié par 2 voire 2,5 à l'horizon 2050, dans le cas des scénarios 812 GWe et 1000 GWe. Mais les besoins de la filière nucléaire en minerais bruts ne représenteraient qu'une fraction des capacités de production mondiale disponibles en 2020.

Toutefois l'industrie nucléaire consomme des produits extrêmement raffinés. Les risques éventuels sur l'approvisionnement ne se trouveraient donc pas tant au niveau de la production des matières que de leur transformation.

## LA DYNAMIQUE MONDIALE DE LA FILIÈRE ÉLECTRONUCLÉAIRE

### LES PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DE L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE MONDIALE

#### Fortes incertitudes sur le parc nucléaire mondial à l'horizon 2050

**La croissance future du secteur nucléaire dépend de trois inconnues** : le prolongement de réacteurs, la construction de nouveaux réacteurs et la fermeture de réacteurs. Le nucléaire représentait environ 10 % du bouquet électrique mondial en 2020. À moyen terme, soit l'horizon 2030, la part du nucléaire dans le bouquet électrique mondial ne devrait croître que marginalement. À long terme, soit l'horizon 2050, l'AIEA envisage deux scénarii : une projection conservatrice tablant sur une baisse de la capacité à 350 GW(e) en 2050 et une projection haute envisageant une augmentation à 792 GW(e) sur cette période. Les projections proposées par les autres instances internationales dans leurs scénarii énergétiques restent sur des évaluations hautes comparables : 812 GW(e) pour le *Net Zero Scenario* de l'AIE, entre 620 GW(e) et 1000 GW(e) pour le World Energy Council.

#### Asie, Afrique, Moyen-Orient : principaux relais de croissance du nucléaire

**Les constructions de nouveaux réacteurs nucléaires ne seront pas réparties spatialement de manière homogène dans le monde.** L'annonce faite par Emmanuel Macron de construire six nouveaux réacteurs est un cas unique dans la géographie du nucléaire, mais cette annonce ne vient pas renverser les tendances lourdes. À l'heure actuelle, les relais de croissance de l'industrie ne sont ni en Europe ni en Amérique du Nord, mais principalement en Asie, Afrique et Moyen-Orient.

#### La technologie PWR, principale technologie nucléaire à moyen et long terme

**Les matières premières nécessaires aux évolutions futures des parcs nucléaires dépendront des choix de technologie de réacteurs.** Les modèles peuvent sommairement être divisés en six groupes en fonction du combustible utilisé, du système de refroidissement et du type de modération du réacteur. À court, moyen et long terme, c'est la technologie PWR qui restera la plus répandue et ses spécificités détermineront en grande partie les besoins en matières premières de la filière nucléaire mondiale, par catégorie et volume de minerais. Mais **la répartition spatiale des technologies de réacteurs n'est pas homogène** et la technologie PWR ne s'imposera pas partout. La Russie a fait le choix de la technologie VVER et plusieurs pays disposent d'un parc nucléaire diversifié, comme l'Inde et la Chine.

#### Absence de solution de substitution à court et moyen terme en minerais

**À court et moyen terme, les métaux utilisés dans les gaines de combustibles et les barres de contrôle ne devraient pas trouver de substituts.** L'accident de Fukushima a pourtant stimulé la recherche d'alternatives pour les gainages. Le molybdène avait un temps été envisagé, mais des études semblent montrer des limites structurelles. Peu d'évolutions sont à prévoir pour les métaux des barres de contrôle, si ce n'est une augmentation du rôle du hafnium. À plus long terme, l'introduction de réacteur à neutrons rapides (RNR) ne changera pas non plus cet équilibre. **Les SMR n'apporteront pas d'évolution notable.** Ceux appliquant des miniaturisations de réacteurs BWR/PWR réutiliseront les mêmes métaux.

## LES PAYS EN TÊTE DES CHOIX TECHNOLOGIQUES DU NUCLÉAIRE

**Les acteurs de la filière nucléaire ne sont pas systématiquement ceux qui contrôlent la production et le raffinage des matières premières nécessaires au déploiement de réacteurs.** Les rapports de forces entre les acteurs qui structurent la filière et qui tentent d'imposer leur solution technologique définiront en grande partie les types de réacteurs et de combustibles privilégiés et les besoins en matière de la filière nucléaire d'où découleront les éventuelles tensions en minerais critiques<sup>1</sup>.



**Le marché de la vente de réacteurs nucléaires est dominé par la Russie depuis plusieurs années**, qui concentre 30 % des parts de marché, construisant 21 tranches dans 12 pays.

Depuis 2007, la filière russe est structurée verticalement dans une unique entreprise, Rosatom, qui contrôle la totalité de la chaîne de valeur, dont l'ingénierie et la production du combustible. Cette structuration en guichet unique constitue un des principaux atouts de la Russie sur le marché mondial. L'exportation, qui représente 50 % du chiffre d'affaires de Rosatom, est vitale pour le carnet de commandes de l'industrie nucléaire russe, en raison des retards du développement du parc national de réacteur. La stratégie de ventes à l'étranger repose sur trois autres atouts : un réseau commercial se confondant dans le réseau diplomatique ; la proposition de solution de financement des ventes de réacteurs ; l'existence d'un ensemble de pays captifs de par la présence de réacteurs soviétiques. **Cette domination sur le marché de l'export devrait favoriser, à court et moyen terme, les technologies VVER utilisées par Rosatom et les matières premières qui lui sont nécessaires.** Cette dynamique est renforcée par la stratégie russe qui assortit la fourniture de combustible avec la vente de réacteurs VVER. Toutefois, depuis le milieu des années 2000, des solutions de diversification pour les combustibles ont été développées pour les réacteurs VVER par Westinghouse, en partenariat avec Euratom. La guerre en Ukraine de 2022 pourrait raviver ces alternatives.



**En dépit de sa stratégie, la Chine reste loin derrière la Russie à l'export.** Trois grandes entreprises structurent la filière nucléaire chinoise : la China National Nuclear Corporation (CNNC) ; la China General Nuclear Power Corporation (CGN) ; la State Power Investment Corporation (SPIC).

Comme la Russie, l'export est central pour la stratégie chinoise afin de contrebalancer le manque de dynamisme de son marché intérieur et les retards pris sur l'extension de son parc. Le nucléaire apparaît également comme le porte-étendard de la transition industrielle du pays. La stratégie chinoise repose sur trois atouts : (1) une maîtrise presque complète de la chaîne de valeur et le développement d'une offre de réacteurs variés ; (2) une capacité d'assemblage évaluée en 7 et 9 réacteurs par an et jusqu'à 30 unités simultanément ; (3) des facilités de financement pour les importateurs. Mais, à ce jour, la Chine n'a vendu que quatre unités en dehors de ses frontières, uniquement au Pakistan. La concurrence entre CNNC, CGN et SPIC s'avère également délétère pour les performances à l'export de la filière chinoise. Si la Chine espère exporter des réacteurs dans les 41 pays de la *Belt and Road Initiative*, ces ambitions ne sont pas concrétisées. De plus, les tensions grandissantes avec Washington ont fortement freiné les projets dans les marchés européens. À moyen terme, il reste à voir si les entreprises chinoises profiteront de la baisse d'activité que pourrait subir Rosatom suite à la guerre en Ukraine.

<sup>1</sup> Pour aller plus loin, voir le rapport 5 de l'OSFME : MEYER Teva, COPINSCHI Philippe (septembre 2020) Les stratégies nucléaires civiles de la Russie, de la Chine et des États-Unis, OSFME, disponible sur le site Internet de l'IRIS



**Face à ces deux pays, les autres exportateurs restent fortement en retrait.** L'hégémonie américaine à l'étranger s'est effondrée à mesure que son tissu industriel se contractait suite à l'accident de la centrale de *Three Mile Island* en 1979. Seuls Westinghouse et plus marginalement le consortium nippo-américain GE-Hitachi proposent des réacteurs à la vente. Mais en dehors des États-Unis, aucune tranche en construction, ou dont la construction est prévue, n'est de technologie américaine. La diplomatie nucléaire américaine n'a pas privilégié la vente de réacteur dans ses stratégies, et les divisions internes au camp Démocrate sur cet enjeu ne devraient pas renverser cette tendance. En France, la perte du contrat d'export aux Émirats arabes unis en 2009 au profit de la Corée du Sud a servi d'électrochoc pour la filière qui a subi depuis plusieurs restructurations permettant une plus forte intégration autour de Framatome et d'EDF. Mais en février 2022, seul le Royaume-Uni, où les centrales sont opérées par EDF, construit de nouvelles tranches de technologie française. Le récent volontarisme exprimé par Emmanuel Macron vis-à-vis de la filière, ainsi que l'intégration du nucléaire dans la taxonomie verte européenne pourrait influencer favorablement à moyen terme le secteur français. Dans le reste du monde, les avancées de fournisseurs alternatifs, sud-coréens (KEPCO), japonais (Toshiba) ou indiens (NPCIL) demeurent modestes.

**Les petits réacteurs modulaires (SMR pour *Small Modular Reactor*) ne représenteront pas une rupture de cette dynamique à court et moyen terme.** La Russie et la Chine sont en 2022 les pays les plus avancés sur ce segment, devant les États-Unis. Les principales offres reprennent des technologies éprouvées (PWR, BWR) qu'ils miniaturisent ou remobilisent des réacteurs de brise-glaces à propulsion atomique. Les nouveaux acteurs sur ce marché, startups émanant des milieux universitaires ou d'industriels historiques, ne sont qu'à l'étape du design. Il en va de même pour les technologies de SMR avancées ne reprenant pas les modèles PWR, PHWR ou BWR<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Seul le prototype chinois de HTR-PM, réacteur SMR à très haute température actuellement fait exception.

## LES MÉTAUX DANS L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE

### LES MINÉRAIS REQUIS POUR DES PARTIES CLÉS D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE

**En dehors de l'uranium, les matières premières de la filière nucléaires peuvent être classées en trois groupes en fonction de leur utilisation finale** : les matières de gainage du combustible ; les matières de contrôle de la réaction ; les matières de la construction des centrales. Chacune se distingue par des besoins physico-chimiques propres ainsi que par des temporalités de consommation différentes.

#### Les gaines du combustible nucléaire

Dans les réacteurs utilisant de l'uranium enrichi ou naturel (PWR et BWR), les pastilles d'uranium, mesurant environ 2 cm de haut, sont empilées dans une gaine pour former un crayon de combustible. Ces crayons sont regroupés en « assemblages » ou « grappes » grâce à un squelette de tubes-guides et de grilles dont l'architecture et le nombre changent en fonction de la technologie utilisée. Il y a 265 crayons pour un assemblage d'EPR par exemple. Dans les BWR, les grappes sont enfermées dans une cage. Pour les réacteurs à eau lourde, les assemblages sont regroupés dans des tubes de force. Le gainage du combustible nucléaire utilise du **zirconium** de qualité nucléaire et des **alliages de zirconium-niobium** avec des **ajouts mineurs de nickel, d'étain et de chrome**. La totalité des réacteurs nucléaires commerciaux actuellement en fonction mobilise ces matières et tous les fournisseurs utilisent du zirconium. À l'heure actuelle, il n'existe pas de concurrent direct aux alliages de zirconium sur le marché des gainages de combustible.

#### Les barres de contrôle de la réaction nucléaire

**Dans les réacteurs nucléaires, le contrôle de la réaction en chaîne est assuré par des barres de commandes, ou barres de contrôle**, mobiles qui sont insérées ou sorties du cœur pour réduire la fission nucléaire, la maintenir ou l'augmenter. Elles assurent également l'arrêt de la réaction en chutant dans le cœur en cas d'accident. Ici également, leurs nombres et architectures varient en fonction des technologies de réacteur. Le segment des barres de contrôles s'articule autour de trois types de matières : le **carbure de bore (B4C)**, le **hafnium (Hf)** et les **alliages argent/indium/cadmium** (Ag 80 %, In 15 %, Cd 5 %). Le hafnium est ajouté principalement aux barres en B4C. Plus marginalement, les barres de contrôle de certains réacteurs VVER de Rosatom utilisent du titanate de dysprosium et de l'acier pour les réacteurs PHWR de technologie canadienne (CANDU).

#### Les îlots nucléaires et les îlots conventionnels

La construction d'une centrale nucléaire demande un inventaire important de matières pour la construction des îlots nucléaire, où se trouvent les bâtiments du réacteur et du combustible, ainsi que les îlots conventionnels où se trouvent les salles des machines transformant la vapeur en électricité. Il s'agit ici principalement de **béton, d'acier, d'aluminium**. Leur consommation durant l'exploitation de la centrale dépend de leur période de remplacement, et varie très fortement. Les plus gros, comme la cuve et l'enceinte de confinement, ne sont pas remplaçables économiquement et limitent la durée de vie d'une centrale.

## COMMENT QUANTIFIER LES BESOINS FUTURS EN MINERAIS ?

**La quantification des besoins en matières premières pour l'industrie nucléaire se heurte à plusieurs difficultés.** Le secret industriel concernant les modèles de réacteurs en développement (petits réacteurs modulaires (SMR) et réacteurs à neutrons rapides (RNR)) rend difficile toute prospective. De plus, il n'existe que peu de travaux offrant une analyse de cycle de vie complète de la filière qui permettrait d'évaluer les besoins futurs. Les travaux n'utilisent pas de méthode de classement par type de technologie de réacteur, ne comptabilisent pas toujours les mêmes matières et n'utilisent pas les mêmes méthodes comptables.

**À ce jour, seule une étude<sup>3</sup> basée sur la centrale nucléaire de Ringhals en Suède, équipée alors de trois PWR et un BWR, comptabilise la consommation complète de matériaux en fonction de la production d'électricité.** Au total, près de 60 tonnes de zirconium, 0,3 tonne de niobium et 0,2 tonne de bore ont été immobilisées pour la construction de la centrale.

**À partir de cette étude, il est possible d'extrapoler dans le tableau ci-dessous les consommations annuelles mondiales de la filière nucléaire pour les matières précédemment identifiées,** en fonction des trois scénarios évoqués plus haut, et de les comparer par rapport à la production annuelle actuelle de ces matières.

### Extrapolation des besoins en minerais pour la filière à l'horizon 2050

		Zr	Nb	Hf	Bore	In	Cd
<b>Conso totale annuelle de Ringhals (kg)</b>		59 890	255	16	200	108	36
<b>Situation en 2022 (393 GWe)</b>	<b>Besoin (t)</b>	<b>6 411</b>	<b>27</b>	<b>1,7</b>	<b>294</b>	<b>11,2</b>	<b>3,7</b>
	Part de la prod totale 2020	0,44%	0,03%	4,5%	<0,001%	1,3%	0,01%
<b>Scénario 350 GWe</b>	<b>Besoin (t)</b>	<b>5 710</b>	<b>24</b>	<b>1,5</b>	<b>262</b>	<b>10</b>	<b>3,3</b>
	Part de la prod totale 2020	0,4%	0,03%	4%	<0,001%	1,2%	0,01%
<b>Scénario 812 GWe</b>	<b>Besoin (t)</b>	<b>13 247</b>	<b>56</b>	<b>3,5</b>	<b>609</b>	<b>23</b>	<b>7,9</b>
	Part de la prod totale 2020	1%	0,08%	9%	<0,001%	2,7%	0,03%
<b>Scénario 1000 GWe</b>	<b>Besoin (t)</b>	<b>16 314</b>	<b>69</b>	<b>4,6</b>	<b>750</b>	<b>29</b>	<b>9,8</b>
	Part de la prod totale 2020	1,2%	0,1%	10%	<0,001%	3,4%	0,04%

Traitement : OSFME / Estimation : Teva Meyer / Source : OCDE-AEN, Assessment of the environmental footprint of nuclear energy systems. Comparison between closed and open fuel cycles Energy, Volume 69, 2014, pages 199-211

**Note méthodologique :** Ces résultats présentent des ordres de grandeur à partir de l'extrapolation des besoins en matériaux considérant les conditions particulières de la centrale de Ringhals et l'absence d'indication sur les technologies de gainage et de contrôle.

<sup>3</sup> OCDE-AEN, Assessment of the environmental footprint of nuclear energy systems. Comparison between closed and open fuel cycles Energy, Volume 69, 2014, pages 199-211

## PARTIE 2 - LES MÉTAUX DES GAINES DE COMBUSTIBLES NUCLÉAIRES

### MISE AU POINT TECHNIQUE : LES COMBUSTIBLES NUCLÉAIRES ET LEURS ASSEMBLAGES

Les réacteurs nucléaires ne consomment pas directement de l'uranium, mais des assemblages contenant les pastilles de matières fissiles et devant assurer leur confinement mécanique. Les matières sont sélectionnées pour leur résistance à l'oxydation, ainsi que pour leur bonne conductivité thermique et leur transparence neutronique. Les types d'assemblages dépendent des modèles de réacteurs.

**À courte et moyenne échéance, les gaines de combustible continueront à utiliser du zirconium et du niobium**, en absence d'alternative techniquement et commercialement mûre et considérant que les PWR, BWR et PHWR constitueront la majeure partie des constructions à venir.

