

Chapitre 2 : Réduire

**Vers une utilisation responsable des terres rares
tout au long de leur cycle de vie**

Rapport de l'expertise scientifique collective

Table des matières du chapitre 2

2	REDUIRE	66
2.1	Panorama des usages, réduction et substituabilité des ETR	67
2.1.1	Applications pour l'énergie et les mobilités (aimants permanents)	69
2.1.1.1	Usages	70
2.1.1.2	Propriétés des aimants et facteurs de mérite	71
2.1.1.3	En quoi les terres rares sont-elles nécessaires dans les aimants permanents ?	73
2.1.2	Applications pour l'éclairage (phosphores pour Diodes Electro-Luminescentes, LED)	93
2.1.2.1	Tendance d'usage, substitution des dispositifs d'éclairage classiques par des dispositifs à LED.	93
2.1.2.2	Principes d'utilisation des phosphores (matériau convertisseur de lumière) d'ETR dans les W-LED	93
2.1.2.3	LED avec phosphores sans ETR	97
2.1.2.4	Nouveaux design LED	99
2.1.2.5	Autres utilisations de phosphores	99
2.1.3	Applications pour la photonique et les télécommunications	100
2.1.3.1	Verres et rayonnement ionisants	101
2.1.3.2	Verres pour application telecom (fibres optiques...)	101
2.1.4	Applications en santé	102
2.1.4.1	Lasers	103
2.1.4.2	Agents de contraste pour l'imagerie médicale	104
2.1.5	Applications pour la métallurgie	107
2.1.6	Applications pour la catalyse	108
2.1.7	Applications pour le stockage de l'énergie	110
2.1.8	Conclusion	111
2.1.8.1	Matériaux à fortes teneurs en ETR	111
2.1.8.2	Matériaux à faibles teneurs en ETR	113
2.2	Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire	116
2.2.1	L'encadrement de la production et de l'approvisionnement en terres rares sous le prisme de la sécurité	117
2.2.1.1	L'émergence d'une « gouvernance des terres rares » à l'échelle internationale	117
2.2.1.2	Le concept de chaîne de valeur, au cœur de la gouvernance des terres rares	121
2.2.1.3	L'analyse de cette nouvelle gouvernance par le nexus « Sécurité - Durabilité »	123
2.2.1.4	Le contenu du droit européen relatif à l'utilisation des terres rares	125
2.2.2	L'articulation de la réglementation européenne relative à l'utilisation des terres rares avec les principes de l'économie circulaire	136
2.2.2.1	Le renvoi du Règlement européen matières premières critiques aux principes de l'économie circulaire et du développement durable	136
2.2.2.2	L'économie circulaire au service de la réduction de l'utilisation des terres rares	139
2.2.3	Les critiques du droit applicable à l'utilisation des terres rares et les propositions visant à en renforcer l'effectivité et la cohérence	146
2.2.3.1	La dénonciation des faiblesses géopolitiques, écologiques et démocratiques du Règlement sur les matières premières critiques	147
2.2.3.2	Des propositions de réforme de la « gouvernance des terres rares »	150
2.2.4	Conclusion	157

2.3	Concevoir, consommer et posséder autrement	158
2.3.1	Concevoir et fabriquer autrement	158
	2.3.1.1 Pourquoi éco-concevoir ? Décliner l'éco-conception à chaque niveau fonctionnel.	159
	2.3.1.2 Comment ? Démarches, stratégies et outils de l'éco-conception	162
	2.3.1.3 Jusqu'où ? Limites de l'éco-conception dans le cadre de l'économie circulaire	164
2.3.2	Posséder autrement (l'économie de la fonctionnalité)	164
	2.3.2.1 Le partage de véhicules électriques	165
	2.3.2.2 L'économie de la fonctionnalité dans l'industrie	166
2.3.3	Consommer autrement	166
	2.3.3.1 Préférences des consommateurs par rapport au véhicule électrique : les principaux résultats	166
	2.3.3.2 La théorie des fondations morales : un cadre pertinent pour mieux comprendre les comportements des consommateurs	169
2.4	Mise en perspective et conclusions : réduire les terres rares, un angle mort de la recherche ?	173
2.4.1	L'invisibilité des problématiques de sobriété et de substituabilité dans la littérature scientifique	173
	2.4.1.1 Les biais de la littérature relative à la réduction de l'utilisation des ETR en science des matériaux	173
	2.4.1.2 Les manques spécifiques à la littérature analysée en sciences humaines et sociales	176
2.4.2	Les potentialités d'une approche plus transversale et interdisciplinaire de la sobriété	177
2.5	Liste des références du chapitre 2	180

2 Réduire

La question de la réduction ou de l'optimisation de la consommation des ressources est une question qui reparaît périodiquement dans les recherches scientifiques et dans le débat public. Les leviers de réduction de la consommation d'ETR sont multiples. Ils incluent la substitution des ETR par d'autres éléments moins critiques, l'amélioration de l'efficacité des dispositifs qui les utilisent, ainsi qu'une diminution de la quantité des produits consommateurs d'ETR. Ces initiatives sont d'inégale vertu environnementale. Dès 2005, mais sans référence aux ETR, Nakajima et Vanderburg recensent et hiérarchisent les démarches de réduction et d'optimisation des ressources de la plus vertueuse à la moins vertueuse environnementalement (tableau 4, page 141 (Nakajima & Vanderburg, 2005)) :

1. l'économie de la fonctionnalité, c'est-à-dire la démarche qui consiste à vendre un service plutôt qu'un produit (selling services instead of products, "product -as-a-service")
2. la consigne (product take back)
3. l'écodesign (basic design for environment)
4. substitution de matériaux ou d'énergie (material and energy substitution)
5. le changement dans les process de production (process modification)
6. le recyclage des résidus de fabrication (in-process recycling)
7. les symbioses industrielles (industrial ecopark design)

Ces différentes initiatives sont dorénavant regroupées sous le concept d'« économie circulaire », apparu dans les années 2010. S'il a permis de fédérer sous un unique étendard un grand nombre d'actions et de conceptualisations visant l'optimisation de l'usage de l'énergie et des matières et la réduction de la quantité de déchets, le concept possède néanmoins des assez floues. En France, le schéma conceptuel de l'ADEME fait référence (avec ses trois domaines et ses sept piliers de l'économie circulaire). L'écoconception et l'allongement de la durée de vie des produits permettent d'utiliser moins de terres rares plus longtemps. L'économie de la fonctionnalité privilégie l'usage plutôt que la possession grâce à la mutualisation des équipements. Ces deux approches permettent de réduire la demande en matières premières tout en maintenant le service attendu. Enfin, la sobriété vise à réduire les usages eux-mêmes et questionne leur pertinence. Certaines de ces approches ne sont pas spécifiques aux ETR et permettent des bénéfices environnementaux plus larges que la sécurisation des ressources (consommation énergétique et utilisation d'autres ressources).

Il est néanmoins notable que la littérature scientifique sur ces aspects est dispersée et manifeste un certain nombre de biais ou de caractéristiques singulières (cf. 2.4.1).

2.1 Panorama des usages, réduction et substituabilité des ETR

L'essentiel

De façon générale, les ETR peuvent faire l'objet d'une substitution dans la plupart des usages mais souvent au prix de compromis sur les performances des matériaux et dispositifs. Toutefois, dans certains cas, l'innovation technologique a permis de créer des dispositifs performants avec moins ou sans ETR, tels que :

- des moteurs de véhicules électriques optimisés visant à réduire la quantité d'aimants permanents aux ETR tout en maintenant des performances équivalentes,
- le développement de la technologie LED en remplacement des lampes à phosphores, permettant de réduire significativement la quantité de poudre phosphorescente riche en ETR nécessaire par dispositif d'éclairage, à performance équivalente,
- le développement des batteries Li-ion sans ETR en remplacement des batteries NiMH, permettant de s'affranchir totalement des ETR, mais en déplaçant la dépendance vers d'autres métaux critiques (lithium, cobalt, manganèse).

Cependant, l'innovation technologique demeure aujourd'hui davantage orientée vers l'amélioration des performances que vers une réelle démarche de sobriété en ETR.

Les usages des ETR, tels qu'ils ont été brièvement introduits dans le chapitre 1, sont si nombreux et variés qu'il est difficile d'être exhaustif (Balaram, 2019, 2025; Bünzli, 2022; McGill & Bünzli, 2018) ; le panorama présenté dans ce chapitre 2 se concentre sur ceux qui représentent une fraction significative de l'utilisation des ETR (ex. : aimants permanents) et/ou ceux représentant un effort de recherche académique se traduisant par de nombreuses publications scientifiques (ex. : agents de contraste). Une majorité de publications fait état de résultats qui n'ouvrent pas nécessairement à une perspective de montée en TRL (Technology Readiness Level, cf. encadré ci-dessous) ou d'applications de marché. Les études ayant atteint ou pouvant atteindre un niveau de TRL proche de l'usage sont prioritairement rapportées ici.

ZOOM. Échelles TRL et SRL

L'échelle TRL (Technology Readiness Level, niveau de maturité technologique) est un outil, inventé par la NASA dans les années 70, pour mesurer le degré de maturité d'une technologie en cartographiant les jalons critiques du développement d'un produit, depuis son concept initial à son déploiement opérationnel. Elle comporte neuf niveaux, allant de l'exploration des concepts scientifiques et la validation initiale de principes théoriques (niveau 1) jusqu'à une technologie pleinement fonctionnelle dans des conditions d'usage (niveau 9). Les niveaux intermédiaires concernent les tests en laboratoire (niveau 2 ou 3), le développement de prototypes (niveaux 4 à 6), et les essais sur le terrain (niveaux 7 et 8). Dans le domaine médical, l'échelle TRL est adaptée pour y intégrer les essais précliniques sur animaux (niveaux 4 à 6), puis les essais cliniques de phase I sur un groupe restreint de volontaires (niveau 7), de phase II sur un groupe élargi (niveau 8) et enfin, de phase III à grande échelle pour confirmer les affiner le ratio bénéfice/risque et identifier d'éventuels effets secondaires (niveau 9).

On admet généralement que les niveaux 1 à 3 correspondent à la recherche fondamentale, tandis que les niveaux 4 à 9 relèvent de la recherche appliquée. Ce passage est souvent délicat, car moins de financements sont accessibles pour ces niveaux intermédiaires de TRL (cf. Figure 2.1). Les niveaux de TRL 3 à 6 sont nommés « vallée de la mort » des TRL, car beaucoup de procédés d'innovation achoppent à ce point par manque de ressources de financement. La frontière entre recherche publique, privée ou partenariale varie en fonction des domaines d'activité.

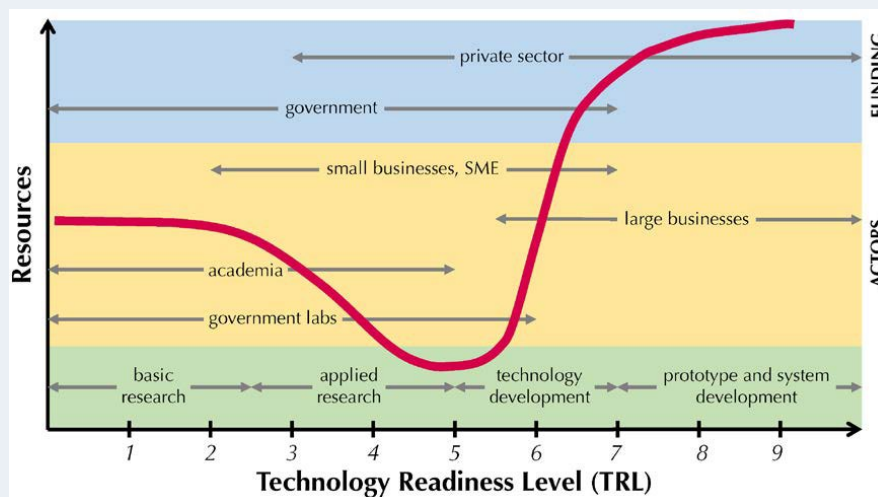


Figure 2.1 : Représentation des ressources (courbe rouge), acteurs et financements pour le développement de nouveaux produits en fonctions des niveaux de TRL, depuis les TRL bas (élaboration des concepts) à élevés (proche de l'usage). La diminution marquée des ressources au milieu de l'échelle est nommée « vallée de la mort des TRL ». Tirée de (Hensen et al., 2015), REHVA Journal¹. Sous licence CC BY-NC-ND.

L'approche TRL a été déclinée en Sciences Humaines et Sociales sous l'impulsion du Danish Innovation Council en 2011. L'échelle SRL pour « Social Readiness Level » évalue le niveau de maturité d'une innovation en mesurant sa préparation sociale et sa capacité à être intégrée dans la société. Il prend en compte notamment l'« acceptabilité sociale » (perception du public, éthique, acceptabilité culturelle), l'impact sociétal (bénéfices et risques pour la société), l'engagement des parties prenantes (gouvernements, citoyens, entreprises) et les implications réglementaires et politiques. Cependant, l'approche SRL reste encore confidentielle par rapport à l'approche TRL.

¹ <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/using-building-simulation-for-moving-innovations-across-the-valley-of-death>



Figure 2.2 Les 9 niveaux de l'approche SRL (source : Ellyx). Sous licence CC BY-NC-ND.

2.1.1 Applications pour l'énergie et les mobilités (aimants permanents)

Les aimants permanents sont présents dans un si grand nombre d'applications qu'il serait impossible de les citer toutes. De l'écouteur intra-auriculaire à l'éolienne en mer, du joint de réfrigérateur au drone, des aimants sont cachés partout pour assurer les fonctions les plus diverses des technologies les plus basses aux plus élevées. Le champ magnétique qu'ils produisent de manière permanente et sans consommer d'énergie peut être exploité afin de produire des forces, de l'électricité, de mesurer des distances, etc. Exploités industriellement depuis le XIX^e siècle, les aimants ont connu plusieurs phases de développement qui ont à chaque fois engendré des évolutions importantes des systèmes qui les utilisaient ou qui ne les utilisaient pas encore.