#### Vue d'ensemble des différents assemblages en fonction des technologies de réacteur



Traitement : OSFME / Source : Teva Meyer

## ZIRCONIUM : UNE MATIÈRE VITALE DE L'ÉLECTRONUCLÉAIRE

### 7 ÉLÉMENTS À RETENIR SUR LES DYNAMIQUES DU ZIRCONIUM NUCLÉAIRE

#### Focus sur le minerai de zirconium

La criticité géologique du zirconium apparaît relativement faible. Les réserves de zirconium sont abondantes. Mais l'absence d'ouverture de nouvelles mines pourrait faire peser un risque sur l'approvisionnement en minerai brut à moyen terme. Il n'existe pas de substitution au zirconium à court et moyen terme pour les gaines nucléaires.

La criticité géopolitique du minerai de zirconium est importante. L'Australie concentre la moitié des réserves mondiales. Le pays représentait, avec et l'Afrique du Sud, la moitié de la production mondiale.

Cinq entreprises privées contrôlaient près des trois quarts de la production mondiale de minerai de zirconium en 2021 : l'Australien Iluka, l'Américain Tronox, l'Anglo-Australien Rio Tinto, l'Irlandais Kenmare et le Sénégalais TiZir, détenu par des capitaux franco-australiens.

Les risques socio-environnementaux représentent également une menace en termes d'approvisionnement. Les troubles sociaux qui ont touché en juin 2021 la mine de Richards Bay en Afrique du Sud, exploité par Rio Tinto, conduisant à l'assassinat d'un des cadres, ont entraîné l'arrêt de l'exploitation et une augmentation immédiate des prix sur le marché du zirconium.

#### Focus sur les éponges de zirconium

À l'échelle mondiale, les moyens de production d'éponge de zirconium (8 600 tonnes annuelles), dépassent très largement les besoins de la filière électronucléaire (5 000 tonnes par an).

Seuls cinq pays disposaient de capacité de production de zirconium de qualité nucléaire en janvier 2022 : les États-Unis, la Chine, la France, la Russie et l'Inde.

Le nombre de producteurs d'éponge de zirconium déhafnésisé est extrêmement limité. L'Américain ATI est le premier producteur mondial, suivi du Français Framatome et du Chinois State Nuclear Baoti Zirconium.



## L'IMPORTANCE ÉCONOMIQUE DU ZIRCONIUM POUR L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE

### Le nucléaire, un consommateur marginal de zirconium au niveau mondial

**L'industrie nucléaire est un consommateur extrêmement marginal de zirconium.** L'industrie de la céramique représentait 54 % de la consommation de zirconium en 2020. Ce minerai est utilisé dans la fabrication de carreaux pour l'utilisation domestique (salle de bain, cuisine, vaisselle). Avec 24 % de la consommation mondiale, la fonderie était le deuxième consommateur de zirconium, très demandé en raison de ses capacités de résistance à la chaleur. 20 % sont dédiés dans diverses applications chimiques, dans des pigments, des cosmétiques, des catalyseurs, des bijoux ou des encres. La consommation de zirconium de forme métallique représentait moins de 3 % de la consommation mondiale. Au total, **entre 0,5 % et 1 % seulement des minerais de zirconium extraits se dirigent vers la filière nucléaire, selon les estimations.** Spatialement, **la Chine est de loin le premier consommateur** de minerai de zirconium. Le pays représente 85 % de la demande mondiale, loin devant l'Australie (5 %), les États-Unis (1 %) et l'Espagne, l'Inde ainsi que l'Afrique du Sud qui se partage les 9 % restant.

### La concurrence d'usages du zirconium entre secteurs

**Les acteurs du nucléaire n'ont, proportionnellement à leur poids, aucune influence sur la formation des prix mondiaux du minerai de zirconium.** Sans cotation publique, l'établissement des prix du minerai de zirconium est peu transparent et dépend de négociations directes entre producteurs et transformateurs. Le marché est volatil et dépend surtout des consommateurs industriels chinois. **La filière nucléaire pourrait être pénalisée par l'augmentation des cours du minerai de zirconium.** Après avoir stagné à 1 700 USD la tonne jusque début 2021, le zirconium de qualité standard a grimpé à 3 000 USD/t en septembre 2021, au plus haut depuis neuf ans. Cette hausse des prix est d'abord conjoncturelle et les prix ne devraient pas rester aussi haut sur le long terme. Elle s'explique par l'arrêt temporaire de certaines mines pendant la crise sanitaire ainsi que la mise en place de nouvelles réglementations environnementales en Chine. **Mais plus structurellement, elle reflète également les tensions croissantes entre la demande et l'offre, ainsi qu'un déficit grandissant de minerai à haute teneur en zirconium.** Après avoir plongé à moins d'un million de tonnes en 2020, des suites de la Covid-19, la demande pourrait atteindre 1,8 million de tonnes à la fin de la décennie. La demande, principalement constituée par l'industrie de la céramique, devrait augmenter parallèlement à l'urbanisation ainsi qu'à la consommation de la classe moyenne en Asie et en Afrique. Dans le même temps, la production, en l'état des mines ouvertes, devrait décliner de 3,6 % par an jusqu'à 2025 selon les analystes de Pyx Ressources. Jusqu'à présent, de petits producteurs comme l'Indonésie ont joué le rôle de régulateur du marché international en faisant varier leur production, mais cette soupape ne pourrait plus suffire à l'avenir. Pour les applications céramiques et en fonderie, le zirconium pourrait être remplacé par la chromite, l'étain l'olivine ou la dolomite, mais les coûts de production limitent toute substitution. De plus, le taux de recyclage du zirconium est extrêmement faible, inférieur à 1 %. Faute d'ouverture de nouvelles exploitations, les besoins en minerai pourraient dépasser durablement les capacités de production et accentuer la compétition sur ces ressources.

## LES RISQUES SUR LE MINÉRAI DE ZIRCONIUM

### Criticité géologique : des gisements abondants

**Les ressources mondiales de zirconium sont abondantes.** Les réserves sont évaluées à 78 millions de tonnes d'oxyde de zirconium (ZrO<sub>2</sub>), soit approximativement 55 années de consommation au niveau de 2021. Pour l'industrie nucléaire, le principal enjeu est plutôt d'accéder à des minerais de qualité suffisante pour assurer la suite du processus de raffinage. **Le zirconium se trouve dans deux types de gisements** : d'un côté, les sables minéraux lourds, avec une forte concentration du zircon produit par l'érosion le long des côtes ou des cours d'eau et, de l'autre, la baddeleyite, qui est rare et présente principalement dans la péninsule de Kola en Russie, et le zircon, inclus dans une grande variété de roches, mais à des teneurs peu suffisantes pour être exploitables. **Les méthodes de production peuvent varier.** La baddeleyite est exploitée dans une mine à ciel ouvert tandis que les sables sont extraits des dunes grâce à des dragues avançant sur des lacs artificiels. Qu'ils s'agissent de la baddeleyite ou du zircon, le minerai de zirconium est toujours un sous-produit de l'extraction d'autres ressources, et principalement les minerais de titane (ilménite ou rutile). Son exploitation et l'ouverture de nouvelles mines sont donc fortement liées à ces matières.

### Criticité géopolitique : Australie et Afrique du Sud à 60 % de la production

**L'Australie concentrait plus de la moitié des réserves (56 %)**, loin devant la Russie (15 %), l'Afrique du Sud (9 %) et le Sénégal (5 %). Tous les gisements ne se valent pas. C'est en Indonésie que les meilleures qualités de gisements de sables ont été identifiées, devant l'Australie. L'intérêt du gisement est aussi affecté négativement par la présence d'uranium ou de thorium dans les sables. **Les réserves en Europe restent très limitées.** L'Ukraine abrite les principaux potentiels, avec des ressources estimées à 674 000 t, principalement dans les gisements proches de la mer d'Azov et d'Irshans'k au nord-ouest de Kyiv. En France, les bassins connus en Bretagne sont modestes et économiquement non viables.

**La production mondiale de zirconium était relativement concentrée.** L'Australie et l'Afrique du Sud dominaient largement le secteur, avec respectivement 36 % et 24 % des parts du marché en 2021, loin devant la Chine (10 %), le Mozambique (9 %), le Sénégal (5 %) et l'Indonésie (4,5 %), les autres pays représentant individuellement moins de 2 %. Au total, 19 pays produisaient du minerai de zirconium.

## Criticité géoéconomique : 5 entreprises privées occidentales en action

**Cinq entreprises dominent la production du minerai de zirconium.** L'Australien Iluka, spécialisé dans l'exploitation des sables est le premier producteur, avec 28 % des parts de marché en 2020. L'Américain Tronox contrôle 19 % de la production de zirconium, principalement comme sous-produit de ses activités dans le titane. Le géant minier Rio Tinto est le troisième producteur de zirconium, comptant pour 16 % du marché. Plus marginale, TiZir contrôle 5 % de la production mondiale grâce à son unique mine sénégalaise de Grande Côte, au nord de Dakar. Enfin, l'Irlandais Kenmare, spécialisé dans les sables minéraux et le titane en premiers lieux, produit 4 % du zirconium grâce à sa mine de Moma au nord du Mozambique. Ces entreprises sont presque exclusivement privées et ne dépendent pas d'intérêts étatiques, sauf partiellement pour TiZir. Les 28 % restant de la production mondiale de minerai de zirconium sont assurés par de très petits producteurs.

## Criticité socio-environnementale : des tensions élevées avec les populations

**De par leurs localisations côtières, les gisements de zirconium se heurtent de plus en plus à des conflits d'usage avec les populations locales,** soit par l'extension résidentielle sur les littoraux, soit par le développement de projets récréatifs ou de zone de protection de la nature et des milieux dunaires. C'est particulièrement le cas en Inde et en Australie. Au Mozambique, l'exploitation d'Angoshe (Zambézie) par le chinois Haiyu est tenue pour responsable de l'augmentation des crues éclairées depuis 2015 suite aux modifications de la topographie côtière par le dragage des dunes. **La teneur en uranium et thorium des gisements de zirconium est un autre point d'achoppement.** En Australie, le projet de Dubbo (Nouvelle-Galles-du-Sud) soulève un mouvement local porté par les militants antinucléaires et mobilisés autant par la crainte d'une augmentation de la radioactivité ambiante, que par l'opposition à une éventuelle exploitation de l'uranium comme coproduit du zirconium. Cette situation pourrait être rapidement handicapante.

### Étude de cas au Sénégal



**Le cas du projet de Niafrang en Casamance (Sénégal) est emblématique de ces tensions.** La

révision du code minier en 2004 par le président Abdoulaye Wade a entraîné l'ouverture de nouvelles exploitations, dont celle de zirconium sur la côte nord du pays à Diogo. En Casamance, un permis de prospection a été octroyé en 2004 sur la totalité du littoral au Canadien Carnegie, rejoint par le chinois Astron qui lui rachète ses parts en 2013. L'exploitation passée du zirconium en Gambie voisine laissait supposer la présence de ressource. Un gisement a été rapidement identifié au nord, près du village de Niafrang. Le projet n'avance qu'au ralenti, car il a ravivé le conflit indépendantiste casamançais. La rébellion, en sommeil depuis les accords de paix de 2012, a instrumentalisé Niafrang comme outil de remobilisation. Plus encore, alors que les factions indépendantistes sont fortement divisées par des guerres intestines, le zirconium apparaît aujourd'hui comme un point d'unité. Ces dernières menacent de reprendre les armes si le projet devait être mené à bien. Parallèlement, une opposition locale s'est structurée auprès des habitants craignant que l'exploitation ne vienne détruire les dunes qui protègent les villages de l'Atlantique et anéantissent les rizières qui constituent leur principale ressource.



## Focus sur le poids de l'industrie nucléaire dans la production de zirconium

Dans certains pays, **l'industrie nucléaire a pris en main l'extraction du zirconium pour assurer son propre développement. C'est le cas au Brésil**, où une des deux exploitations du pays, à Buena près de Rio, est contrôlée par l'entreprise publique Indústrias Nucleares do Brasil, ainsi qu'en Inde où le Department of Atomic Energy exploite la mine de Chavara dans le Kerala. **C'est également le cas en Russie**. En 2021, ARMZ, filiale minière de Rosatom a pris en main le gisement de Tugansk en Sibérie afin d'y développer l'exploitation de zirconium et diversifier la production nationale auparavant centralisée dans la péninsule de Kola. Cette exploitation est spécifiquement ciblée pour alimenter la production de combustible nucléaire par TVEL. **Les liens entre industrie du zirconium et filière nucléaire sont encore plus forts en Ukraine**. Afin d'assurer son indépendance complète vis-à-vis de la Russie, le gouvernement ukrainien avait approuvé fin décembre 2021 un nouveau plan consacré aux combustibles contenant des provisions permettant de relancer la production de zirconium dans le pays ainsi que l'ouverture du marché à des capitaux privés en vendant, sans succès pour le moment, l'United Mining and Chemical Company, responsable des exploitations.

## Focus sur la Russie, la Chine et les États-Unis

**La Russie** concentrait 15 % des réserves mondiales de minerais de zirconium. Mais il s'agit de gisement de baddeleyite. Or, les concentrations de zirconium présents dans la baddeleyite sont relativement faibles, ce qui accroît les coûts d'extraction et relativise l'importance des réserves russes. La Russie, avec seulement 0,6 % de la production mondiale, demeure un acteur mineur du marché mondial. Toutefois, l'industrie nucléaire a largement financé la recherche de nouveaux gisements, avec succès, dans les oblasts de Chitinskaya et de Tomsk en Sibérie.

**Les mines chinoises** ne répondent qu'à 5 % des besoins de la Chine. Les ressources, concentrées 80 % dans le Hainan dont 90 % près de la ville de Wenchang, sont limitées et présentent de forts taux de radioactivité. Les industriels chinois ont, en conséquence, lancé des campagnes d'investissement à l'étranger et singulièrement en Afrique. Au Mozambique, Dingshen Minerals a pris le contrôle du gisement de Chibuto au sud-ouest du pays et y construit un port. Dans la province de Zambézie, le groupe Aiyu opère depuis 2013. C'est aussi le cas au Sénégal, où des entreprises chinoises participent au controversé projet de Niafrang en Casamance.

**Aux États-Unis**, en dépit d'une longue histoire d'exploitation du zircon dans l'Oregon ainsi qu'en Floride, les coûts ont mis à mal l'industrie. Seules deux entreprises continuaient de miner les gisements de Floride et de Géorgie en 2021.

## Les risques d'approvisionnement futurs en minerai de zirconium

**Sur le plan géologique, l'ouverture de nouvelles exploitations d'ici à la fin de la décennie apparaît nécessaire pour répondre à la croissance de la demande.** Mais seuls 16 nouveaux gisements ont été identifiés depuis 1989. La course aux gisements de terres rares pourrait également mener à la découverte de nouvelles ressources en zircon. Mais les nouveaux projets envisagés ne sont pas sans rencontrer des oppositions locales qui pourraient freiner, voir empêcher durablement, leur développement.

**Sur le plan géopolitique, la répartition des projets en cours de développement devrait renforcer la domination de l'Australie.** Le gisement de Dubbo, en Nouvelle-Galles-du-Sud, exploré par l'Australien ASM Metals est considéré comme le plus prometteur pour l'ouverture d'une future mine avec des réserves de minerais estimées à 18 Mt pour 1,85 % de zirconium (voir partie hafnium). Deux autres projets sont avancés, à Atlas-Campaspe (Nouvelle-Galles du Sud) par Tronox ainsi qu'à Balranald (Nouvelle-Galles du Sud) par Iluka. Une trentaine d'autres sites sont également à l'étude en Australie. Si ces projets sont principalement portés par les deux géants du zirconium, Tronox et Iluka, d'autres entreprises à capitaux australiens tentent de pénétrer le marché. Le gisement de Muray (Nouvelle-Galles du Sud) où se concentrent ces projets attire également des intérêts chinois, dont la Guangdong Orient Zirconic qui étudie la reprise de l'exploitation de la mine de Mindarie stoppée en 2015. Dans une moindre mesure, d'autres projets sont envisagés aux États-Unis (en Alaska ainsi qu'en Géorgie) en Casamance au Sénégal, à Madagascar et au Mozambique.

**Sur le plan géoéconomique, les 17 projets d'exploitation de zirconium listés ci-dessus sont portés par 15 entreprises différentes.** Cette multitude du nombre d'opérateurs limite l'accroissement le pouvoir de marché d'un acteur privé. Parmi les groupes actifs, plusieurs sont chinois, à l'instar de Guangdong Orient Zirconic, Haiyu, ou encore Astron Limited.

## LES RISQUES SUR LES APPROVISIONNEMENTS EN ÉPONGE DE ZIRCONIUM

Pour produire le gainage du combustible, le zirconium doit suivre un processus de raffinage particulier à la filière nucléaire. Le minerai de zirconium contient environ 2 à 3 % de hafnium. Or, ses propriétés sont inverses à celles nécessaires au gainage. Si le zirconium est choisi pour la transparence au neutron afin d'assurer la réaction, le hafnium les absorbe. Le hafnium doit être séparé du zirconium jusqu'à un maximum de 100 ppm. Le zirconium déhafnéisé trouve aujourd'hui des utilisations concurrentes à celle du nucléaire, principalement dans l'aéronautique.