Les aimants se divisent en deux familles principales, ceux de type ferrites et ceux à base d'ETR qui représentent respectivement 50 et 40 % du marché. Leur usage apparaît parfois indispensable (moteurs de drone quadricoptère, haut-parleurs de téléphone...), parfois utile pour minimiser la masse des machines électriques (éoliennes offshore, véhicules électriques, micro-mobilités...), parfois futile (aimant de tableau, fermeture de sac à main...).

Les aimants permanents à base de terres rares (APTR) sont devenus indispensables dans un grand nombre de secteurs industriels en raison de leurs performances inégalées qui ont permis des évolutions voire des révolutions dans le domaine des transports et de l'énergie. Pour l'essentiel, les APTR sont basés sur la phase $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}_1$, autour de laquelle de nombreuses variations sont possibles pour optimiser une propriété ou une autre, l'ajout de Dy et éventuellement de Tb, des ETR lourds, sont indispensables dans de nombreuses applications pour qu'ils gardent leur efficacité à haute température (150°C, voire 220°C pour les nuances dans lesquelles 12% du Nd est substitué par du Dy). Typiquement un aimant NdFeB aura un volume 5 à 8 fois moindre et une masse 3 à 5 fois moindre que celui d'un aimant sans ETR à fonctionnalité égale. Cette propriété permet non seulement d'augmenter la fonctionnalité des systèmes (une machine électrique aura plus de puissance dans le même volume et un meilleur rendement) mais aussi de simplifier des fonctions (par exemple un bras de lecture de disque dur) et même de créer de nouvelles fonctions (comme les haut-parleurs miniatures de téléphone ou d'écouteurs).

Les aimants permanents absorbent 1/3 de la production de terres rares, mais représentent 73% de la valeur commerciale du fait notamment du nombre limité d'éléments, du niveau de pureté exigé pour atteindre les propriétés visées et de la valeur ajoutée dans les applications les plus communes. Ils consomment 73% du Pr, 89% du Nd, 97% du Sm, 35% du Gd, 24% du Tb et 98% du Dy. Ainsi, l'extraction des ETR est portée par la demande en Nd et en Dy pour les APTR, les éléments restants, en particulier les ETR légers, sont souvent employés dans des applications à basse valeur ajoutée. Accessoirement, les aimants ferrites de haut de gamme contiennent 8% de La, mais le La étant un sous-produit de l'extraction du Nd il n'y a aucun sujet d'inquiétude sur sa disponibilité ni son cours².

2.1.1.1 Usages

L'utilisation des aimants permanents est surtout documentée pour les secteurs des véhicules électriques (1 à 2 kg d'aimants dans le moteur d'une voiture) et des éoliennes offshores (plus d'une tonne d'aimants dans une éolienne). Si la proportion en masse des aimants produits pour ces deux applications est aujourd'hui modeste, les études de prospective suggèrent qu'elle est appelée à croître significativement dans les décennies futures³. Les autres usages sont soit moins exigeants du point de vue des performances, soit liés à des produits pour lesquels le prix de l'aimant est négligeable. La grande majorité des aimants ETR est dispersée sous forme de petits aimants, parfois de seulement quelques dizaines de milligrammes, cachés dans divers dispositifs. Au-delà des moteurs de voitures électriques et éoliennes, les aimants permanents sont utilisés dans une très grande variété d'applications, ventouses magnétiques pour applications domestiques ou industrielles, capteurs de position, accéléromètres, composants automobiles divers (ventilateurs, alternateurs, freins, pompe à carburant, motorisation de vitres, sièges, rétroviseurs, coffres...), moteurs de traction automobile, alternateurs d'éoliennes, moteurs de drones de jouets, d'ascenseurs ou de lecteurs de disques, boussoles, haut-parleurs, transducteurs électrodynamiques, disques durs, robots, appareils photo, montres, microphones, les auto-focus de téléphones portables, les écouteurs, les stylets et les connecteurs de recharge des tablettes, etc. Pour la plupart des applications, les aimants ferrites sont suffisamment performants pour satisfaire le besoin, mais certaines ont absolument besoin des APTR, soit pour le gain de poids (drones, éoliennes *off-shore*), soit pour le gain de place (disques durs), soit pour l'autonomie (véhicules électriques). La valeur ajoutée joue un rôle très important dans le choix de l'aimant, le secteur automobile n'utilisera que des ferrites dans les composants auxiliaires alors que dans une éolienne *off-shore* le gain en poids sur la structure et le génie civil ainsi que la diminution des pertes intégrées sur 30 ans permet de justifier l'emploi d'APTR. À l'extrême, l'horlogerie de luxe pourra se permettre d'intégrer des aimants Pt-Co particulièrement coûteux. Un aperçu des secteurs d'application des aimants permanents est donné dans le Tableau 2-1 et les différents matériaux utilisables sont proposés suivant les exigences en termes de température et de densité d'énergie.

² <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-65330-FR.pdf>

³ Selon l'IEA (2024).

Tableau 2-1 Panorama des applications des aimants permanents avec les contraintes sur les facteurs de mérite et les aimants utilisables. APTRL = APTR avec ETR lourds ; SrM = ferrite de strontium ; Alnico = aimants à base de Al-Ni-Co-Fe ; gap = aimants intermédiaires en cours de développement.

Usage	Part de la masse d'aimants produite (%)	Propriétés		Aimants				
		BH _{max}	Température	APTRL	APTR	SrM	Alnico	gap
éolienne en mer	9	+	++	x				
moteur véhicule hybride	9	+	++	x		?		?
moteur véhicule électrique		+	+	x		?		?
auxiliaires automobiles	9	-	+/-			x		x
micro-mobilité	3	+	+		x	x		x
disques durs	4	+	-		x			
air conditionné	8	+	+/-	x	x			
transducteur acoustique	5	+/-	-		x	x	x	x
robotique	1	+	+/-	x	x			
électronique grand public	21	+/-	-		x	x		x
séparation magnétique	28	+	+/-		x			
ascenseurs		+			x	?		
moteurs industriels		+/-	+/-	x	x	x		
ventouse magnétique		+/-	-		x	x	x	x
capteurs de position		-	-		x	x	x	x

2.1.1.2 Propriétés des aimants et facteurs de mérite

Les aimants se caractérisent d'un point de vue magnétique par deux cycles d'hystérésis, un cycle de l'induction en fonction de l'excitation, $B(H)$, qui intéresse les utilisateurs d'aimants, et un cycle d'aimantation en fonction du champ magnétique, $M(H)$, qui est caractéristique des mécanismes d'aimantation mis en jeu (cf. Figure 2.3). La relation entre les deux s'obtient simplement en écrivant $B = \mu_0(H + M)$. Les points caractéristiques du cycle sont l'induction rémanente $B_r = \mu_0 M_r$ et les deux champs coercitifs :

le champ coercitif intrinsèque, celui du cycle $M(H)$ qui est utilisé par défaut dans les publications de sciences des matériaux, il s'exprime en principe en A/m, mais par commodité on l'exprime presque toujours en teslas, l'ordre de grandeur pour un bon aimant est typiquement $\mu_0 H_{ci} \approx 1 \text{ T}$; Le champ coercitif (extrinsèque), celui du cycle $B(H)$ qui est utilisé pour les applications, idéalement $H_c = M_r$.

Lorsque le champ coercitif intrinsèque est plus faible que la moitié de l'induction rémanente, le matériau peut se démagnétiser partiellement sous l'effet du champ interne produit par son aimantation, le champ démagnétisant. Le champ démagnétisant est proportionnel à l'aimantation par un facteur appelé coefficient démagnétisant qui dépend exclusivement de la forme de l'aimant. Ce dernier sera d'autant plus faible que l'aimant est allongé, c'est-à-dire que sa longueur est grande devant les dimensions de ses pôles. Les aimants permanents sont également qualifiés de durs par opposition aux matériaux magnétiques doux qui sont caractérisés par un champ coercitif très faible — typiquement 10 000 fois moins — et une perméabilité magnétique relative μ_r très grande, $\mu_r = B/\mu_0 H$ peut aller de 10 à 100 000.

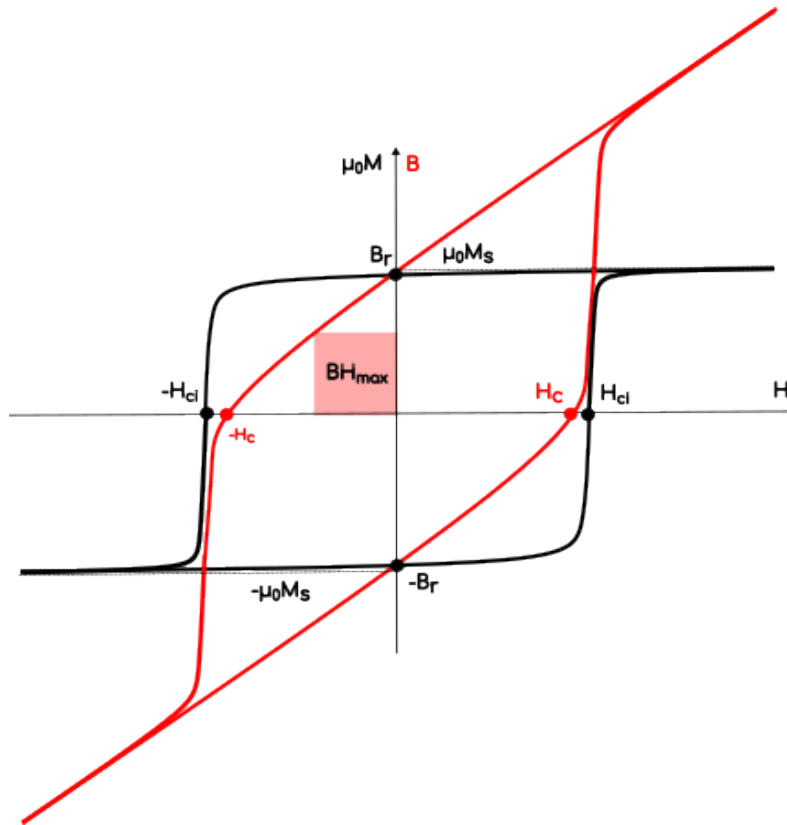


Figure 2.3 Cycle d'hystérésis d'un aimant permanent avec ces points caractéristiques. La courbe noire représente le cycle de l'aimantation et la rouge le cycle de l'induction (préférée par les ingénieurs).

D'un point de vue industriel, **le premier facteur de mérite est évidemment le prix** qui doit faire l'objet d'un compromis avec les performances. Le principal critère de performance du point de vue de l'ingénieur est la densité d'énergie maximale stockable dans l'aimant. **Pour des raisons historiques, la figure de mérite retenue est le double de la densité d'énergie stockée**, c'est-à-dire la valeur maximale du produit de l'induction B par le champ d'excitation H , appelé couramment produit d'énergie, noté $(BH)_{\max}$. Pour simplifier, on peut dire que ce facteur est inversement proportionnel au volume de l'aimant nécessaire pour produire une force donnée sur un objet donné à une distance donnée. Pour les « bons aimants », à savoir les hexaferrites de strontium et les APTR, ce facteur est directement relié à l'induction rémanente par la relation $(BH)_{\max} = B_r^2 / 4 \mu_0$.

Le second facteur de mérite est à température de Curie. Même si cette température est usuellement nettement supérieure à la température d'utilisation (typiquement limitée à 120°C par la tenue des isolants), elle détermine la température maximale d'utilisation, car l'aimantation et le champ coercitif s'annulent à cette température.

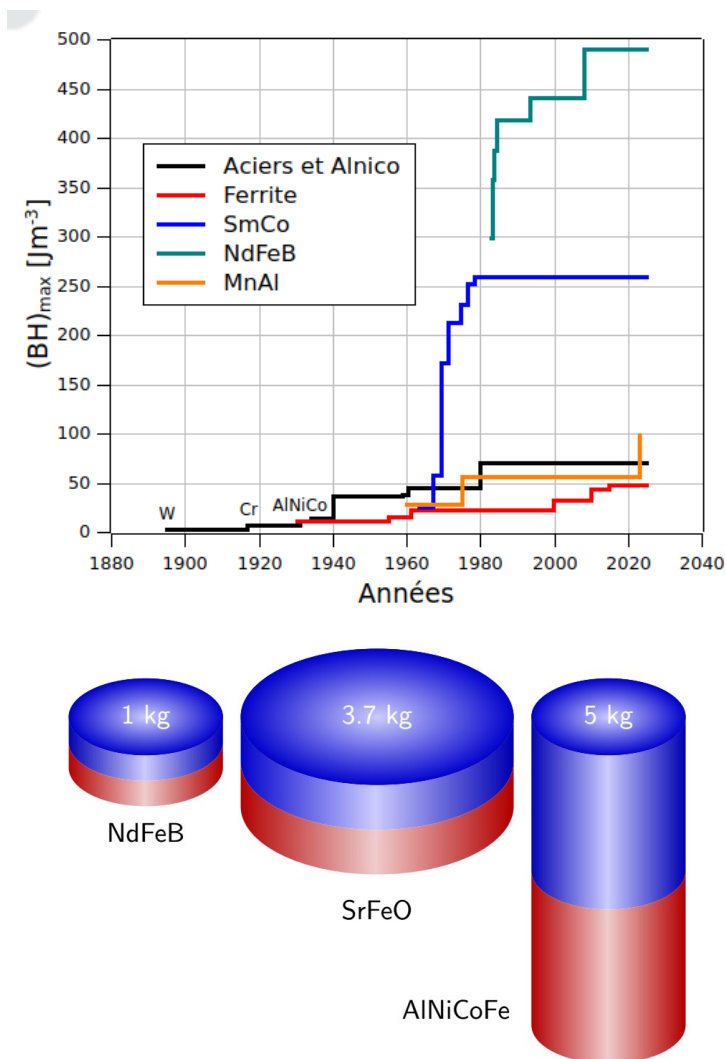


Figure 2.4 Évolution du facteur de mérite des aimants permanents dans l'histoire. Les cylindres représentent approximativement le volume et la forme de l'aimant en fonction de sa nature à fonction égale, selon les données de (Coey, 2012), complétées pour ce rapport.