### Criticité industrielle : faible tension sur les capacités de production

À l'échelle mondiale, les moyens de production d'éponge de zirconium (8 600 tonnes annuelles) dépassent très largement les besoins de la filière électronucléaire (5 000 tonnes par an).

### Criticité géopolitique : une production concentrée dans 5 pays

**Seuls cinq pays disposaient de capacité de production** de zirconium de qualité nucléaire en janvier 2022 : les États-Unis, la Chine, la France, la Russie et l'Inde. Mais **les États-Unis et la France disposaient à deux d'environ les deux tiers des capacités de production mondiale**. Jusqu'à 2021, l'industrie russe du zirconium n'était techniquement capable que de produire des matières compatibles avec ses seuls réacteurs. Afin d'assurer sa pénétration dans le marché international du nucléaire, Cheptsky Mechanical Plant, filiale de TVEL, elle-même filiale productrice de combustible de Rosatom, a inauguré en octobre 2021 une nouvelle usine à Glazov (Volga) capable de produire 1 000 tonnes d'éponge annuellement. **La Chine s'est progressivement dotée d'une production d'éponges de zirconium pour sa filière nucléaire**. En 2009, la State Nuclear Baoti, filiale de la State Nuclear Power Technology Corporation, fondée par le gouvernement chinois avec la participation des trois géants du secteur nucléaire (la CGN, la SPIC et la CNNC), forme une coentreprise avec Westinghouse afin de construire et opérer une usine de production d'éponge de zirconium dans la province du Jiangsu. L'usine est inaugurée en 2011 à Nantong et en 2018 l'entreprise est entièrement nationalisée. Symbole de cette réussite et de la capacité chinoise à pénétrer le marché mondial, CNNC a exporté en août 2020 sa première cargaison d'éponge de zirconium vers la Russie. Les capacités chinoises s'élèveraient aujourd'hui à plus de 2 500 tonnes annuelles.

### Criticité géoéconomique : des fabricants issus de la filière nucléaire

**Les fabricants d'éponges de zirconium déhafnéisé sont tous issus de la filière nucléaire**. Deux entreprises se partagent le marché aux États-Unis. D'un côté, Western Zirconium, une filiale de l'ingénieur nucléaire Westinghouse, producteur de combustible pour réacteur, dont l'usine d'Ogden dans l'Utah a une capacité de 1000 t par an. De l'autre, depuis son rachat de Wah Chang, initié par l'US Atomic Energy Commission, la filiale Specialty Alloys d'ATI Metals peut produire 3 600 tonnes par an à Albany dans l'Oregon. **En France, c'est Framatome qui contrôle entièrement les 2 200 t annuelles de capacité de production (35 % du marché mondial)**, dans son usine de Jarrie en Isère.

## LES RISQUES SUR LES APPROVISIONNEMENTS EN ALLIAGES DE ZIRCONIUM

Pour être en fine assemblage en combustible, les éponges de zirconium doivent être fondues pour préparer les alliages. Les alliages de zirconium peuvent être divisés en deux grands groupes : les « génériques » et les « propriétaires ». Les alliages « génériques » regroupent des matériaux dont la production peut être réalisée par l'ensemble des producteurs. Les alliages « propriétaires » sont des matériaux développés par les producteurs de combustible nucléaire, spécifiquement pour leurs assemblages. Il n'est pas possible pour un exploitant de centrale nucléaire de changer rapidement de type d'alliage de zirconium. En effet, un modèle de combustible doit recevoir une licence d'exploitation pour être utilisé dans un réacteur nucléaire. Cette licence d'exploitation est attachée à un type de combustible, et donc, à un type « d'architecture », mais aussi à un type d'alliage de zirconium. Utiliser un autre alliage nécessite donc de le faire valider par une licence d'exploitation.

### Criticité géopolitique : 75 % des capacités aux États-Unis, France et Suède

Au total, dix pays fabriquent des alliages de zirconium de qualité nucléaire, mais trois, les États-Unis, la France et la Russie, contrôlent 85 % des capacités de production mondiale. Les États-Unis arrivent en tête avec près de 40 % des capacités mondiales localisées sur leur territoire. La France arrive en deuxième position, avec plus d'un quart des capacités mondiales. Cette situation confère à l'industrie nucléaire française une relative autonomie face à d'éventuelles ruptures d'approvisionnements de fournisseurs étrangers.

### Criticité géoéconomique : un écosystème déconcentré

**L'écosystème d'acteurs est plus déconcentré** et il n'est pas uniquement lié à l'industrie nucléaire, ce qui limite les risques pouvant peser sur l'approvisionnement. Un grand nombre de métallurgistes, dont des acteurs n'appartenant pas à la filière nucléaire, sont en mesure de produire des alliages « génériques », à l'instar des acteurs suivants : le Suédois Sandvik, les Américains ATI Metals, SuperiorTube, Western Zirconium et Veridiam, les Canadiens BWXT et Cameco, CNNC en Chine, Rosatom en Russie, Nuclear Fuel Complex en Inde, Fabricacion de Aleaciones Especiales en Argentine.

**En revanche, le nombre d'acteurs en mesure de proposer sur le marché des alliages « propriétaires » est concentré autour de quelques fournisseurs clés.** Le français **Framatome** a développé le **M5**, un alliage de zirconium et de niobium à 1 % en 1997, sur la base des alliages russes E110, spécialement pour les réacteurs PWR. Le M5 a été utilisé dans 80 réacteurs et 13 pays différents. En 2011, Framatome a installé, avec CNNC, une unité de production de M5 en Chine. **Westinghouse** a introduit dès la fin des années 1980 le **Zirlo**, sur la base du E635, avec 1 % de niobium. Plus de 4 900 assemblages utilisant le Zirlo ont été livrés, dans 36 réacteurs PWR et BWR. **Rosatom** a développé ses alliages E110 et E635, par adjonction de niobium, utilisable pour tout type de réacteurs PWR.

## NIOBIUM : DES BESOINS CROISSANTS À ANTICIPER

### 5 ÉLÉMENTS À RETENIR SUR LES DYNAMIQUES DU NIOBIUM NUCLÉAIRE

Les réserves de niobium sont concentrées au Brésil et plus marginalement au Canada et en Chine

Trois mines au Brésil extraient 90 % du niobium dans le monde. Une de ces mines en produit 80 %.

Des possibilités de diversification existent au Canada, ainsi qu'en Afrique subsaharienne où des groupes chinois investissent.

La fin des exportations de minerai brut au profit par des produits semi-finis, et principalement du ferroniobium, constitue un risque pour l'industrie nucléaire qui a des besoins spécifiques.

Le secteur de la transformation du niobium en matériel de qualité nucléaire est beaucoup moins concentré.



## L'IMPORTANCE ÉCONOMIQUE DU NIOBIUM POUR LA FILIÈRE NUCLÉAIRE

### L'usage stratégique du niobium pour les combustibles nucléaires

**La détérioration des gaines de combustible pose des problèmes économiques et sécuritaires.** D'une part, l'oxydation des alliages de zirconium limite leur durée d'utilisation en réacteur, et donc la quantité d'uranium pouvant être utilisé dans chaque combustible. D'autre part, la constitution d'hydrogène par réaction entre le zirconium des gaines et l'eau forme de l'hydrogène en quantités dangereusement importantes en situation accidentelle, comme ce fut le cas à Fukushima. Les recherches de nouvelles solutions de gainage sont en conséquence accélérées aujourd'hui. **L'addition de niobium a été rapidement repérée comme une solution pour freiner la corrosion des alliages.** Le niobium renforce la résistance mécanique du zirconium en allégeant le poids de l'alliage, dispose d'une très faible absorption de neutron, limite l'absorption d'hydrogène par le zirconium et tempère l'influence des impuretés sur la résistance à la corrosion. **Le rôle de niobium dans l'industrie nucléaire devrait croître**, en raison de la place centrale des réacteurs à eau pressurisée dans les scénarios de développement de la filière nucléaire et des besoins croissants d'assurer la rentabilité des combustibles en économisant l'uranium. Toutefois, les quantités utilisées dans les alliages, de 1 % à 2,5 %, restent faibles.

### Le nucléaire, un consommateur marginal de niobium au niveau mondial

Le nucléaire n'est qu'un consommateur ultra-minoritaire des minerais de niobium, alors même que ses propriétés en font une ressource stratégique pour la filière et de nombreux autres secteurs. La production d'acier microallié à haute résistance (HSLA) utilisait 90 % du niobium extrait dans le monde en 2020. Deux autres catégories d'applications utilisent du niobium, de manière plus marginale. Il s'agit des alliages d'acier à haute teneur en niobium, utilisés pour leur résistance à la chaleur dans la production d'acier pour turbines de réacteurs d'avion ou de centrales à gaz. Les secteurs de l'optique, de l'électronique, des batteries et des catalyseurs chimiques utilisent des oxydes et poudres de niobium. Enfin, seuls 3 % des ressources sont transformés en niobium métal pur, utilisé dans l'industrie nucléaire, mais pas seulement. La production de superconducteurs utilise également cette ressource. Par ailleurs, la Chine, l'Inde et le Brésil représentaient plus de 80 % de la consommation mondiale de niobium.

**L'introduction de nouveaux usages pourrait renforcer la concurrence pour l'usage de cette matière à moyen et long terme.** En effet, l'évolution de la recherche scientifique consacrée au niobium témoigne de **l'intérêt croissant pour ses applications en dehors de l'acier microallié à haute résistance.** De 2013 à 2019, 30 % des articles scientifiques publiés sur cette matière traitaient des alliages et 20 % des catalyseurs, contre seulement 23 % pour l'acier. Sur la même période, 43 % des nouveaux brevets déposés autour du niobium concernaient les alliages, contre 29 % pour les aciers. La Chine est en pointe sur le sujet. Le pays, qui est déjà le principal consommateur de niobium, est également le principal producteur d'innovation sur ce marché : **de 2013 à 2018, 55 % des brevets concernant le niobium venaient de Chine.**

## LES RISQUES SUR L'APPROVISIONNEMENT EN RESSOURCES DE NIOBIUM

### Criticité géologique : le niobium, un élément relativement rare

**Le niobium est un élément relativement rare dans la croûte terrestre et se trouve toujours sous une forme oxydée et souvent associée avec du tantale ou**, plus rarement comme dans le gisement chinois de Bayan, **avec des terres rares**. Si une dizaine de minéraux renferment du niobium, seuls deux sont économiquement valorisables : le pyrochlore et, plus marginalement, le colombo-tantalite ou coltan. En 2015, 58 gisements de pyrochlore étaient identifiés dans la littérature scientifique. Si les réserves globales sont difficiles à évaluer (les chiffres variant en fonction du mode de calcul), plusieurs études considèrent qu'elles représenteraient l'équivalent d'un siècle de consommation actuelle.

### Criticité géopolitique : une dépendance extrême au Brésil pour la production


**Le Brésil concentre une part écrasante des ressources en niobium**. En plus de leur taille, c'est leur contenance en niobium qui constitue l'importance des gisements brésiliens. Le Canada et la Chine disposaient, respectivement, des deuxièmes et troisièmes plus importantes ressources mondiales de niobium. Mais les volumes sont nettement moins importants que ceux du Brésil. **Pour les pays européens, les ressources sont très maigres**. Du coltan a été répertorié en Guyane dès 1971, mais dans des volumes très limités. En France métropolitaine, des potentiels pourraient exister dans le Finistère et en Alsace. **Fort du volume et de la qualité de ses ressources, le Brésil domine très largement la production mondiale de niobium**, avec 88 900 tonnes, soit **91 % du total en 2019**. **L'extraction brésilienne de niobium se concentre sur deux mines, ce qui fait peser un risque géopolitique sur l'approvisionnement**. La mine à ciel ouvert d'Araxa, dans l'État du Minas Gerais au sud-est du Brésil, est la plus importante du pays. Elle représentait près de 85 % de la production de niobium du Brésil et 80 % de la production mondiale. Bien plus petite, la mine de Boa Vista, sur le gisement de Catalao dans l'État du Goiás, produisait environ 10 % du niobium mondial.

### Criticité géoéconomique : CBMM, seul fournisseur pour la filière nucléaire

**La criticité géoéconomique du niobium est exacerbée par les choix industriels des groupes miniers**. Le Brésil n'exporte plus de niobium en tant que minerai brut, sous sa forme de pyrochlore non transformé, mais uniquement des produits semi-finis, comme le ferroniobium, depuis 1981. Mais le ferroniobium n'est pas exploitable par l'industrie nucléaire, en raison de sa teneur en fer. C'est le niobium métal qui intéresse fortement la filière nucléaire. **Seule CBMM et la mine d'Araxa peuvent répondre aux besoins de la filière nucléaire**, à travers l'exportation de niobium métal. En effet, la CMOC cible principalement le marché de l'acier et n'exporte que du ferroniobium. **L'importance de CBMM est d'autant plus grande que des acteurs chinois détiennent une partie de la propriété de ses actifs stratégiques**. L'entreprise appartient au groupe de la famille Moreira Salles, grande société brésilienne également propriétaire d'Unibanco, troisième banque du pays. En 2011, un consortium de quatre sociétés japonaises et deux coréennes a racheté 15 % des parts de la société. On y retrouve quatre producteurs d'aciers (POSCO, JFE, Nippon Steel et Sojitz) ainsi qu'un groupe, la Japan Oil, Gas & Metals National Corp gestionnaire des stocks stratégiques de métaux pour le Japon. La même année, un consortium chinois, constitué de cinq entreprises d'État de la filière métallurgique, acquiert également 15 % du capital du groupe.

## FOCUS : LES PISTES POUR RÉDUIRE LA DÉPENDANCE À LA FILIÈRE BRÉSILIENNE

### L'impasse du Canada pour déconcentrer le marché

 **La principale mine de niobium en exploitation en dehors du Brésil se trouve au Canada.** Le site de Saint-Honoré, à Saguenay-Lac-Saint-Jean, à environ 200 kilomètres au nord de la ville de Québec, extrait 7 % du niobium mondial. À l'inverse du Brésil, où l'exploitation est à ciel ouvert, il s'agit ici d'une mine souterraine. La qualité du minerai est bien plus faible qu'à Araxa ou Boa Vista, avec seulement 3,4 kg d'oxyde de niobium pour 1 000kg de roche. La mine pourrait être exploitée pendant 25 ans, mais pas au-delà. Les projets d'extension envisagés en 2015, devant permettre d'étendre sa durée de vie, ont été abandonnés pour raisons économiques.

La mine de Saint-Honoré est exploitée par Niobec, filiale de Magris Performance Materials depuis 2015. Actif sur le marché du talc, Magris est basé à Toronto et appartient à trois fonds d'investissements canadiens, hongkongais et singapouriens. À l'échelle régionale comme locale, Niobec n'est qu'un acteur mineur. L'entreprise n'emploie que 450 salariés alors que l'industrie de l'aluminium représente 30 000 emplois à Saguenay, avec la présence de Rio Tinto.

**Mais le Canada n'était pas en mesure de fournir la filière nucléaire en niobium, en 2022.** En effet, comme les compagnies minières brésiliennes, Niobec ne vend plus de concentré de niobium non transformé, et ce depuis 1994. Les installations sur site ne permettent que de produire du ferroniobium à 60 % de niobium, qui n'est pas exploitable par l'industrie de l'atome.

**De nouvelles exploitations ne devraient pas démarrer dans le pays à l'horizon 2030.** À l'échelle nationale, il n'y a pas de stratégie coordonnée de développement des ressources en niobium. Les pistes de projets de développement à 2050 sont également très incertaines. NioBay Metals, dont la Province du Québec et le groupe minier canadien Osisko sont les principaux actionnaires, explore les gisements de Crevier (Québec) et James Bay (Ontario). Ces projets ne sont qu'à l'étape des essais géologiques. En Colombie-Britannique, Taseko Mines, spécialiste du cuivre, envisage de développer le gisement d'Aley, sans calendrier fixé pour le moment. Ces projets, au stade de l'étude, se heurtent à des mobilisations locales qui pourraient empêcher leur développement. Cela a déjà été le cas à Oka (Québec) où les projets de relance d'une exploitation de niobium arrêtée en 1975 ont été stoppés par les habitants en 2019. Sur les autres sites envisagés, des tensions grandissantes naissent avec les instances représentatives des Nations Premières.

## L'Afrique, de nouvelles perspectives convoitées par la Chine

**Dans trois pays, le Malawi, le Gabon et l'Angola, l'exploitation du niobium, développée grâce à des investissements chinois, pourrait potentiellement approvisionner la filière nucléaire, si les minerais extraits sont exportés sans être transformés en produits semi-finis.**



Le **Malawi** pourrait être le premier pays depuis 50 ans à mettre industriellement en exploitation ses gisements de niobium. Le ministère des Mines a octroyé en août 2021 à Globe Metals la licence d'exploitation du projet de Kanyika dans le district de Mzimba. Globe Metals est une entreprise australienne qui, en 2022, n'avait pas d'autres projets que celui du Malawi et qui est détenue presque entièrement par le fonds d'investissement Apollo Metals Investment (54 %) et l'entreprise d'État chinoise East China Mineral Exploration & Development Bureau (25 %). La durée d'exploitation de la mine est évaluée à 23 ans au minimum pour une production de 3 250 tonnes de niobium par an.



Au **Gabon**, le projet de mines polymétalliques de Mabounié (province du Moyen-Ogooué), initialement lancé par le français Eramet, a été repris en main à l'été 2018 par le chinois **CMOC**, qui exploite déjà le niobium au Brésil. Estimées à 2,3 Mt pour une teneur de 1,2 %, les réserves de Mabounié pourraient permettre une exploitation sur une trentaine d'années. Pour le moment, il n'y a pas de calendrier de mise en exploitation.



En **Angola**, ce sont aussi des **investissements chinois** qui s'intéressent aux potentiels en niobium. Après deux années d'exploration, Niobonga, un consortium de plusieurs entreprises chinoises, en partenariat avec le groupe minier public angolais Ferrangol, a reçu en 2021 un permis d'exploitation pour la mine de Bonga, à Quilengues dans le sud-ouest du pays.




Au **Kenya**, le projet de Mrima Hill, dans le comté de Kwale, est à l'arrêt depuis 2013 suite à la révocation du permis d'exploitation de l'entreprise britannique Cortec. Après plusieurs demandes d'arbitrage devant le CIRDI de la Banque Mondiale, le gouvernement kenyan a eu gain de cause en mars 2021 et recherche actuellement d'autres entreprises pour reprendre l'exploration du gisement.




**La situation est plus complexe en République démocratique du Congo (RDC).** L'exploitation du gisement de pyrochlore de Lueshe, dans le Kivu, est à l'arrêt depuis 2004. Le gouvernement congolais refuse pour le moment de renouveler l'autorisation d'exploitation à l'entreprise gérante, Somikivu, détenue à 70 % par l'allemand GfE, 20 % par l'État congolais et 10 % par une filiale du métallurgiste russe Midural. Ce refus serait d'abord motivé par des incertitudes sur la faisabilité économique de l'extraction. Dans le reste du pays, et particulièrement au Kivu, les exploitations artisanales de coltan produisent de faibles volumes de niobium. La médiatisation du rôle du coltan dans le financement de la guerre civile dans le pays à la fin des années 2000, ainsi que l'importance du travail des enfants dans son extraction, ont entraîné des restrictions internationales sur son commerce. Si des actions ont été entreprises pour assurer une traçabilité du minerai et créer une filière légale en RDC, elles restent aujourd'hui mineures. Les récentes attaques sur les mines de coltan de Bisinzu en 2020, faisant trois morts parmi les salariés, témoignent de l'instabilité du secteur.


La création de filières de valorisation du coltan est planifiée en **Tanzanie** et au **Rwanda** par le groupe états-unien AB Minerals. L'entreprise envisage la construction d'une première raffinerie dans le port de Dar es-Salaam afin de séparer le niobium et le tantale. En 2017, Power Resources Group, une entreprise macédonienne exploitant une fonderie de tantale dans son pays d'origine, a signé un accord avec le gouvernement rwandais pour la construction d'une raffinerie de coltan à Bugesera, sans concrétisation pour le moment.


## La Russie, des projets clés en développement


 En dehors d'Afrique, c'est en **Russie** que les efforts de construction d'une filière niobium sont les plus avancés. Pour le moment, des quantités faibles de niobium sont déjà extraites du gisement de Lovozero près de Mourmansk, ne répondant qu'à 20 % de la demande du pays. Le plus grand projet est situé à **Tomtor** dans l'extrême orient russe en Yakutie. Le gisement contenant également des terres rares est estimé à 700 000 tonnes de niobium pour une durée d'exploitation de 40 ans. Il appartient au fonds d'investissement ICT group de l'oligarque russe Alexander Nesis via sa filiale Three Arc Mining. Il est envisagé de transporter les minerais jusqu'à Krasnokamensk (Transbaïkalie) à la frontière sino-russe. L'objectif affiché d'ICT Group est d'abord de répondre aux besoins de l'industrie russe de la **construction d'alliage de niobium pour l'extension du réseau de gazoduc du pays**. Pour le moment, ce projet n'est qu'à l'étape d'obtention des permis d'exploitation. Le spécialiste de la construction d'oléoduc ChelPipe PJSC envisage également de mettre en exploitation le gisement de Zashikhinskoye dans la région d'Irkoutsk.


## Des perspectives limitées dans le reste du monde

 En **Inde**, le Nuclear Fuel Complex a développé de petites capacités de production de niobium à Mumbai. Dans le reste du monde, les perspectives d'ouverture de mine de niobium sont encore plus minces. Aux **États-Unis**, le groupe NioCorp envisage d'exploiter le gisement d'Elk Creek dans le sud-est du Nebraska dont les réserves sont estimées à 168 000t de niobium. L'entreprise aurait déjà sécurisé un accord d'achat de ferroniobium avec le sidérurgiste allemand ThyssenKrupp. NioCorp n'a toutefois pas encore sécurisé assez de financements pour continuer le projet.

 En **Australie**, le projet de Dubbo, évoqué pour ses ressources en zirconium, pourrait également produire du niobium, pour lequel le métallurgiste autrichien Treibacher Industrie a déjà indiqué son intérêt.

 Au sud-ouest du **Groenland**, des explorations sont menées sur les gisements de Nukitooq par l'américain Hudson ainsi qu'à Motzfeldt par l'Australien Ram Resources, contenant du niobium et des terres rares.

 Enfin, les projets d'exploitation des gisements de Ghurayyah en **Arabie-Saoudite**, initiés en 2003, ont été entièrement arrêtés en 2020.

 **Mais à moyen terme, tous ces projets présentent une limite majeure. Aucun ne devrait pouvoir alimenter la filière niobium nucléaire. Les projets les plus avancés envisagent clairement de se diriger en priorité vers la production de ferroniobium pour les aciers microalliés.**

## FOCUS : LE TANTALE EN CHIFFRES CLÉS

### L'USAGE DU TANTALE

**Le tantale est déjà utilisé en alliage dans certaines structures des centrales nucléaires.** De plus, son utilisation dans des réacteurs nucléaires spatiaux est éprouvée. Par ailleurs, **le tantale pourrait devenir nécessaire à la production des gaines du combustible pour les prochaines générations de réacteurs.** C'est le cas par exemple de certains réacteurs à neutrons rapides où le tantale correspond au besoin des gaines en carbure de silicium (SiC). Cette application pourrait également être nécessaire pour les réacteurs actuels, si le zirconium devait venir à être remplacé par le carbure de silicium. La consommation en 2021 était évaluée à 2 200 tonnes, une demande qui pourrait croître de 6 % par an jusqu'à la fin de la décennie. La part du nucléaire était presque nulle. Dans les condensateurs, le tantale peut être remplacé par du niobium, dont la criticité est tout aussi importante. Sa substitution par des céramiques ou de l'aluminium est beaucoup moins efficace. Pour les superalliages, il est tout aussi difficile de le remplacer.

### LES RISQUES SUR LES RESSOURCES DE TANTALE

**Une vingtaine de minéraux contenant du tantale ont été identifiés,** mais seuls le coltan, le microlite, la wodginite et la strüverite sont économiquement exploitables. **Les ressources sont relativement peu concentrées à travers le monde.** Le Brésil, le Canada et le Groenland représentaient environ un tiers du total mondial. En revanche, il n'existe pas d'évaluation réellement précise de la répartition des réserves mondiales. **La production mondiale est estimée à un peu moins de 1,85 million de tonnes de minerai en 2019 et elle était géographiquement très concentrée.** L'Afrique centrale représentait près de la moitié de la production mondiale de tantale en 2019 et la République démocratique du Congo en représentait à elle seule près du tiers. Toutefois, la part de l'Afrique centrale a diminué au profit du Brésil, dont la production est montée en puissance depuis 2017. **Au Congo et au Rwanda, en dehors des exploitations artisanales, le secteur est dominé par des groupes verticalement intégrés,** respectivement Kemet, filiale du Yageo et AVX Corporation, tous deux fabricants de composants électroniques. Au Brésil, la production vient des mines de Volta Grande, exploitée par le groupe néerlandais AMG, et de Pitinga qui appartient au groupe péruvien Minsur.

## PARTIE 3 : LES MÉTAUX DES BARRES DE CONTRÔLE

### MISE AU POINT TECHNIQUE : LES BARRES DE CONTRÔLES

L'énergie produite dans un réacteur nucléaire résulte de la fission d'atomes, qui, en se cassant, libèrent des neutrons qui viennent à leur tour fissionner d'autres atomes. Afin que cette réaction en chaîne ne s'emballe pas de manière incontrôlée, le réacteur doit être piloté grâce à des matériaux absorbant les neutrons dont la quantité va varier. Ce système permet autant d'éviter l'emballement et l'accident, que de commander la puissance fournie par le réacteur en fonction des besoins du réseau électrique. Pour ce faire, deux moyens sont disponibles : l'introduction d'un absorbant de neutron soluble dans l'eau du réacteur et l'utilisation de barres de contrôle, aussi appelées barres de commande. **Ces dernières sont donc fondamentales pour l'opération quotidienne de la filière nucléaire.**

**Les barres de contrôle peuvent être distinguées en deux groupes :**

- d'une part, des barres d'arrêt, entièrement sorties du cœur du réacteur, qui peuvent être insérées en urgence dans le cœur en cas d'incident ;
- d'autre part, des barres de régulation, plus ou moins insérées dans le cœur en fonction du besoin des opérations. Les modes d'insertions changent d'un type de réacteurs à l'autre : par le haut pour les réacteurs PWR, les AGR et les IPWR, par le bas pour les BWR. Leur architecture change également d'un type de réacteur à l'autre. Dans les réacteurs BWR, les barres sont assemblées dans une lame formant une croix d'un seul tenant qui est insérée au milieu de quatre assemblages de combustible. Les barres de contrôle des réacteurs PWR sont attachées par grappe de 24 à un même « grappin » (une araignée) qui les font entrer et sortir par le haut de tubes placés entre les combustibles.

**La transition énergétique va augmenter les enjeux liés aux barres de contrôle des réacteurs.**

L'injection d'énergies renouvelables intermittentes dans le réseau électrique pourrait augmenter les besoins en flexibilité du parc nucléaire, particulièrement en France. La modulation de la puissance, appelée le suivi de charge, permet d'adapter la production d'énergie du réacteur à la demande du réseau. En conséquence, une adaptation croissante des réacteurs à la demande pourrait augmenter le vieillissement de leurs matériaux et nécessiter des changements plus fréquents. Actuellement, la durée de vie moyenne oscille entre 6 et 12 ans.

Les besoins techniques des barres de contrôles – bonne absorption de neutrons, résistance à la corrosion et aux déformations mécaniques – ont guidé les constructeurs vers trois matières principales : **le carbure de bore, le hafnium et l'alliage argent-indium-cadmium**. Le titanate de dysprosium est utilisé, à la marge, dans les réacteurs VVER.

## INDIUM : UNE MATIÈRE CRUCIALE POUR LE CONTRÔLE DES RÉACTEURS PWR

### 5 ÉLÉMENTS À RETENIR SUR LES DYNAMIQUES DE L'INDIUM NUCLÉAIRE

L'indium n'est jamais extrait pour lui-même, mais d'abord comme coproduit du minerai de zinc

Les minerais de zinc contenant de l'indium se concentrent en Bolivie, en Chine, en Russie et au Canada.

Pour produire de l'indium, le minerai de zinc doit aller dans une raffinerie spécifiquement équipée, ce qui n'est le cas que de 35 % des sites en activité dans le monde.

Il y a 35 fonderies de zinc équipées pour l'indium, dont 20 en Chine. La hausse des prix de l'électricité pourrait faire fermer l'unique site français. Ce secteur se concentre fortement aujourd'hui.

La transformation de l'indium en matière de qualité nucléaire est peu concentrée et des capacités de production existent en Europe.



## L'IMPORTANCE ÉCONOMIQUE DE L'INDIUM POUR LA FILIÈRE NUCLÉAIRE

### Les usages stratégiques de l'indium

Les alliages d'argent, d'indium et de cadmium (Ag 80 %, In 15 %, Cd 5 %) (AIC) sont destinés prioritairement aux réacteurs PWR et sont utilisés dans les barres de contrôle commercialisées par Framatome et Westinghouse. Ce mélange (AIC) a été élaboré dans les années 1970 afin de simuler les propriétés du hafnium, dont les coûts de production étaient alors trop élevés. Ces alliages profitent d'une longue expérience d'utilisation, présentent des durées de vie pouvant aller jusqu'à 12 ans, interagissent moins avec les grains de combustible et s'oxydent moins rapidement que le carbure de bore.

### Les besoins en indium de la filière nucléaire

**La dynamique actuelle des réacteurs PWR devrait continuer à soutenir la demande pour le mélange argent-indium-cadmium. Mais plusieurs caractéristiques pourraient pénaliser ce mélange à l'avenir.** Premièrement, sa rentabilité vis-à-vis du hafnium pourrait être reconsidérée en raison de l'augmentation du cours de l'argent. Deuxièmement, le mélange argent-indium-cadmium a une température de fusion (800°C) plus faible que le carbure de bore, ce qui pourrait être préjudiciable dans certains futurs modèles de réacteurs. Troisièmement, le stockage des barres de contrôle comme déchets radioactifs est plus difficile que le carbure de bore.

Il est difficile de comptabiliser l'évolution de la demande en indium qu'impliquerait les différents scénarii de recours au nucléaire. Nos calculs, conservateurs, produits en chapitre 1, envisagent qu'une multiplication par 3 de la puissance installée consommerait environ 3,5 % de l'ensemble de l'indium produit dans le monde. Les calculs réalisés par l'AIEA en 2011 étaient beaucoup plus alarmants<sup>4</sup>. **Pour l'Agence, une multiplication par 10 de la puissance installée pourrait consommer jusqu'à un quart de la production mondiale d'indium, constituant un risque d'approvisionnement pour la filière.**

### Les concurrences d'usages : le nucléaire marginalisé par les besoins de la production de conducteurs transparents

**La filière nucléaire n'était qu'un consommateur ultra minoritaire d'indium à l'échelle mondiale en 2020.** La majorité (56 %) de l'indium est consommée pour la production de conducteurs transparents pour les écrans plats, sous forme d'oxyde d'indium-étain (ITO), à 90 % d'indium. Une part bien plus faible (10 %) sert dans l'industrie pour les travaux de soudure à basse température. L'indium est également mobilisé dans la filière énergétique, d'abord comme matériau de certains panneaux solaires (8 %), puis comme substitut au mercure dans les batteries (5 %). Environ 7 % sont utilisés dans l'électronique, comme semi-conducteur ou interface thermique. **Seuls 4 % de l'indium est transformé en alliage et métaux, dont une partie, inférieure à 2 %, en mélange argent-indium-cadmium nucléaire.**

<sup>4</sup> <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2011/ndc-2011-15.pdf>

## LES RISQUES SUR L'APPROVISIONNEMENT EN INDIUM

### Criticité géologique : l'indium, un sous-produit théoriquement abondant

**Il n'y a pas d'évaluation complète et normalisée des réserves disponibles d'indium.** L'indium est un sous-produit du raffinage du zinc et plus marginalement du cuivre et de l'étain. Il n'existe pas de gisement propre d'indium et il n'y a donc pas de mine d'indium en exploitation dans le monde. Évaluer la criticité géologique de l'indium oblige donc à analyser les ressources disponibles en zinc, en cuivre et en plomb qui contiennent de l'indium. Additionnées, ces trois sources pourraient représenter jusqu'à 356 000 t d'indium, soit presque 200 ans de consommation. **Mais ces ressources naturelles ne présument absolument pas de la production réelle d'indium. En effet, la présence d'indium dans un gisement de zinc ou de cuivre ne signifie pas qu'il puisse être valorisé.** Il faut que la raffinerie de zinc qui réceptionne le minéral dispose d'une unité capable d'en extraire l'indium ce qui n'est le cas que d'une minorité de sites (voir partie suivante).

### Criticité géopolitique : 60 % des gisements gérés par la Chine et Russie

**La consommation d'indium provenait à 95 % du raffinage du zinc et à 5 % du cuivre et de l'étain. Quatre pays concentrent les deux tiers des réserves de gisements de zinc avec une estimation fiable de leurs réserves d'indium.** : la Bolivie (20 %), la Chine (18 %), la Russie (14 %) et le Canada (12 %). Ces quatre pays disposent sur leur sol des plus importants gisements au monde, à l'instar des Gaiskoye/Gaiskoe/Gai/Gay (Russie), Dachang (Chine), Huari Huari (Bolivie) et Geco/Manitouwadge (Canada). **Mais ces gisements de zinc contenant de l'indium ne sont pas tous en exploitation. Deux pays, la Chine (33 %) et la Russie (25 %), concentrent plus de la moitié des mines de zinc en activité disposant de réserves d'indium,** devant l'Australie (11 %), le Canada (11 %), le Portugal (9,5 %) et la Bolivie (8 %). L'Europe dispose de capacités non négligeables grâce à la filière portugaise, augmentée à la marge par les mines de zinc en Irlande (mine de Tara dans le comté de Meath, exploitée par le suédois Boliden) et de Suède.