2.1.1.3 En quoi les terres rares sont-elles nécessaires dans les aimants permanents ?

Comme tout matériau magnétique, la première propriété d'un aimant permanent est d'avoir une aimantation importante à température ambiante. Cette condition signifie qu'ils doivent contenir une forte proportion d'éléments ferromagnétiques à température ambiante, à savoir fer, cobalt et nickel. Seuls quelques composés de manganèse échappent à cette règle. La seconde condition est d'avoir un champ coercitif élevé (de l'ordre de grandeur de l'aimantation.) Cette caractéristique est liée à des propriétés extrinsèques du matériau (taille et orientation des cristallites) et aux propriétés intrinsèques de la phase, l'aimantation et la constante d'anisotropie. Pour simplifier, cette constante représente le couple nécessaire pour tourner l'aimantation de sa direction naturelle vers la direction perpendiculaire (en quelque sorte la raideur d'un ressort de torsion). Historiquement, l'origine de cette anisotropie magnétique était liée à la forme des cristallites (c'est le cas pour les Alnico), mais pour les bons aimants, elle est d'origine magnétocristalline. L'anisotropie magnétocristalline a pour origine le couplage entre les orbitales électroniques et le réseau cristallin alors que le ferromagnétisme provient d'un couplage entre

spins d'atomes voisins (le spin est le moment propre à l'électron). Comme le spin est couplé à son orbitale, il est indirectement couplé au réseau. Cependant, dans les métaux de transition 3d (principalement fer, nickel, cobalt) le moment orbital est nul en raison de la participation des électrons 3d à la liaison. Il en résulte que seules les terres rares présentent un couplage spin-orbite fort du fait que le moment magnétique est porté par les électrons 4f qui sont des électrons écrantés par ceux des orbitales 5s et 5p, c'est-à-dire qu'ils sont comme isolés de l'extérieur. En d'autres termes, dans la compréhension actuelle du ferromagnétisme, il n'est physiquement pas possible d'obtenir des aimants sans terres rares aussi performants que ceux qui en contiennent. Toutes les alternatives aux terres rares ne peuvent présenter que des performances inférieures du fait qu'elles auront soit une aimantation, soit un champ coercitif plus faible.

2.1.1.3.1 Les aimants du marché : aperçu historique

Au début de l'industrie électrique, les matériaux magnétiques se divisaient en deux catégories : les aciers mécaniquement doux à faible taux de carbone et les aciers mécaniquement durs à fort taux de carbone. Du fait que les aciers doux présentent une forte perméabilité et une faible rémanence et les aciers durs une faible perméabilité et une forte rémanence, les aimants permanents sont dits magnétiquement durs. Les aimants en acier ne sont plus utilisés que pour des applications marginales (aimants pour épingles de couture, par exemple).

En 1935, est apparue une nouvelle famille d'aimants à base de Al-Ni-Co-Fe, ordinairement connus sous le nom d'Alnico, qui s'est développée jusque dans les années 60. Compte tenu de leur relativement faible champ coercitif et de leur haute teneur en cobalt (24 à 36%), ils ne sont aujourd'hui utilisés que dans des domaines spécifiques à haute température (c'est l'aimant qui présente le plus haut point de Curie, soit 860°C) ou dans des applications particulières (micros de guitare électrique, par exemple). Ces aimants, sont limités à $(BH)_{max} = 80 \text{ kJm}^{-3}$ et sont sujets à la désaimantation par leur propre champ démagnétisant, ce qui impose de les utiliser sous une forme allongée qui contraint la conception des systèmes.

Dérivés d'un minéral nommé magnétoplombite, les hexaferrites de baryum $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ sont apparues en 1955. Pour la première fois, le mur de la forme a été franchi, ce qui signifie que, quelle que soit sa forme, l'aimant ne se démagnétise pas lui-même. En d'autres termes, son champ démagnétisant est toujours plus faible que son champ coercitif, car $\mu_0 H_{ci} > B_r$. De plus, ils présentent un point de Curie assez élevé (450°C). Aujourd'hui, le baryum a été remplacé par le strontium, plus abondant et donnant un champ coercitif légèrement plus élevé. Au milieu des années 2000, une proportion molaire de cobalt d'environ 0,3 par formule unitaire est substituée au fer et la charge est compensée par une substitution du strontium par le lanthane (La). Celui-ci n'est présent qu'à 4% de la masse, ce qui compte tenu de l'abondance de l'élément pose beaucoup moins de problèmes que le Co. Ces aimants sont limités à $(BH)_{max} = 50 \text{ kJm}^{-3}$ (pour les nuances substituées La-Co) mais restent les moins chers du marché et les plus faciles à utiliser.

Les premiers APTR sont apparus sur le marché au tournant des années 60-70 sous la forme de SmCo_5 (phase 1 :5) frittés. Ils ont constitué une vraie révolution du fait d'un gain de facteur 2 sur le produit d'énergie. Cinq ans plus tard, les $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ (phase 2 :17) atteignaient $(BH)_{max} = 250 \text{ kJm}^{-3}$. Avec un champ coercitif $\mu_0 H_{ci} > 2,5 \text{ T}$, et un point de Curie de 830°C, ils sont pratiquement impossibles à démagnétiser. Ces caractéristiques en font le matériau indispensable pour les applications à haute température en particulier dans l'industrie pétrolière ou aéronautique. Néanmoins, le niveau élevé et la volatilité du cours du cobalt restent un frein pour les applications grand public.

Le $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (phase 2 :14 :1), connu sous le nom de Néomax, est apparu au début des années 80, présente le produit d'énergie le plus élevé connu, et pour certaines nuances la meilleure dureté. Néanmoins leur point de Curie en dessous de 350°C ne permet pas de les utiliser au-dessus de 120°C. Un dopage de terres rares lourdes, du Dy principalement, est indispensable pour rester efficace aux

températures usuelles des applications industrielles, jusqu'à 150°C, voire 230°C pour les nuances les plus riches en Dy. En principe, le Nd constitue 27% de la masse de la phase 2-14, mais il faut noter que pour des raisons métallurgiques et pour optimiser le champ coercitif la proportion est montée à environ 32% dans la plupart des produits industriels.

Tableau 2-2 Quantité d'ETR dans les principaux alliages intermétalliques ferromagnétiques durs. R est un ETR, M un métal de transition du groupe fer.

Phase	Formule type	% at. d'ETR	% mass. d'ETR
1:5	RM_5	17	33
2:14:1	$R_2M_{14}B$	13	26
2:17	$R_2M_{17}(N)$	11	23
1:12	$RM_{12}(N)$	8	17

Le Tableau 2-2 résume les 4 structures cristallographiques connues d'alliages intermétalliques ferromagnétiques durs. Les éléments R ou M peuvent être partiellement voir complètement substitués dans certains cas par rapport aux compositions canoniques par des éléments du même groupe. Le pourcentage massique d'ETR peut varier du simple au double.