### Criticité géoéconomique : le Russe UGMK en position de force

**La propriété des gisements de zinc avec des ressources d'indium est éclatée entre de nombreuses entreprises.** Près de la moitié des gisements dans le monde ne sont pas encore soumis à un permis d'exploration ou d'exploitation, notamment en Bolivie. **Mais un acteur se démarque.** C'est le géant russe de la métallurgie Ural Mining and Metallurgical Company (UGMK), détenu par l'oligarque russe Iskander Makhudov, contrôle le gisement de Gaiskoye, situé en Russie. Avec plus de 9000 tonnes d'indium, c'est le plus grand gisement identifié au monde. **En Chine, le principal groupe extrayant du minerai de zinc à teneur en indium est le Zijin Mining Group** dont un quart du capital est détenu par le gouvernement chinois. Mais le manque de transparence de l'écosystème chinois limite l'identification des acteurs, d'autant plus que de nombreux très petits producteurs sont actifs. Hors de Chine, **deux entreprises publiques chinoises contrôlent les principales mines de zinc à teneur en indium en Australie.** La mine de Broken Hill (1 675 tonnes d'indium) appartient au China Nonferrous Metal Mining, et celle de Rosebery est exploitée par une filiale de China Minmetals, tous deux gérés par la Commission chinoise d'administration et de supervision des actifs publics.

## LES RISQUES SUR LA PRODUCTION D'INDIUM

### Criticité industrielle : des surcapacités importantes

**La production d'indium se heurte à un premier obstacle : le taux de perte de minerai à chaque étape de sa transformation.** Au total, moins de 20 % des volumes extraits de minerai de zinc contenant de l'indium sont transformés en indium. **De plus, de nombreuses fonderies de zinc ne disposent pas d'unité de traitement de l'indium.** Cette absence s'explique d'abord par un raisonnement économique. L'extraction hydrométallurgique de l'indium est complexe et ne peut être rentable que pour des sites assez grands. À l'échelle mondiale, moins de 35 % des raffineries de zinc disposent d'unité d'indium. Dans les autres usines, l'indium non extrait est perdu dans le laitier. **Mais le secteur offre d'importantes surcapacités.** Les besoins annuels mondiaux d'indium sont évalués à 1 400 tonnes par an au maximum et la production d'indium s'est élevée à 968 tonnes (en hausse de 50 % par rapport à 2006) et le recyclage de l'indium lors de la production d'oxyde d'indium-étain (ITO) permet de combler la différence. Toutefois, la production secondaire issue de ce recyclage est destinée à rester dans la filière ITO et ne peut répondre aux besoins de l'industrie nucléaire.

### Criticité géopolitique : 55 % de la production mondiale assurée par la Chine

**Au total, seuls huit pays dans le monde disposaient des fonderies de zinc avec une unité d'extraction d'indium en 2019.** La Chine comptait à elle seule vingt fonderies et leurs capacités de production s'élevaient à près de 900 tonnes par an. La Corée du Sud, deuxième producteur mondial, ne disposait que deux fonderies d'une capacité de 260 tonnes. La capacité de production de la seule fonderie présente en France ne s'élevait à 48 tonnes par an. **La Chine représentait à elle seule 55 % de la production mondiale d'indium raffiné en 2019** et la Corée du Sud 23 %. Suivent le Japon (7 % du total), le Canada (6 %), la France (4 %), la Belgique (2 %), la Russie (1 %) et le Brésil (0,5 %). Depuis 2010, la hiérarchie des pays fabricants n'a que très peu changé. Mais tous, à l'exception de la France, ont vu leur part relative baisser depuis 2010. **Mais depuis 2012, les besoins en indium de la Chine dépassent sa propre production et le pays est depuis un importateur net de matière.** Considérant que la Chine a concentré son effort sur la production d'oxyde d'indium-étain (ITO), il est possible que les fonderies chinoises n'approvisionnent pas le marché de l'indium nucléaire. De plus, pour faire face, le gouvernement chinois a, à plusieurs reprises, introduit des restrictions à l'exportation en imposant des taxes et des quotas ciblés particulièrement sur l'indium fortement raffiné, nécessaire à la filière électronucléaire.

### Criticité géoéconomique : un tissu d'acteurs très peu concentré

**Le tissu d'acteurs en Chine est très éclaté.** Chaque fonderie appartient à une entreprise, dont les actionnariats diffèrent. Si certaines, comme Hsikwangshan Twinkling Star (Hunan) ou Laibin Smelter (Guangxi) appartiennent à des filiales de grands groupes publics, la plupart sont indépendantes et mixent des capitaux publics locaux et privés. La production se concentre au sud-ouest du pays dans les provinces du Guangxi, du Yunnan, du Guangdong et du Hunan, à proximité de mines, ainsi que dans le Jiangsu et le Liaoning, près des ports. Cette dispersion du secteur indium est fréquemment déplorée par les industriels chinois eux-mêmes. La mise en place d'une réglementation environnementale plus stricte à partir de 2010 a pourtant déjà réorganisé la filière, en mettant à l'arrêt la majorité des plus petits producteurs.

À l'échelle mondiale, la répartition par entreprise est tout aussi dispersée. En Corée du Sud, l'ensemble de la production est contrôlé Young Poong, chaebol actif principalement dans la mine et l'électronique. Au Japon, les raffineries appartiennent aux trois grands conglomérats (keiretsu) Mitsui, Sumimoto et Asahi. La production canadienne dépend entièrement du groupe Teck basé à Vancouver, dont le principal actionnaire, avec 11 % des parts, est le fonds souverain chinois China Investment Corporation. Au Pérou, la petite raffinerie de La Oroya (5 t/an) est exploitée depuis 2021 par une coopérative rassemblant les travailleurs, tandis que celle de Cajamarquilla (50t/an) est aux mains du fonds d'investissement brésilien Votorantim. En Belgique, la totalité de l'indium provient de l'usine d'Hoboken appartenant au groupe belge Umicore qui y recycle les restes de ses propres fonderies de plomb et de cuivre. En Russie, le métal est produit par la Chelyabinsk Zinc Plant, filiale de l'UGMK qui exploite la mine de Gaiskoye. La situation française est préoccupante et reflète les risques que posent les prix de l'énergie sur la production d'indium en Europe. L'unique fonderie de zinc du pays, situé à Aubry (59) est exploité par Nyrstar, filiale du groupe de négoce singapourien Trafigura. Mais la hausse des prix de l'électricité en France durant l'hiver 2021-2022 a mené Nyrstar à mettre à l'arrêt son usine pour trois semaines à partir de fin janvier 2022. Au moment de la rédaction de ce rapport (début mars 2022), l'activité n'avait pas encore repris.

#### Focus sur les industriels capables de produire de l'indium de qualité nucléaire

Il est de coutume de classer l'indium en fonction de sa pureté entre le 4N (99,99 % de pureté), le 5N (99,999%) ainsi que les 6N et plus. La filière nucléaire nécessite de l'indium 4 ou 5N. La pureté de l'indium en sortie des fonderies de zinc oscille, en fonction de la qualité du minerai et du procédé technique, entre 97 % et 99,99 %. Pour plus de concentration, la matière doit subir un raffinage supplémentaire. Deux possibilités se présentent<sup>5</sup>.

**Première option**, le minerai est capté par une entreprise verticalement intégrée qui opère en interne la totalité du processus. Cette éventualité est la plus rare et seuls quatre groupes sont capables aujourd'hui de le faire : le japonais JX Holdings, le Canadien Teck Resources, qui opère le site de Trail en Colombie-Britannique, le groupe public chinois Hunan Nonferrous Metals, le Belge Umicore, actif à Hoboken en Belgique. Umicore opère sur la totalité de la chaîne de l'indium nucléaire et propose même à la vente des alliages argent-indium-cadmium (AIC) pour barres de contrôle.

**Deuxième option**, l'indium préraffiné est vendu à un tiers producteur qui se charge de la purification. Le passage de l'un à l'autre peut être direct ou, plus fréquemment, s'opérer au travers de négociants qui se charge en suite de la commercialisation finale, tel que les États-Uniens Ocean Partners et Marco International, le Belge Traxys, le Turc ANI, les Suisses Glencore et Euromin. Les raffineries capables de purifier fortement l'indium ne sont pas nombreuses, et sont fréquemment installées à proximité directe des fonderies de zinc. Comme mentionné précédemment, les sites allemands de Recyclex, capables de purifier jusqu'aux 7N, ont été rachetés par un groupe chinois. Ces investissements ont probablement été réalisés pour combler le déficit chinois en capacité de raffinage final, le secteur s'étant principalement tourné vers l'oxyde d'indium-étain (ITO). Si d'autres métallurgistes généralistes sont actifs sur ce marché, comme le Canadien 5N plus (qui appartient en majorité à la province du Québec) ou l'Indien Jaytee, c'est l'Indium Corp, spécialisée sur cette matière, qui domine le secteur. Créée en 1934, l'entreprise dispose de raffineries aux États-Unis, au Canada, en Corée du Sud et en Chine.

<sup>5</sup> La capacité de ces raffineries n'est pas disponible.

## Le recyclage de l'indium

**Le recyclage en fin de vie des produits de consommation comportant de l'indium ne représente pas une option économiquement viable de diversification à ce jour.** La concentration extrêmement faible de l'indium et sa transformation importante limite très fortement toute possibilité de récupération.

**Des possibilités de récupération supplémentaires d'indium concernent d'abord les pertes enregistrées dans le processus de production d'oxyde d'indium-étain (ITO).** Mais cette source ne pourra constituer, à court terme, un approvisionnement pour les besoins du nucléaire. D'une part, l'amélioration des procédés tend à diminuer fortement les pertes en cours de production. D'autre part, l'indium recyclé reste en majorité dans la filière d'oxyde d'indium-étain (ITO), le processus étant réalisé en boucle fermée par ses producteurs.

**Des capacités de recyclage en dehors de la chaîne d'oxyde d'indium-étain (ITO) ont été développées en Chine, en Corée du Sud et au Japon, mais restent marginales pour le moment.** En Europe, l'allemand Recyclex qui exploitait à Langelsheim le principal site de recyclage de l'indium a fait faillite en mai 2020. Alors que le gouvernement allemand avait auparavant bloqué les tentatives d'absorption du groupe par des industriels chinois, citant des questions stratégiques, Recyclex a été racheté après son dépôt de bilan par Vital Metallic, basé à Guangzhou.

**Par ailleurs, le faible taux de récupération de l'indium dans les fonderies signifie que leurs laitiers pourraient constituer d'importantes mines anthropogéniques.** En sidérurgie, le laitier correspond aux sous-produits formés pendant la fusion du métal. En partant d'une estimation très haute de 70 % de récupération de l'indium dans les fonderies depuis 1972, ces déchets pourraient contenir jusqu'à 21 800 tonnes d'indium. En imaginant un taux d'extraction de seulement 25 %, considérant le coût de traitement des laitiers, ces ressources constitueraient quatre à cinq années de consommation. Un durcissement des normes environnementales sur les métaux lourds présents dans ces déchets, ainsi que la récupération d'autres matières qui s'y trouvent, pourrait augmenter fortement l'intérêt à récupérer de l'indium. Deux sites, celui de Tsumeb en Namibie et de Zeehan en Australie, ont déjà été identifiés pour leurs forts potentiels. Qui plus est, ces estimations ne prennent pas en compte les fonderies de cuivre et de plomb, dont les minerais contiennent également de l'indium à des taux de récupération encore plus faibles.

## HAFNIUM : REGAIN D'INTÉRÊT POUR LA MATIÈRE HISTORIQUE DES BARRES DE CONTRÔLE

### 5 ÉLÉMENTS À RETENIR SUR LES DYNAMIQUES DU HAFNIUM

Le hafnium n'est jamais extrait seul, mais toujours comme coproduit du zirconium

La production de hafnium dépend du raffinage de zirconium de qualité nucléaire qui nécessite la séparation des deux matières.

La plus grande partie du zirconium est utilisé par l'industrie sans séparation du hafnium.

Cinq pays disposent de capacités de séparation du hafnium. La France et les États-Unis dominent très largement, mais la Chine et la Russie ont initié des stratégies d'autonomisation.

Les projets de production de hafnium en dehors de la filière zirconium n'ont pas encore prouvé leur rentabilité.

## L'IMPORTANCE ÉCONOMIQUE DU HAFNIUM POUR LA FILIÈRE NUCLÉAIRE

### L'usage stratégique du hafnium dans l'industrie nucléaire : *from bust to boom*

**Le hafnium a été identifié dès les années 1960 comme une matière de référence pour les barres de contrôle des réacteurs nucléaires.** Le métal est sélectionné pour son excellente résistance à la corrosion dans des eaux chaudes, sa température de fusion très haute (supérieure à 2 000°C) ainsi que sa forte absorption de neutron. **La filière nucléaire s'est ensuite détournée du hafnium dans les années 1970.** En effet, ce minerai présente un coût de production élevé et les exploitants de réacteurs nucléaires sont parvenus à développer un substitut : l'alliage argent-indium-cadmium (AIC), qui permet de mimer les caractéristiques du hafnium. **L'attention sur le hafnium s'est renouvelé dans les années 1990,** en raison de l'augmentation rapide des cours de l'argent dans les années 1980, qui représente 80 % du coût de fabrication de l'alliage argent-indium-cadmium (AIC). La baisse du prix du hafnium et de nouvelles avancées en matière de recherche ont soutenu un regain d'intérêt pour ce minerai.

### Les besoins de hafnium de la filière nucléaire

**La consommation de hafnium par la filière nucléaire demeurerait réduite en 2022.** À cette date, seules des barres de contrôle comprenant du hafnium en petite quantité sont commercialisées. Westinghouse et GE Hitachi proposent des barres pour réacteur BWR composées de carbure de bore en majorité où sont insérées des pastilles de hafnium. Placé en certains points, le hafnium permet d'augmenter la durée de vie des grappes de commande. Les barres uniquement composées de hafnium, qui ont existé par le passé, demeurent des barres expérimentales qui ne sont pas développées de manière industrielle. **Plusieurs signaux tendent à penser que l'importance du hafnium pourrait encore croître pour l'industrie nucléaire dans les années à venir.** Premièrement, le différentiel entre le hafnium et l'argent s'est réduit. Dans une situation de mobilisation accrue des barres de contrôle pour piloter le suivi de charge des réacteurs dans la transition énergétique, la meilleure résistance du hafnium à la corrosion pourrait favoriser cette matière. Deuxièmement, la restriction des réglementations pour les réacteurs BWR, à la suite de la catastrophe de Fukushima, pourrait accroître à moyen terme l'utilisation de hafnium comme enrobage des barres de contrôle. Troisièmement, l'utilisation de barre de hafnium est envisagée comme solution pour **limiter le vieillissement de l'acier des cuves de réacteurs nucléaires.**

### Des utilisations concurrentes au nucléaire de plus en plus pesantes

**La filière nucléaire n'est aujourd'hui qu'un débouché très minoritaire pour la production de hafnium.** Son très haut point de fusion en fait aujourd'hui un matériau central d'un nombre croissant d'utilisations. Au niveau mondial, près de la moitié du hafnium (48 %) est utilisé pour la fabrication de superalliage destiné à l'industrie aéronautique ainsi que pour la construction de turbine à gaz. Associé à 1 % ou 2 % au nickel, il permet d'améliorer la résistance à la chaleur des pales des réacteurs. Combiné au niobium, il constitue un élément fondamental de la tuyère des moteurs de fusée. Le reste se distribue entre 20 % pour la fabrication de chalumeaux pour le découpage plasma, 11 % dans l'optique, 7 % dans l'électronique et **seulement 5 % dans le nucléaire.** En Europe, la hiérarchie des utilisations du hafnium est différente. Les superalliages représentent toujours la moitié du métal transformé sur le continent, mais le nucléaire totalise 14 %.

## LES RISQUES SUR LES RESSOURCES MINIÈRES DE HAFNIUM

### Criticité géologique : une disponibilité théorique, mais des limites pratiques

**Le hafnium ne se trouve jamais dans sa forme élémentaire.** Il est principalement présent dans le zircon et la baddeleyite. En moyenne, le ratio est d'un gramme de hafnium pour 50 grammes de zirconium. Mais cette proportion peut très fortement varier.

**En théorie, la disponibilité de hafnium ne constitue pas un risque pour la filière. Les ressources mondiales sont évaluées entre 1 et 1,5 million de tonnes,** soit plus de 12 000 années de la consommation actuelle. Toutefois, il n'existe pas d'estimation spécifique des réserves minières de ce minerai. Les données sont évaluées statistiquement à partir de celles du zirconium en appliquant un ratio de 1 pour 50.

**Toutefois, plusieurs problèmes se posent.** Ce minerai est toujours un coproduit de la production de zirconium de qualité nucléaire. Mais seule une infime partie des minerais de zirconium rejoint la filière nucléaire d'où est extrait le hafnium. Pour produire le zirconium, il est impératif de se débarrasser au maximum du hafnium. Les exploitants de raffinerie ont donc intérêt à privilégier les sources contenant le moins de hafnium possible. Enfin, les minerais de zircon avec les parts les plus importantes de hafnium sont généralement ceux avec le plus grand volume de matières radioactives, ce qui limite fortement leur commercialisation.

### Criticité géopolitique : forte concentration des ressources en Australie

La répartition géographique des ressources en hafnium suit, théoriquement, celle du zirconium, avec l'Australie loin en tête. En réalité, la teneur en hafnium peut varier fortement d'un gisement à l'autre, et les sites les plus prometteurs ont été identifiés au Brésil ainsi qu'au Nigeria. En Europe, des réserves de hafnium ont été rapportées dans le gisement de terres rares de Norra Kärr, en Suède, explorée par le Canadien Leading Edge Materials. Toutefois, les faibles volumes ainsi que la très forte opposition locale rendent toute exploitation peu probable.



## LES RISQUES POUR LA PRODUCTION DE HAFNIUM

### Criticité industrielle : des capacités dépendantes du zirconium

La chaîne d'approvisionnement du hafnium est entièrement dépendante de la demande en zirconium dehafnésé. Moins de 2 % du zirconium est raffiné en éponge métallique, ce qui signifie que moins de 2 % du hafnium extrait de terre est effectivement transformé. Les 98 % restant se trouvent dans des produits finis qui ne peuvent être récupérés. **En l'absence de données fiables, il est difficile d'évaluer si les capacités de production mondiale suffiront pour répondre aux besoins futurs.**

### Criticité géopolitique : domination d'un duopole franco-américain

**Cinq pays raffinent du hafnium dans le monde** : la France, les États-Unis, la Russie, la Chine et l'Inde. La France (57 %) et les États-Unis (33 %) concentrent la quasi-totalité du marché. La production française ne semble pas avoir sensiblement augmenté depuis le début des années 2010, ce qui pourrait signifier que le potentiel maximal de production est atteint. Aux États-Unis, les capacités de Westinghouse à Ogden apparaissent sous-utilisées, et ce depuis 2015. La Chine avance des capacités presque 30 fois supérieures à sa production, sans qu'il soit possible de le vérifier. À court terme, l'appareil productif pourrait donc être suffisant pour répondre à une augmentation de la demande, potentiellement au profit des sites chinois, américains et éventuellement russes. **Sur le moyen terme, toutefois, la construction de nouvelles raffineries apparaît nécessaire pour éviter la création de goulets d'étranglement sur la chaîne d'approvisionnement.**


### Criticité géoéconomique : Framatome, acteur mondial


**À l'échelle mondiale, deux entreprises, Framatome en France et ATI aux États-Unis**, répartis sur deux usines uniquement, Jarré dans l'Isère et Albany dans l'Oregon, **concentrent 90 % de la production mondiale de hafnium**. Dans l'éventualité d'une hausse du besoin en hafnium pour répondre au vieillissement du parc nucléaire d'EDF, Framatome (qui est une filiale d'EDF depuis 2018) pourrait répondre à ces besoins.


**D'autres acteurs interviennent dans la chaîne de valeur**. Le hafnium produit à partir des éponges de zirconium peut comporter des impuretés et nécessiter des traitements supplémentaires en raffinerie. Ici, le hafnium destiné au secteur aéronautique demande les plus grands niveaux de pureté, avec des teneurs en zirconium inférieur à 1 %, quand celui l'industrie nucléaire peut tolérer jusqu'à 2 %. S'il est difficile de retracer parfaitement la chaîne depuis Framatome et ATI jusqu'aux producteurs de barres de contrôle pour réacteur (principalement GE-Hitachi et Westinghouse), il est probable que les achats passent par l'intermédiaire d'une des entreprises spécialisées dans son raffinage et sa commercialisation : (ACI Alloys, American Elements et Chemsavers, dont les sites sont aux États-Unis, au Mexique et en Chine.

## FOCUS SUR LES STRATÉGIES DE LA CHINE, DE L'INDE ET LA RUSSIE POUR RÉDUIRE LEUR DÉPENDANCE AU DUOPOLE FRANCO-AMÉRICAIN

Comme pour le zirconium, la Chine, l'Inde et la Russie ont développé des stratégies d'autonomisation de leur filière hafnium. À l'instar du concentré de zirconium, le hafnium est placé sur la « *Dual List* » du *Nuclear Suppliers Group* qui renforce les contrôles à l'exportation. **Dans les trois pays, cette stratégie d'autonomisation vise à alimenter la filière nucléaire.**

 En **Russie**, JSC Chepetsky Mechanical Plant (CMP), filiale de Rosatom, a développé le premier site de production de hafnium du pays en 2018, produisant actuellement 2t par an. Pendant la période soviétique, l'URSS produisait de très petites quantités grâce au conglomérat de Dnepropetrovsk en Ukraine. **En 2020**, CMP a exporté pour la première fois du hafnium, vers la République tchèque, la Corée du Sud et la Turquie. Si cette cargaison était destinée à la production de torche à plasma, son niveau de raffinage (99,9 %) signifie que **Rosatom est capable de produire du hafnium de qualité nucléaire.**

 **Le niveau d'avancée de la Chine est moins certain.** La création en 2009 de la State Nuclear WEC Zirconium en joint-venture entre Westinghouse et le groupe Baoti afin de produire du zirconium de qualité nucléaire permet à la Chine de développer des capacités de séparation du hafnium. Le groupe, entièrement nationalisé depuis 2018, affirme pouvoir produire jusqu'à 30 t d'éponge de hafnium par an, sans possibilité de vérification. Les sources sont discordantes. En 2020, la China Nuclear Jinhuan Zirconium Industry, filiale de CNNC affirmait, elle, être la seule entreprise du pays à maîtriser ce processus. Si l'on peut mettre ces déclarations sur le compte des rivalités qui existent au sein de la filiale nucléaire, le fait que le pays ne produise qu'une tonne de hafnium par an tend à confirmer l'idée qu'il n'est pas encore capable de peser sur le marché.

 Comme pour le zirconium, **l'Inde dispose de capacités autonomes de production de hafnium** depuis 2018. Une usine a été installée au Vikram Sarabhai Space Centre d'Hyderabad, avec une capacité de production située entre 500 kg et 1 t par an. Deux points limitent toutefois cette annonce pour le secteur électronucléaire. Premièrement, aucune source ne confirme la pureté du hafnium produit à ce jour. Deuxièmement, l'organisation du site de production tend à penser que le métal sera d'abord destiné à la fabrication des tuyères du programme nucléaire indien et non à la filière nucléaire.

## FOCUS SUR LE PROJET DE DUBBO EN AUSTRALIE : UNE NOUVELLE SOURCE DE HAFNIUM ?



Face à la concentration de la production de hafnium en France et aux États-Unis, des solutions de diversification de l'approvisionnement sont à l'étude. C'est le cas du projet de Dubbo en Australie, dans l'ouest de l'État de Nouvelle-Galles-du-Sud.

Découvert à la fin des années 1980 en cherchant de l'or, le gisement de Toongi n'est exploré qu'à partir des années 2010. En réponse à l'identification de ressources et à l'intérêt exprimé par la filière aéronautique australienne, l'Australian Nuclear Science and Technology Organisation (ANSTO), l'administration publique du secteur nucléaire dans le pays, a développé une usine pilote pour raffiner le hafnium présent. Le projet de Dubbo envisage d'extraire et de raffiner directement sur site du zirconium, du titane, des terres rares du niobium et du hafnium.

Dubbo est porté par Australian Strategic Materials (ASM), un *spin-off* du géant minier australien Alkane Resources. ASM suit une stratégie d'intégration verticale complète dite « *mine to metal* », visant à extraire, raffiner et manufacturer des produits et alliages métalliques. En 2021, un consortium sud-coréen, composé de fonds d'investissement, a racheté 20 % du projet de Dubbo ainsi qu'une part de production de la raffinerie d'ASM en cours de construction à Ochang (Corée du Sud).

Le projet de Dubbo a reçu l'ensemble des autorisations fédérales et nationales pour son exploitation. Mais les conditions économiques n'étaient pas réunies en 2022 pour continuer les investissements et construire le site. Considérant ses ressources, l'ouverture de Dubbo et l'exploitation du hafnium sont tributaires des prix sur le marché des terres rares, qui, en l'état du marché, ne permettent pas d'avancer.



## FOCUS SUR LE CADMIUM

### L'IMPORTANCE ÉCONOMIQUE DU CADMIUM POUR LA FILIÈRE NUCLÉAIRE

**Dans les alliages argent-indium-cadmium (AIC) utilisés pour les barres de contrôles, le cadmium joue un rôle central pour l'absorption des neutrons.** Comme pour les autres matières, la filière nucléaire n'est qu'un consommateur marginal du cadmium. Les deux tiers sont utilisés pour la production d'accumulateurs et de batteries rechargeables nickel-cadmium dans l'industrie. Le reste se partage entre la production d'alliages de cuivre, zinc et plomb (16 %), d'enrobage pour métaux (4 %), de pigment (3 %) ainsi que d'autres utilisations mineures (2 %), dont l'alliage argent-indium-cadmium (AIC) (< à 0,1 %).

### LES RISQUES SUR L'APPROVISIONNEMENT EN CADMIUM

**Le cadmium n'est jamais extrait pour lui-même.** Chimiquement très similaire, il est associé au zinc dans les gisements, à une moyenne d'environ 0,03 %. En conséquence, il n'existe pas de données comptabilisant les réserves de cadmium et leur répartition, mais uniquement des estimations basées sur ce ratio. Comme pour l'indium, le cadmium est élaboré comme sous-produit du raffinage du zinc, et uniquement dans les fonderies équipées d'unité dédiée à ce métal. En 2020, environ 24 000 tonnes de cadmium ont été produites, en baisse de 1 500 tonnes par rapport à l'année précédente. **Les 31 unités de raffinage du cadmium sont localisées dans 16 pays.** La Chine en possède neuf sur son territoire, soit près de 30 % du total mondial. Quatre pays en Europe disposent au moins d'une fonderie : la Bulgarie, la Pologne, l'Allemagne, les Pays-Bas. La production de l'Allemagne ne provient pas d'une fonderie, mais d'une usine de recyclage du cadmium utilisé dans les batteries. Mais toutes les fonderies ne sont pas en opération. L'unique fonderie algérienne n'a pas produit de cadmium depuis trois ans. **La Chine était de loin le premier producteur mondial de cadmium,** avec 41 % du marché, devant la Corée du Sud, le Japon, le Canada et le Kazakhstan. Depuis 4 ans, la Chine a fortement accru sa domination sur le marché, au détriment de la Corée du Sud.

## FOCUS SUR LE CARBURE DE BORE

### L'IMPORTANCE DU CARBURE DE BORE POUR LA FILIÈRE NUCLÉAIRE

**Le carbure de bore (B4C) est utilisé dans la production des barres de contrôles de réacteur nucléaire, principalement pour les BWR et de plus en plus fortement avec du hafnium. La filière nucléaire n'est qu'un consommateur marginal d'oxyde de bore ou borates.** Sur les 4,2 millions de tonnes de borates consommées en 2019, la plus grande part (50 %) est utilisée par l'industrie du verre, environ 15 % par la fabrication d'isolant thermique, 15 % pour la production de fertilisant agricole, 7 % comme catalyseur chimique, et 2 % comme détergent. Le B4C est une forme mineure de céramique de bore. De même, **l'électronucléaire demeure un consommateur mineur de carbure de bore (B4C).** Au total, entre 12 000 et 15 000 tonnes de carbure de bore sont produites par an. **Seuls 15% sont utilisés par l'industrie nucléaire.** Considérant sa solidité, le B4C est principalement utilisé comme abrasif dans les procédés industriels ainsi que comme blindage dans la défense. Considérant ses applications, le recyclage est considéré impossible, et moins de 1 % de la matière est récupérée.

### LES RISQUES SUR LES APPROVISIONNEMENTS EN CARBURE DE BORE

**Géologiquement, le borate se trouve dans 250 minerais**, mais un nombre restreint sont exploitables économiquement : le tincal, la kernite, la colemanite, l'évaporite et l'uxelite. Les réserves mondiales de borate sont estimées à plus d'un million de kilotonnes, soit plus de deux siècles de consommation, au rythme actuel. **Même s'il n'est pas rare, le borate est très concentré spatialement.** La Turquie concentre la quasi-totalité des réserves estimées de borate, avec 87 % du total mondial, très loin devant les États-Unis (4 %), la Russie (4 %), le Chili (3 %) et la Chine (2 %). En Europe, des gisements minimes de borates ont été identifiés en Serbie, en marge du projet de lithium de Jadar, ainsi qu'en Italie. **Cette domination turque sur les réserves ne se retrouve pas entièrement sur la production, qui est légèrement plus déconcentrée.** La Turquie représentait 43 % de la production mondiale de borate, devant les États-Unis (25 %), le Chili (11 %), l'Argentine (7 %), le Pérou (5 %) et la Chine (4 %). **En Turquie, la production se fait dans trois mines (Kirka, Emet et Bigadiç) et est transformée et exporte depuis le port de Bandirma. La totalité de la production est dans les mains du groupe d'État ETI Maden.** La production de carbure de bore, étape suivante de la chaîne de valeur, présente également des risques en matière de sécurité des approvisionnements. Peu d'entreprises raffinent du B4C de qualité nucléaire et leurs capacités de production ne sont pas publiques. Toutefois, il est estimé que 50 % des capacités sont en Asie. Cherchant à profiter de sa position sur le marché du borate et de la croissance à venir du carbure de bore, la Turquie a annoncé en octobre 2019 la construction d'une usine de production de B4C à Balikesir, financé par le groupe chinois Chinese Machinery Engineering Corporation. La production devrait être ciblée spécifiquement pour l'industrie de la défense et la filière électronucléaire.

## PARTIE III – LES MATIÈRES PREMIÈRES POUR LA CONSTRUCTION DES CENTRALES

### À RETENIR

Le béton ne semble pas présenter de risque d'approvisionnement majeur pour le secteur nucléaire. Toutefois, la disponibilité géologique de certains granulats utilisés pour les bétons de radioprotection pourrait représenter un facteur de risque.

La filière nucléaire apparaît peu exposée à des risques de ruptures d'approvisionnements en acier. En revanche, un facteur de risque important provient de la capacité des maîtres d'ouvrage à sécuriser des ressources humaines et des savoir-faire indispensables à la fabrication de certaines pièces en acier assurant un rôle stratégique pour la filière, telle que la cuve du réacteur.

Les futurs approvisionnements en aluminium sont soumis à des niveaux de criticité élevés sur les différentes étapes de la chaîne de valeur du métal, comme l'épuisement géologique des ressources en bauxite et la dépendance accrue des pays européens aux importations. La bauxite est listée comme un minerai critique par l'UE. Dans ce contexte, la filière nucléaire reste exposée au risque de rupture d'approvisionnement, même si les besoins modérés et peu stratégiques du secteur réduisent sa vulnérabilité.

Les terres rares sont incluses dans la liste des minerais critiques de l'Union européenne. Les approvisionnements en terres rares présentent des niveaux de criticité élevés sur les aspects géostratégiques, géopolitiques, géoéconomiques et environnementaux. Par ailleurs, l'agrégation constante des 17 éléments sous l'appellation « terres rares » dans la plupart des sources d'informations constitue un facteur de risque additionnel, car cela réduit la possibilité d'établir un constat fin du niveau d'exposition de la filière.

Le béryllium est sur la liste des minerais critiques de l'Union européenne. Les États-Unis constituent le principal fournisseur de béryllium de l'UE. Peu de tensions d'approvisionnement semblent apparaître. Mais il reste intéressant d'identifier le potentiel des gisements sur le territoire métropolitain, et les sources secondaires de béryllium (recyclage) en cas de succès d'ITER, technologie pour laquelle les besoins en béryllium pourraient être plus importants.

## FOCUS SUR LE BÉTON

### L'IMPORTANCE DU BÉTON POUR LA FILIÈRE NUCLÉAIRE

**Le béton est un matériau de construction.** Les composants indispensables à sa confection sont le ciment, l'eau, les granulats (sables et gravillons de différentes tailles) et les adjuvants. Les applications du béton dans l'industrie nucléaire couvrent à la fois l'édification de la structure de base des réacteurs, la gestion et le traitement du combustible et la construction des sites accueillant les opérations. Il existe du **béton dit « ordinaire »** qui est la solution de référence en l'absence de contraintes techniques. Mais certaines structures spécifiques aux opérations nucléaires (tels que les conteneurs accueillant le combustible usé, ou l'enceinte de confinement) nécessitent des **bétons « spéciaux »**. Leurs paramètres de formulation, et notamment le calibrage et les types des granulats utilisés, leur confèrent des propriétés radio-protectrices indispensables pour assurer la sécurité nucléaire. **Les quantités mobilisées par la filière sont considérables.** La construction du réacteur nucléaire de Flamanville 3 et les nouveaux aménagements de la centrale ont mobilisé environ 550 000 m<sup>3</sup> de béton (soit l'équivalent de 180 piscines olympiques) et le site de stockage des matériaux radioactifs (Cigéo) en a requis 6 millions m<sup>3</sup>.