Bref historique des aimants permanents

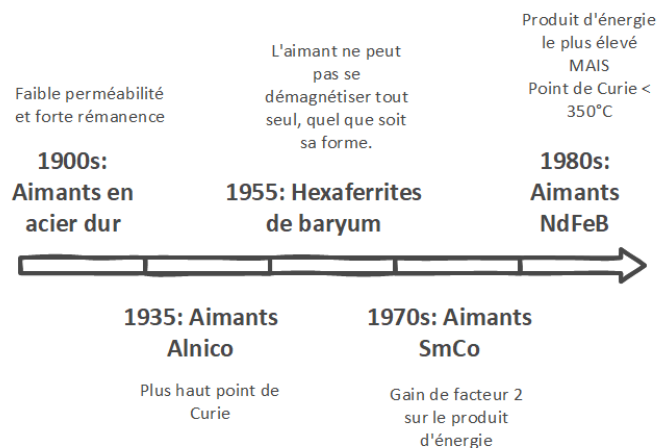


Figure 2.5 Bref historique des aimants permanents

Au vu de ce panorama, on peut constater qu'à partir du moment où l'on exclut le cobalt, il reste un espace considérable en termes de produit d'énergie entre les hexaferrites et les néomax ($Nd_2Fe_{14}B$), ce que J.M.D. Coey a nommé un « gap » (Coey, 2012), les aimants qui se situent dans cet espace intermédiaire sont maintenant désignés par le terme *gap magnet*.

2.1.1.3.2 Réduction de la consommation de terres rares pour les aimants permanents

Classe	M	H	SH	UH	EH	AH
Temp. utile	100	120	150	180	200	220
Dy (%)	1	3	5	7,5	10	11,5

Figure 2.6 Classe de température des aimants et pourcentage de Dy nécessaire dans le cas d'une substitution (diviser approximativement par 3 pour la diffusion) d'après (McCallum et al., 2014).

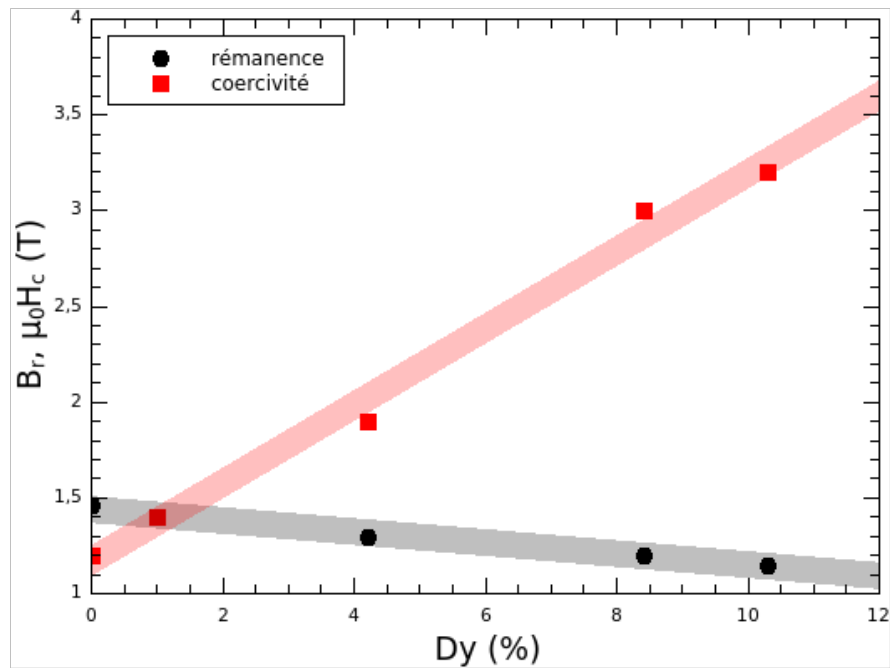


Figure 2.7 Effet de la substitution de dysprosium sur la rémanence et le champ coercitif du NdFeB. Données issues de (Vasilenko et al., 2022)

2.1.1.3.2.1 Réduction des terres rares lourdes dans le NdFeB

Comme il a été dit, le principal problème des aimants NdFeB est leur point de Curie relativement bas. Bien sûr, peu d'applications atteignent ces températures, mais cela signifie que le champ coercitif va rapidement baisser au-dessus de l'ambiante avant de s'annuler au point de Curie.

Pour les températures excédant 80°C, ce qui correspond au cas des usages dans les secteurs de l'énergie et des transports, les additions de terres rares lourdes sont donc nécessaires. La substitution du Nd par du Dy (éventuellement du Tb) à hauteur de 0 à 30% des ETR — soit entre 0 et 10% de la masse totale (McCallum et al., 2014) — permet d'augmenter à la fois le point de Curie et le champ coercitif (jusqu'à 3 fois). Ces deux effets concourent à augmenter la température d'usage jusqu'à 230°C au prix d'une baisse de l'aimantation rémanente, ce qui engendre une diminution linéaire du $BH_{\max}$ 400 à 250 Jm⁻³ (D. N. Brown et al., 2014).

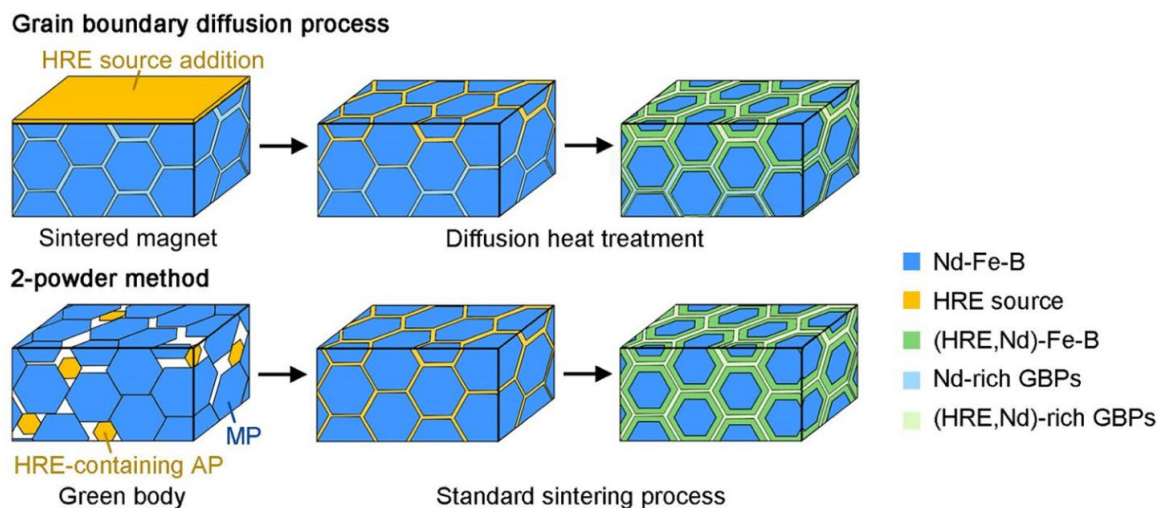


Figure 2.8 Comparaison des procédés de diffusion par la surface et par la méthode des 2 poudres (Opelt et al., 2024). Sous licence CC-BY.