### LES RISQUES D'APPROVISIONNEMENTS EN BÉTON

**Il est peu probable que les plans de construction de nouveaux réacteurs nucléaires se heurtent à des contraintes d'approvisionnement en béton « ordinaire ».** La production des entreprises de béton actives en France et en Europe semble en mesure de répondre à l'approvisionnement national. La production moyenne de béton en France s'établissait à environ 38 millions de m<sup>3</sup> par an). Plus de 700 sites de production tissent un maillage très dense sur l'ensemble du territoire, et les quelques 450 entreprises en activités comptent parmi elles des chefs de file mondiaux de l'industrie, comme Lafarge-Holcim et Cemex. Les constituants de base du béton « ordinaire » sont relativement abondants, facilement disponibles, à un coût modéré. Ils sont généralement acheminés localement. **Mais certains constituants des bétons « spéciaux » présentent des risques.** Depuis 2006, la France a cessé sa production de barytine, un minéral avec lequel des volumes considérables de bétons de radioprotection ont été réalisés par le passé. Un mémento publié en 2014 par le BRGM souligne que la réouverture de capacité de production en France métropolitaine permettrait de fournir environ 8,5 Mt par an. D'autres types de minéraux tels que la magnétite, l'hématite ou encore la serpentine peuvent également être utilisés pour la production de bétons « spéciaux », dédiés à la radioprotection. L'estimation des volumes nécessaires pour les ouvrages de radioprotection, la demande future de ces granulats, l'identification de la répartition des gisements sur le territoire, leurs potentiels de production, non disponible en accès ouvert à ce stade, apparaît comme un prérequis essentiel pour ne pas entraver le développement de la filière. **La production de béton présente également des risques socio-environnementaux.** L'empreinte carbone de la production globale de béton est significative (8 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>). La recherche, le développement et la communication sur l'emploi de bétons moins émetteurs de gaz à effet de serre permettraient d'appuyer l'insertion de la filière nucléaire française dans le cadre de la lutte contre le changement climatique.

## FOCUS SUR L'ACIER

### L'IMPORTANCE DE L'ACIER POUR LA FILIÈRE NUCLÉAIRE

**L'acier est un alliage** composé de minerai de fer et de carbone qui présente d'importantes propriétés de malléabilité et de résistance. D'autres intrants sont également nécessaires notamment le charbon coke, et d'autres métaux peuvent être associés pour réaliser des alliages (chrome, aluminium, etc.). **D'importants volumes d'acier sont utilisés pour la construction des réacteurs nucléaires**, toutes générations confondues. Il faut compter entre 12 000 et 28 000 tonnes d'acier pour un réacteur nucléaire à eau pressurisé de 900 MW. Les besoins de l'EPR de Flamanville (1630 MW) culminent aux alentours de 75 000 tonnes d'acier (10 fois la masse de la tour Eiffel), et la construction du site de stockage des matériaux radioactifs, Cigéo, nécessiterait environ 200 000 tonnes d'acier selon l'ANDRA. **Deux types d'aciers sont utilisés par la filière nucléaire.** Entre 90 % et 70 % des applications de l'acier sont dites « **communes** », c'est-à-dire inhérentes à la plupart des infrastructures industrielles. Mais il existe certains usages spécifiques pour lesquels le matériau doit répondre à des critères très strictement établis, on parle alors d'**aciers « spéciaux »**. C'est le cas par exemple des turbines à vapeur, ou de certaines pièces dans la structure interne du réacteur telle que la cuve, deuxième barrière prévenant le contact entre les matériaux radioactifs et l'environnement extérieur. Une défaillance de ces différentes structures peut avoir un impact économique considérable, engendré par l'indisponibilité de la centrale (turbine et cuve), et potentiellement des risques sanitaires en cas d'accident (cuve). De plus, la fabrication de ces structures en acier requiert des compétences techniques très spécifiques.

### LES RISQUES D'APPROVISIONNEMENT EN ACIER

**Le minerai de fer est un élément relativement abondant sur l'ensemble de la planète.** Les réserves disponibles permettent d'écarter des tensions liées à un risque d'épuisement géologique. De plus, la production secondaire d'acier, liée au recyclage, représente aujourd'hui environ 30 % de la production mondiale totale. **Mais l'Union européenne est très dépendante des importations d'acier.** La production d'acier des pays de l'UE n'assure que 27 % de la consommation de la zone. La France produit environ 15 Mt d'acier brut par an depuis plus d'une dizaine d'années (soit 0,8 % du total mondial). L'industrie sidérurgique française se caractérise par une forte spécialisation sur les aciers à haute valeur ajoutée (aéronautique, automobile, énergie). En 2019, environ 65 % de l'acier produit en France est issu d'une seule entreprise : ArcelorMittal. **Mais les principales contraintes qui pèsent sur l'acier dans l'industrie nucléaire risquent de provenir de la capacité des opérateurs à rassembler un ensemble de compétence industrielle en matière de sidérurgie**, et à les maintenir dans le temps long, sous peine d'avoir à importer des ressources humaines ou matérielles et de perdre en autonomie stratégique. En effet, ces pièces doivent répondre à des normes de sécurité fixées par l'autorité de sûreté nucléaire française. **L'exemple de l'EPR de Flamanville illustre bien la dimension critique de l'acier pour la filière et des enjeux sociaux.** L'anomalie détectée dans l'acier de la cuve du réacteur (qui présentait une teneur en carbone excessive dans certaines zones) a entraîné des délais de mise en service considérables, de plus de 10 ans.



## FOCUS SUR L'ALUMINIUM

### L'IMPORTANCE DE L'ALUMINIUM POUR LA FILIÈRE NUCLÉAIRE

**L'aluminium est l'un des métaux les plus abondants de l'écorce terrestre**, après le silicium. Mais sa chaîne de production est complexe. Très marginalement présent à l'état pur, il est pratiquement toujours associé avec d'autres éléments dont il faut l'extraire. La bauxite est le principal minerai utilisé dans l'extraction de l'alumine, à partir de laquelle est produit l'aluminium. **Les propriétés remarquables de l'aluminium** (léger, solide, résistant à la corrosion) en font un matériau fondamental pour les technologies du monde moderne, à la fois dans la construction, les transports, les composants électroniques et les technologies bas carbone. L'UE est le deuxième consommateur d'aluminium au niveau mondial. **La plupart des applications de l'aluminium de la filière nucléaire semblent communes**, à l'exception de quelques usages spécifiques dans les réacteurs expérimentaux. **Les quantités d'aluminium mobilisées dans les technologies nucléaires sont relativement faibles** (quelques centaines de tonnes par réacteur). À titre d'exemple, l'éolien utilise 35 fois plus d'aluminium et le solaire PV 700 fois plus pour produire une même unité d'énergie.

### LES RISQUES D'APPROVISIONNEMENT EN ALUMINIUM

**La bauxite, principal minerai utilisé dans l'extraction de l'alumine, à partir de laquelle est produit l'aluminium, présente une forte criticité géologique.** Une étude récente conduite par l'IFPEN<sup>6</sup> a conclu qu'un scénario de transition énergétique visant à maintenir l'élévation de température en dessous +2°C mobiliserait entre 67 % et 87 % des ressources de bauxite en 2050 (basé sur les hypothèses du USGS). **La production de la bauxite présente également une forte criticité géopolitique.** En 2021, trois pays concentraient près de 70 % des activités de production de bauxite : l'Australie (30 %), la Guinée (22 %) et la Chine (16 %). L'Europe est particulièrement démunie de ressources significatives de bauxite. Une poignée de pays européens produisaient de la bauxite (France, Grèce, Hongrie, Croatie), mais ils représentaient moins de 1 % du total au niveau mondial. **Le raffinage de l'alumine présente également des risques en matière de sécurité des approvisionnements.** Aujourd'hui, c'est la Chine qui possède les premières capacités de fonte et de raffinage de l'alumine pour former l'aluminium (57 %). Sans compter que les capacités de fonte des pays de l'OCDE sont en déclin constant depuis 30 ans. Les États-Unis, le Canada et l'Australie représentaient en 1990 près de 30 % de la production mondiale d'aluminium et ne représentent plus que 10 % aujourd'hui. Le Russe Rusal, détenu en majorité par le groupe En+, était l'un des principaux producteurs mondiaux d'aluminium. Le recyclage et l'extraction de l'alumine à partir d'autres minéraux que la bauxite (muscovite, leucite, sillimanite) pourraient constituer un levier efficace pour sécuriser les approvisionnements.

<sup>6</sup> Hache, Emmanuel ; Barnet, Charlène ; Seck, Gondia-Sokhna « L'aluminium dans la transition énergétique : quel avenir pour ce métal « roi du monde moderne » ? », Les métaux dans la transition énergétique, n° 6, IFPEN, Mai 2021.

## FOCUS SUR LES TERRES RARES

### L'IMPORTANCE DE TERRES RARES POUR LA FILIÈRE NUCLÉAIRE

**L'appellation « terres rares » regroupe 17 éléments chimiques** : les 15 lanthanides, l'yttrium et le scandium. Ils sont généralement utilisés en toute petite quantité et servent principalement à améliorer les performances des matériaux (magnétisme, conductivité électrique, stabilité thermique, etc.). **Les terres rares sont utilisées dans des quantités limitées pour dans les technologies nucléaires, pour des applications très spécialisées et difficilement substituables.** Certains réacteurs utilisent ces minerais dans les barres de contrôle (samarium, gadolinium). Mais il est difficile de relier chaque élément à un usage nucléaire particulier, car les estimations agrègent constamment les 17 éléments ensemble. Cette agrégation constitue un facteur de risque additionnel, car elle réduit la capacité à établir un constat exhaustif du niveau d'exposition de la filière. **Les besoins en terres rares de la filière nucléaire apparaissent modérés comparés à d'autres dispositifs de production d'énergie bas carbone.** Par exemple, les études récentes sur le sujet démontrent que l'éolien en mer est l'un de moteurs de la croissance de la demande de terres rares (en particulier pour le dysprosium et le néodyme pour les aimants permanents). Mais les réacteurs nucléaires de quatrième génération (réacteurs à neutrons rapides (RNR)), tels que les prototypes français Phénix et Super Phénix, sont susceptibles d'être plus intensifs en terres rares (notamment pour absorber les neutrons) que les réacteurs classiques à eau pressurisée ou les EPR.

### LES RISQUES D'APPROVISIONNEMENT EN TERRES RARES

**Les terres rares sont classées sur la liste des minerais critiques de l'Union européenne. Les terres rares ne présentent pas une criticité géologique significative.** Les travaux de l'IFPEN<sup>7</sup>, publiés en 2021 indiquent que dans un scénario climatique visant à maintenir l'élévation de température en dessous 2°C, la consommation cumulée de terres rares n'excéderait pas 4 % des ressources mondiales d'ici 2050. **Mais les terres rares présentent une forte criticité géopolitique.** En 2010, la Chine était en situation de monopole quasi total avec 95 % de la production mondiale. L'émergence des États-Unis, de l'Australie et du Myanmar a permis de ramener la part de production chinoise à environ 65 %. La Chine conserve néanmoins une position stratégique de premier ordre sur le marché mondial, en contrôlant 90 % des activités de raffinage. **L'extraction des terres rares présente également une criticité environnementale, car elle est très intensive en eau.** Certains pays pourraient voir leurs capacités de production momentanément limitées à cause du stress hydrique provoqué par le changement climatique (notamment l'Australie et la Chine). Cette situation pourrait renforcer le déséquilibre offre-demande et conduire à une plus grande volatilité des prix. **Le recyclage présente peu de solutions.** Les terres rares sont utilisées en très petites quantités avec des alliages relativement nouveaux et complexes. Elles se retrouvent donc très diluées dans la plupart des objets, ce qui complique considérablement leur récupération. Ces difficultés réduisent ainsi drastiquement le rôle des sources secondaires pour sécuriser les approvisionnements en cas de perturbation des approvisionnements.

<sup>7</sup> Hache, Emmanuel ; Barnet, Charlène ; Seck, Gondia-Sokhna « Les terres rares dans la transition énergétique : quelles menaces sur les « vitamines de l'ère moderne » ? », Les métaux dans la transition énergétique, n° 3, IFPEN, Janvier 2021.

## FOCUS SUR LE BÉRYLLIUM

### L'IMPORTANCE DU BÉRYLLIUM POUR LA FILIÈRE NUCLÉAIRE

Le béryllium est un métal, majoritairement utilisé comme alliage avec le cuivre dans l'industrie des télécommunications et de l'électronique. Le marché mondial du béryllium reste encore aujourd'hui réduit. Cette situation s'explique en partie par la haute toxicité du métal, qui pose un certain nombre de contraintes sanitaires et limite son utilisation. **Le béryllium présente un intérêt stratégique pour l'industrie nucléaire.** Il est utilisé pour contrôler les flux de neutrons. Par le passé, le béryllium a été utilisé pour le gainage des combustibles dans certains réacteurs (d'ordinaire confectionné en zirconium). Aujourd'hui, ce métal assure un rôle de sécurité parmi les plus importants dans le réacteur expérimental à fusion nucléaire (ITER), puisqu'il a été choisi comme matériau de revêtement de la paroi qui sera en contact direct avec le plasma chaud. Les quantités absorbées par le projet ITER montrent que les besoins d'un réacteur nucléaire à fusion pourraient représenter jusqu'à une dizaine de pourcentages de la production mondiale actuelle, si le développement industriel de la fusion nucléaire devait se développer à long terme.

### LES RISQUES D'APPROVISIONNEMENT EN BÉRYLLIUM

**Le béryllium est classé sur la liste des minerais critiques de l'Union européenne.** Les gisements de bertrandite et de béryl (les minerais à partir desquels le béryllium est extrait) sont assez nombreux et répartis dans de nombreux pays. Cependant, peu d'entre eux sont en exploitation, car la demande mondiale est encore trop faible. En 2021, la production mondiale de minerai brut culminait à 260 tonnes, et une seule mine aux États-Unis (SporMountain) assurait environ 65 % de l'approvisionnement mondial. Les approvisionnements de béryllium de l'UE proviennent à 88 % des États-Unis et sont donc peu diversifiées. La France ne produit pas de béryllium, mais il existe plusieurs transformateurs sur le territoire (NKG Berylco et Atmostat-Alcen).

# BIBLIOGRAPHIE

## Quantification des matières de la filière nucléaire

IAEA, *INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact from Depletion of Resources*, Technical reports NG-T-3.13

<https://www.iaea.org/publications/10748/inpro-methodology-for-sustainability-assessment-of-nuclear-energy-systems-environmental-impact-from-depletion-of-resources>

IAEA, *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050*, 2021

<https://www.iaea.org/publications/15028/energy-electricity-and-nuclear-power-estimates-for-the-period-up-to-2050>

IAEA-Power Reactor Information Système Database

<https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>

Jeremy T. Busby, "Overview of Structural Materials in Water-Cooled Fission Reactors" *Structural Alloys for Nuclear Energy Applications*, 2019, P. 1-22 (<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397046-6.00001-0>)

OCDE-AEN, *Assessment of the environmental footprint of nuclear energy systems. Comparison between closed and open fuel cycles*, <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2011/ndc-2011-15.pdf>

Schneider M. et al., *The World Nuclear Industry Status Report*, 2021

<https://www.worldnuclearreport.org/-World-Nuclear-Industry-Status-Report-2021-.html>

## Zirconium

Australian Government, *Outlook for selected critical minerals in Australia 2021 report*,

<https://www.industry.gov.au/data-and-publications/outlook-for-selected-critical-minerals-in-australia-2021-report>

Cameron Perks, Gavin Mudd, Titanium, "zirconium resources and production: A state of the art literature review", *Ore Geology Reviews*, Volume 107, 2019, Pages 629-646

(<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.025>)

Cameron Perks, Gavin M. Mudd, Matthew Currell, "Using corporate sustainability reporting to assess the environmental footprint of titanium and zirconium mining", *The Extractive Industries and Society*, Volume 9, 2022,

<https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.101034>

Deutsche Rohstoffagentur, *Zircon –insufficient supply in the future?*, 2013

[https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA\\_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-14.html](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-14.html)

Fedoseev S. Tsvetkov P, "Development potential of Russian zirconium industry on world markets", *Journal of Business and Retail Management Research (JBRMR)*, Vol. 12 Issue 1, 2017  
([https://jbrmr.com/cdn/article\\_file/content\\_50624\\_17-10-04-21-28-12.pdf](https://jbrmr.com/cdn/article_file/content_50624_17-10-04-21-28-12.pdf))

Harald G. Dill, "The "chessboard" classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium", *Earth-Science Reviews*, Volume 100, Issues 1–4, 2010, :  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825209001688>

IAEA, Integrated Nuclear Fuel Cycle Information System (INFCIS),  
<https://infcis.iaea.org/NFCIS/About.cshtml>

K. Vergazov, M. Shtuza, S. Lozitsky, A. Kutuyavin, "Manufacturing of Zirconium Products at Chepetsky Mechanical Plant, Stock Company"  
([https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/47/082/47082493.pdf?r=1&r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/082/47082493.pdf?r=1&r=1))