Le problème de cette substitution tient principalement à l'augmentation du prix de l'aimant en raison du prix du Dy. Cependant, les études scientifiques ont montré que le principal bénéfice de cette substitution est sa forte concentration dans les joints de grain, ce qui réduit le couplage entre grains et conduit à une augmentation du champ coercitif. Dès lors, la présence de Dy dans la phase n'est pas en soi nécessaire, le Dy peut être introduit dans les joints de grains uniquement ou être remplacé par d'autres éléments. Pour ce faire, il existe trois méthodes (ci-dessous).

2.1.1.3.2.1.1 Infiltration du Dy ou du Tb post-frittage

L'infiltration consiste à recuire un aimant sans ETR lourd entre deux couches d'un alliage eutectique à base de dysprosium (Dy-Cu par exemple). Cette technique permet une réduction de 4% du contenu total en ETR lourd pour les mêmes performances. Néanmoins la diffusion est limitée à quelques mm de profondeur et ne peut donc être utilisée que pour de petits aimants. En laboratoire, le gain sur le champ coercitif peut dépasser 50%, le procédé transféré vers l'industrie vers 2015, montre généralement des performances plus limitées + 20% de H_c . Récemment, l'infiltration d'un eutectique (un alliage à basse température de fusion) pauvre en Tb de type $Tb_{10}Pr_{90-x}(Cu,Al,Ga)_x$ a montré la possibilité de doubler le champ coercitif par rapport à l'aimant de départ (T. Wu et al., 2023). La déposition électrophorétique de DyF_3 ou TbF_3 est un procédé également intéressant pour favoriser la diffusion (Soderžnik et al., 2012, 2016), avec un résultat de +37% de champ coercitif, mais l'économie en ETR lourd n'est pas précisée.

2.1.1.3.2.1.2 Modification des joints de grains par la méthode des poudres

Afin de permettre la diffusion des ETR lourds au cœur de l'aimant quelle que soit sa taille, une méthode très simple consiste à introduire l'eutectique (avec et même sans ETR lourds) sous forme d'une poudre plus fine que celle de la phase $Nd_2Fe_{14}B$ en amont du frittage. Cette méthode a également l'avantage de ne pas rajouter d'étapes dans le procédé puisque l'ETR lourd est introduit dans le mélange avant le frittage. La littérature rapporte un grand nombre de méthodes pour introduire l'ETR lourd, par exemple :

- le mélange d'une poudre de NdFeB avec 0 à 3% m. d'un eutectique Dy-Fe, donne +60% de H_c ,

- le Dy-Ni (3% m.) permet en partant d'un alliage stœchiométrique (27% m. de Nd) de restructurer la phase intergranulaire et d'obtenir un champ coercitif dépassant 1,6 T (X. Liu et al., 2014),
- le mélange avec 2.5% de Tb₄O₇, donne H_c + 38% et Br -6% (Fu et al., 2020).

Ce même procédé a aussi été employé pour modifier le joint de grains sans ajouter d'ETR lourd en diffusant simplement des ETR légers en excès voir des ETR moins critiques ou d'autres éléments. Une performance intéressante a été obtenue avec un mélange d'une poudre riche en Pr(CuCo) avec NdFeB puis frittage (Salazar et al., 2018) et le champ coercitif a atteint la valeur de 2,5 T qui est assez proche des meilleurs résultats avec le Dy. Une autre étude a montré que l'on peut combiner l'introduction de Ce en excès dans la maille cristalline en ajoutant du Ce₈₅Al₁₅ puis en diffusant du Pr en ajoutant une poudre de Pr₇₀Cu₁₅Al₁₅ avant frittage. Avec cette double diffusion sans ETR lourd, le champ coercitif atteint 2 T à température ambiante (Wong et al., 2023).

Substituabilité des ETR : La modification des joints de grains avec des éléments autres que des ETR agit avec un mécanisme d'aimantation légèrement différent. Ici ils agissent comme une couche de découplage qui réduit les interactions magnétostatiques et d'échange entre les grains, un principe a priori moins efficace, mais sans ETR. Le Ga a souvent été utilisé à cet effet, par exemple sous forme d'un alliage CuAlGaTi. Le Ti favorise l'homogénéité du joint de grain et réduit la taille de grain (X. D. Xu et al., 2019) ce qui permet finalement un gain de +20% sur H_c. L'addition de 0,6% de Ga dans un alliage en excès d'ETR léger (+3% Nd, Pr) produit une phase de stœchiométrie 6:13:1 à faible aimantation qui agit de la même façon. H_c augmente fortement (+50%), mais en retour B_r baisse de 13% (Enokido et al., 2016; E. Wang et al., 2021) ce qui diminue le produit BH_{max} de 25%. Cependant, le Ga reste un élément cher, aussi est-ce intéressant d'obtenir le même effet avec des éléments abondants. Par exemple, la diffusion d'Al par mélange avec une nanopoudre d'Al donne +11% sur H_c et -3% sur B_r (Z. Duan et al., 2022), un effet similaire à la diffusion par une couche d'Al (W. Chen et al., 2019) ou une couche de ZnO (E. Wang et al., 2021), mais avec une pénétration plus profonde qui donne jusqu'à +20% de H_c.

2.1.1.3.2.1.3 Procédés de déformation à chaud

Les procédés de déformation à chaud s'appliquent après frittage de l'aimant, il s'agit en général d'un pressage uniaxial à chaud soit dans un moule de même taille que la pièce frittée soit dans un moule plus grand (procédé dit « die upset »). Il permet une amélioration de la texture cristallographique, ce qui améliore soit le champ coercitif pour le premier procédé, soit la rémanence pour le second d'après certains auteurs (D. N. Brown et al., 2014), voire les deux selon d'autres travaux (Hioki, 2021, 2023). Le procédé SPS (spark plasma sintering) a également été utilisé dans ce but avec des résultats également contrastés. Certains auteurs ont obtenu un champ coercitif très faible (Tomse et al., 2020) et d'autres ont obtenu +14% en utilisant le SPS comme une méthode de solidification, mais pas de densification, cette dernière étant obtenue par « die upsetting » (Castle et al., 2017).