Mikael Lundberg, *Environmental analysis of zirconium alloy production*, Upsala Universitet, 2011  
<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:475527/FULLTEXT01.pdf>

United States Geological Survey (USGS), Zirconium and Hafnium Statistics and Information, 2022  
(<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/zirconium-and-hafnium-statistics-and-information>)

United States Geological Survey (USGS), Zirconium, Professional Paper 1802

## Niobium

Alves and Coutinho, 2015, A.R. Alves, A.R. Coutinho, "The evolution of the niobium production in Brazil" *Mater. Res.*, 18 (1) (2015), pp. 106-112  
<https://www.scielo.br/j/mr/a/BDGSCwPV98xBphJ8vJyrSsk/?lang=en>

Bruno Milanez, "The territorialization of the niobium global extractive network in Goiás, Brazil", *Atelie Geografico*, 2020, p.142-162  
<https://www.ufjf.br/poemas/files/2020/08/Go%3%a7alves-2020-The-territorialization-of-the-niobium-global-extractive-network-in-Goi%3%a1s.pdf>

Damien Deltenre, « Entre les terres rares chinoises et le niobium brésilien : les métaux précieux comme moteur d'une nouvelle géopolitique des ressources ? », *note d'analyse Université Catholique de Louvain, Chaire InBev*,  
<http://cecrilouvain.be/wp-content/uploads/2018/01/20note-danalyse-niobium.pdf>

European Commission, *Critical raw materials factsheets*, 2020,  
<https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42883/attachments/2/translations/en/renditions/native>

Mackay, D.A.R., Simandl, G.J. "Geology, market and supply chain of niobium and tantalum—a review". *Miner Deposita* 49, 1025–1047 (2014)  
<https://doi.org/10.1007/s00126-014-0551-2>

Pedro Filipe de Oliveira Cordeiro *et al.*, "The Catalão I niobium deposit, central Brazil: Resources, geology and pyrochlore chemistry", *Ore Geology Reviews*, Volume 41, Issue 1, October 2011, Pages 112-121

<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.06.013>

Robert Linnen , David L. Trueman, Richard Burt, "Tantalum and niobium", *Critical Metals Handbook*, 2014 (<https://mmsallaboutmetallurgy.com/wp-content/uploads/2019/07/Critical-Metals-Handbook.pdf#page=373>)

Siqueira-Gay, J., Sánchez, LE. « Keep the Amazon niobium in the ground”, *Environmental Science & Policy*, Volume 111, September 2020

Talal Omar, Marcello M. Veiga, "Is niobium critical for Canada?", *The Extractive Industries and Society*, Volume 8, Issue 2, 2021

<https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.100898>

United States Geological Survey (USGS), Niobium and Tantalum Statistics and Information, 2022

<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/niobium-and-tantalum-statistics-and-information>

United States Geological Survey (USGS), Niobium, Professional Paper 1802

## Indium

European Commission, *Critical raw materials factsheets*, 2020,

<https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42883/attachments/2/translations/en/renditions/native>

European Commission, "Assessment of potential bottlenecks along the materials supply chain for the future deployment of low-carbon energy and transport technologies in the EU"

<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC103778>

Gabrielle Gaustad, Mark Krystofik, Michele Bustamante, Kedar Badami, "Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues", *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 135, 2018, Pages 24-33,

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.002>

Jing Lin, "How Can China's Indium Resources Have a Sustainable Future? Research Based on the Industry Chain Perspective", *Sustainability*, 2021, 13(21)

<https://doi.org/10.3390/su132112042>

Luca Ciacci, Tim T. Werner, Ivano Vassura, Fabrizio Passarini, "Backlighting the European Indium Recycling Potentials", *Journal of Industrial Ecology*, Volume 23, Issue 2 April 2019 Pages 426-437

Martin Lokanc, Roderick Eggert, and Michael Redlinger, "The Availability of Indium: The Present, Medium Term, and Long Term", *NREL*, 2015

<https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/62409.pdf>

Max Frenzel, Claire Mikolajczak, Markus A. Reuter, Jens Gutzmer, "Quantifying the relative availability of high-tech by-product metals – The cases of gallium, germanium and indium", *Resources Policy*, Volume 52, 2017, Pages 327-335

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.04.008>

Ulrich Schwarz-Schampera, *Indium*, Critical Metals Handbook

<https://mmsallaboutmetallurgy.com/wp-content/uploads/2019/07/Critical-Metals-Handbook.pdf#page=216>

T.T. Werner, Gavin M. Mudd, Simon M. Jowitt, "The world's by-product and critical metal resources part III: A global assessment of indium", *Ore Geology Reviews*, Volume 86, 2017, Pages 939-956,

<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.015>

Tim T. Werner, Luca Ciacci, Gavin Mark Mudd, Barbara K. Reck, et Stephen Alan Northey, "Looking Down Under for a Circular Economy of Indium", *Environmental Science & Technology*, 2018, 52 (4),

<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.7b05022>

United States Geological Survey (USGS), Indium, Statistics and Information, 2022

<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/indium-statistics-and-information>

United States Geological Survey (USGS), Indium, Professional Paper 1802

## Hafnium

European Commission, "Material System Analysis of Nine Raw Materials: Barytes, Bismuth, Hafnium, Helium, Natural Rubber, Phosphorus, Scandium, Tantalum and Vanadium", 2021

<https://op.europa.eu/fr/publication-detail/-/publication/1de0016a-df96-11eb-895a-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-222332745>

European Commission, "Material System Analysis of Nine Raw Materials: Barytes, Bismuth, Hafnium, Helium, Natural Rubber, Phosphorus, Scandium, Tantalum and Vanadium", 2021,

[https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/material\\_system\\_analyses\\_9\\_materials\\_10052021\\_final-version.pdf](https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/material_system_analyses_9_materials_10052021_final-version.pdf)

European Commission, *Critical raw materials factsheets*, 2020,

<https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42883/attachments/2/translations/en/renditions/native>

Shikov, A.K., Bocharov, O.V., Arzhakova, V.M. et al. "Use of Hafnium in Control Elements of Nuclear Reactors and Power Units", *Metal Science and Heat Treatment* 45, 300–303 (2003).

<https://doi.org/10.1023/A:1027392604745>

United States Geological Survey (USGS), Zirconium and Hafnium Statistics and Information, 2022

<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/zirconium-and-hafnium-statistics-and-information>

## Les autres matières premières pour la construction de centrales nucléaires

ADEME « Terres rares, énergies renouvelables et stockage d'énergie », Rapport (2019)

Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, "Cigéo, les installations et le fonctionnement du centre, chiffres clés", Site web de l'ANDRA. Consulté le 10/02/2022. Accessible en ligne à l'adresse suivante : <https://www.andra.fr/cigeo/les-installations-et-le-fonctionnement-du-centre/chiffres-cles>

ASN & IRSN. "Analyse Des Conséquences de l'anomalie Des Calottes de La Cuve Du Réacteur EPR de Flamanville Sur Leur Aptitude Au Service." Autorité de Sûreté Nucléaire & Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Rapport ASN référencé CODEP-DEP-2017-019368 & Rapport IRSN/2017-00011 (2017). [https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports\\_gp/Documents/GPESPN/IRSN-ASNDP\\_Rapport-GPESPN\\_cuve-FA3\\_201706.pdf](https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_gp/Documents/GPESPN/IRSN-ASNDP_Rapport-GPESPN_cuve-FA3_201706.pdf)

Balaram, V. "Rare Earth Elements: A Review of Applications, Occurrence, Exploration, Analysis, Recycling, and Environmental Impact." *Geoscience Frontiers* 10, no. 4 (2019): 1285–1303. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>.

Bertrand Viellard-Baron & Yves Meyzaud. "Durabilité des bétons des centrales nucléaires françaises." *Matériaux pour le nucléaire*, 2021. <https://doi.org/10.51257/a-v1-bn3730>.

Bouniol, Pascal. "Bétons de radioprotection." *Matériaux pour le nucléaire*, 2021. <https://doi.org/10.51257/a-v2-bn3740>.

Bourg, Stéphane ; Poinssot, Christophe. "Could Spent Nuclear Fuel Be Considered as a Non-Conventional Mine of Critical Raw Materials?" *Progress in Nuclear Energy* 94 (January 2017): 222–28. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.08.004>.

Bouygues, "Centrale EPR de Flamanville 3", Site web de Bouygues (2015?). Consulté le 24/02/2022. <https://www.bouygues-tp.com/fr/projets/centrale-epr-de-flamanville-3>

Bréchet, Yves. "L'arrêt Du Programme ASTRID : Une Étude de Cas de La Disparition de l'Etat Stratège." *Les Progressistes* (en ligne), septembre 2019. Consulté le 22/02/2022, accessible en ligne : <https://revue-progressistes.org/2019/09/22/larret-du-programme-astrid-une-etude-de-cas-de-disparition-de-letat-strategie/>.

BRGM. "Memento barytine" Rapport du BRGM/RP-63974-FR (2021). <https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2021-01/brgm-nov.2014-barytine-rp-63974-fr.pdf>

BRGM. "Fiche de Synthèse sur la criticité des métaux - le béryllium" Rapport BRGM (Septembre 2016). <https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2020-12/fichecriticiteberyllium-publique161026.pdf>

BRGM. "Panorama 2010 du marché du béryllium" Rapport BRGM/RP-60203-FR (Septembre 2011). <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-60203-FR.pdf>



NGK Berylco. "Le Groupe NGK Berylco, Présentation" Site internet de *NGK Berylco* (2022). Consulté le 15/03/2022. Accessible en ligne à l'adresse : <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-60203-FR.pdf>

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. *Les matériaux du nucléaire: modélisation et simulation des matériaux de structure*. Le Moniteur & CEA Saclay. E-den. Paris Gif-sur-Yvette, 2016

Connaissance des énergies. "Les turbines Arabelle de GE, un actif stratégique pour le nucléaire français." *Connaissances des énergies* (en ligne), 2022. Consulté le 22/02/2022, accessible en ligne : <https://www.connaissancesdesenergies.org/afp/les-turbines-arabelle-de-ge-un-actif-strategique-pour-le-nucleaire-francais-220207>

Du, Xiaoyue, and T. E. Graedel. "Uncovering the Global Life Cycles of the Rare Earth Elements." *Scientific Reports* 1, no. 1 (2011). <https://doi.org/10.1038/srep00145>.

Elhacham, Emily, Liad Ben-Uri, Jonathan Grozovski, Yinon M. Bar-On, and Ron Milo. "Global Human-Made Mass Exceeds All Living Biomass." *Nature* 588, no. 7838 (2020): 442–44. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-3010-5>.

Emily Thomas, "2020 vision", *World Cement*, 15/01/2020. Consulté le 11/02/2022 <https://www.worldcement.com/special-reports/15012020/2020-vision/#:~:text=The%20global%20cement%20industry%20enters%202020%20with%20a,du%20to%20lower%20demand%20in%20Iran%20and%20Turkey>

European Commission. Directorate General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. *Study on the EU's List of Critical Raw Materials (2020) :Final Report*. Publications Office, 2020. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/904613>.

General Electric "Arabelle nuclear steam turbine." Site en ligne de General Electric, 2022. Consulté le 22/02/2022, accessible en ligne : <https://www.ge.com/steam-power/products/steam-turbines/nuclear-arabelle>

Global Cement and Concrete Association. "Concrete Future. The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete." GCCA, 2021. <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW.pdf>

Gosset D. & Herter P. "Matériaux absorbants neutroniques pour le pilotage des réacteurs" *Matériaux pour le nucléaire*, 2007. <https://doi.org/10.51257/a-v1-bn3720>.

Hache, Emmanuel, Marine Simoën, Gondia Sokhna Seck, Clément Bonnet, Aymen Jabberi, and Samuel Carcanague. "The Impact of Future Power Generation on Cement Demand: An International and Regional Assessment Based on Climate Scenarios." *International Economics* 163 (October 2020): 114–33. <https://doi.org/10.1016/j.inteco.2020.05.002>.

Hache, Emmanuel ; Barnet, Charlène ; Seck, Gondia-Sokhna « L'aluminium dans la transition énergétique : quel avenir pour ce métal « roi du monde moderne » ? », Les métaux dans la transition énergétique, n° 6, IFPEN, Mai 2021.

<https://www.ifpenouvelles.fr/article/laluminium-transition-energetique-quel-avenir-ce-metal-roi-du-monde-moderne>

Hache, Emmanuel ; Barnet, Charlène ; Seck, Gondia-Sokhna « Les terres rares dans la transition énergétique : quelles menaces sur les « vitamines de l'ère moderne » ? », Les métaux dans la transition énergétique, n° 3, IFPEN, Janvier 2021.

<https://www.ifpenouvelles.fr/article/les-terres-rares-transition-energetique-quelles-menaces-les-vitamines-lerre-moderne>

IEA. "The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions." Paris: International Energy Agency, 2021. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>

International aluminium, "Global aluminium cycle 2019", site internet de International Aluminium (2021). Consulté le 26/01/2022, accessible en ligne à l'adresse : <https://alucycle.international-aluminium.org/public-access/>

ITER. "ITER, le tokamak, la couverture." Site internet de ITER (2022). Consulté en ligne le 15/03/2022. Accessible à l'adresse : <https://www.iter.org/fr/mach/blanket>

Khalili, Laleh, "A World Built on Sand and Oil. When natural resources become essential commodities", *Lapham's Quarterly* (date?) <https://www.laphamsquarterly.org/trade/world-built-sand-and-oil>

L'Élémentarium. "Le Béryllium". Site internet *L'Élémentarium* (2020). Consulté le 15/03/2022. Accessible en ligne à l'adresse : <https://lelementarium.fr/element-fiche/beryllium/>

National Minerals Information Center. "U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries 2022 Data Release." U.S. Geological Survey, 2022. <https://doi.org/10.5066/P9KMKCP4>.

Net-Zero Steel Pathway Methodology Project, "Final Report and Recommendations 2021. Net-Zero Steel Pathway Methodology Project", Rapport 2021 <file:///C:/Users/newir/Downloads/NZSPMP-Recommendation%20Guidance%20Report.pdf>

Patrick Hetzel et Delphine Bataille. "Les Enjeux Stratégiques Des Terres Rares et Des Matières Premières Stratégiques et Critiques." Rapport d'office parlementaire, 2016. <https://www.senat.fr/rap/r15-617-1/r15-617-1.html>.

Reck B. K. ; Graedel T. E. "Challenges in Metal Recycling." *Science* 337, no. 6095 (2012): 690–95. <https://doi.org/10.1126/science.1217412>.

US Department of Energy, "Quadrennial Technology Review. An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities", 2015. [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/03/f34/quadrennial-technology-review-2015\\_1.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/03/f34/quadrennial-technology-review-2015_1.pdf)

Valérie Létard. "Rapport sur les enjeux de la filière sidérurgique dans la France du XXI<sup>e</sup> siècle : opportunité de croissance et de développement." Rapport d'office parlementaire n°649, 2019. <https://www.senat.fr/rap/r18-649-1/r18-649-11.pdf>

Valérie L'Hostis, et Laurent Charpin. "Durabilité des bétons des centrales nucléaires françaises." *Matériaux pour le nucléaire*, 2021. <https://doi.org/10.51257/a-v1-bn3742>.

World Steel Association, "Glossary", site en ligne de World Steel Association, 2022. Consulté le 21/02/2022\* <https://worldsteel.org/about-steel/glossary/>

World Steel Association, "World Steel in figures 2021", Rapport 2021 <https://worldsteel.org/publications/steel-reports/>

World Steel Association, "Steel Statistical Yearbook 2020", Rapport 2020. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Steel-Statistical-Yearbook-2020-concise-version.pdf>



Observatoire  
de la sécurité des flux  
et des matières énergétiques

RAPPORT #11 – Mars 2022

**LES MATIÈRES PREMIÈRES CRITIQUES DE L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE :**  
**Hafnium | Indium | Niobium | Zirconium**

Recherche  
Teva MEYER

Cartographie  
David AMSELLEM

Edition  
Pierre Laboué

L'**Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques** est coordonné par l'Institut de relations internationales et stratégiques (**IRIS**), en consortium avec **Enerdata** et **Cassini**, dans le cadre d'un contrat avec la Direction générale des relations internationales et de la stratégie (**DGRIS**) du ministère des Armées.

Au travers de rapports d'études trimestriels, de séminaires et de travaux cartographiques, l'objectif principal de cet observatoire consiste à analyser les stratégies énergétiques de trois acteurs déterminants : la **Chine**, les **États-Unis** et la **Russie**.

Le consortium vise également à :

- Proposer une vision géopolitique des enjeux énergétiques, en lien avec les enjeux de défense et de sécurité ;
- Croiser les approches : géopolitique, économique et sectorielle ;
- S'appuyer sur la complémentarité des outils : analyse qualitative, données économiques et énergétiques, cartographie interactive ;
- Réunir différents réseaux : académique, expertise, public, privé.

L'Observatoire est coordonné par Pierre Laboué, chercheur à l'IRIS, et rassemble une équipe d'une vingtaine de chercheurs et professionnels.

© DGRIS – Mars 2022