2.1.1.3.2.2 Substitution du Nd par des terres rares moins critiques

Dans l'industrie, la substitution partielle du Nd par le Pr est courante, d'autres éléments sont ajoutés pour améliorer le frittage et la structure des joints de grains — par exemple Nd_{21,5}Pr_{7,8}Fe_{68,5}B₁Al_{0,1}Cu_{0,2}Zr_{0,3}Co_{0,5}Ga_{0,1} (T. Wu et al., 2023) — sans modification sensible des propriétés par rapport à un aimant avec seulement du Nd. Compte tenu de son abondance, la substitution par le Ce a été étudiée. La phase Nd₂Fe₁₄B peut être obtenue jusqu'à substitution complète, mais le champ coercitif baisse linéairement avec le taux de Ce jusqu'à -70% (Z. B. Li et al., 2015), ces aimants ne pourraient donc constituer qu'une alternative de basses performances. Dans la même idée de réduction de coût, l'utilisation du mischmetal, un mélange d'ETR non séparés (Ce, La, Nd, Pr dans des proportions de l'ordre de 50, 25, 15, 5 plus d'autres ETR en faibles concentrations), permet aussi d'obtenir des

aimants, mais de propriétés réduites. La substitution à 100% conduit à -20% sur B_r et -60% sur H_c (R. Li et al., 2017).

2.1.1.3.2.2.1 Développement de phases moins riches en terres rares

La phase 1:5, celle des premiers APTR commercialisés, est plus riche en terres rares, mais peut devenir intéressant si elle utilise un ETR non-critique. Dans cette direction des alliages $Y(\text{Co-Fe})_5$ ont été obtenus avec un bon potentiel ($B_r=1$ T, $BH_{\text{max}}=140$ kJm⁻³), mais avec 4,8 Co (Tozman et al., 2015) ce qui anéantit l'avantage économique de réduction des ETR, aussi ce sujet a-t-il été rapidement abandonné.

La phase 2-17 permet une réduction sensible de la masse d'ETR mais elle contient elle aussi beaucoup de cobalt. La substitution par le Fe est possible, mais la phase est peu stable et se décompose facilement en formant la phase 1:7 qui est paramagnétique. La stabilisation du $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ est possible par nitruration (Coey & Sun, 1990), mais l'azote désorbe rapidement aux températures d'usage des aimants et l'alliage se décompose. Quelques additions permettent d'améliorer la stabilité, mais les performances ne sont pas compétitives, le champ coercitif reste inférieur à 0,5 T pour une aimantation d'environ 1 T.

La phase 1:12 a fait l'objet de nombreuses recherches depuis la crise des ETR en 2011 du fait qu'elle est la phase intermétallique magnétique qui contient le moins d'ETR. Typiquement composée de Sm et Fe, elle permettrait d'utiliser un ETR moins critique et pas de cobalt. Son aimantation peut être importante (1 à 1,5 T), la constante d'anisotropie peut être comparable à celle du NdFeB, mais le champ coercitif est généralement faible (Hadjipanayis et al., 2020) et elle est difficile à stabiliser. Elle peut être obtenue sous forme de poudre, mais se décompose au frittage ce qui fait qu'on ne peut pas faire d'aimant dense pour le moment. Certaines compositions $(\text{SmCeZr})\text{Fe}_{10}\text{Si}_2$ (Gabay & Hadjipanayis, 2017) ont un champ coercitif assez élevé (jusqu'à 1 T), mais avec une aimantation rémanente sous 1 T et un produit d'énergie de 80 kJm⁻³ (Gabay & Hadjipanayis, 2018). L'alliage $(\text{Sm}_{0.8}\text{Gd}_{0.2})(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{11.25}\text{Ti}_{0.75}$ c'est révélé plus performant que le NdFeB au-delà de 80°C, mais contient un ETR lourd, du Co et ne peut être fritté (Tozman et al., 2021). Une technique de frittage rapide a été expérimentée sur le $(\text{Nd-Zr})\text{Fe}_{10}\text{Si}_2$, la décomposition est moins importante, mais elle n'est pas complètement évitée (Barandiaran et al., 2019).

2.1.1.3.2.2.2 Développement de phases sans terres rares

La solution définitive pour réduire la consommation d'ETR serait de disposer d'aimants sans ETR. Il en existe sur le marché depuis des décennies, mais ils ont bien évidemment des performances très nettement en dessous de celles des APTR, typiquement moins de 100 kJm⁻³. Comme il a été dit, la seule solution sans ETR serait de viser des performances entre cette valeur et celles des NdFeB (Coey, 2012). Les différentes solutions envisagées dans la littérature sont décrites dans cette section.

2.1.1.3.2.2.3 Alliage tétragonal MnAl

La phase tétragonale MnAl (équiatomique) a été découverte en 1958 au Japon. Son potentiel en tant qu'aimant permanent a tout de suite été identifié, mais l'instabilité de cette phase a été un obstacle à son développement. Plus tard, il a été constaté que l'insertion de carbone dans la maille à hauteur de 1 à 2% stabilise grandement la phase et un consensus autour $\text{Mn}_{54}\text{Al}_{45}\text{C}_1$ est apparu. Le second problème à résoudre a été celui de du champ coercitif. En effet celui-ci est beaucoup plus faible que ce qui est attendu d'après son aimantation et sa constante d'anisotropie magnétocristalline, voire par exemple (Mazaleyrat, 2022). En 1977 les chercheurs de Matsushita ont obtenu un produit d'énergie de 56 kJm⁻³ par extrusion avec $B_r=0,61$ T ; $\mu_0 H_c=0,3$ T, puis cette voie a été abandonnée avec l'apparition des premiers SmCo_5 . Le sujet est revenu en vogue vers 2011, mais à ce jour cette valeur n'a pas été reproduite, le meilleur résultat récent n'est que 43 kJm⁻³ (Jia et al., 2023, Ligne 10). L'aimantation à saturation peut

atteindre 0,72 T et le champ coercitif 0,5 T, deux valeurs potentiellement intéressantes pour des applications à faible valeur ajoutée, mais pas simultanément (Sirisathitkul, 2020) ce qui montre à quel point la maîtrise de ce matériau est complexe. Le faible champ coercitif est expliqué par la présence de défauts cristallins - les macles (Jia et al., 2023, Ligne 10) — elles peuvent être supprimées par la substitution de 1% Ti, mais le champ coercitif est inchangé (Keller et al., 2024).

2.1.1.3.2.2.4 Autres alliages de manganèse

Parmi les autres alliages magnétiques de Mn, beaucoup sont plutôt doux (MnSb, MnAs, Heusler,...) le plus dur est le MnBi. Il est beaucoup moins difficile à obtenir que le MnAl au moins sous la forme de poudre. Les résultats de la littérature sont assez contrastés, le champ coercitif semble dépendre fortement de la stœchiométrie et du procédé d'élaboration. Certains auteurs obtiennent un faible champ coercitif à l'ambiante (moins de 0,2 T), mais qui augmente très vite avec la température (plus de 1,5 T à 200°C). La substitution de Sn permet d'augmenter H_c à l'ambiante (près de 0,5 T) en gardant la tendance à augmenter avec la température. L'optimum de substitution du Bi est autour de 0,1Sn (compromis H_c vs B). Peut être texturé par recuit sous champ magnétique, $BH_{max}=114 \text{ kJm}^{-3}$ pour recuit sous 4T (W. Zhang et al., 2019). D'autres auteurs ont obtenu des champs coercitifs de plus de 1 T à l'ambiante sur des alliages en excès de Mn et près de 150 kJm^{-3} , mais uniquement sur des poudres (B. A. Jensen et al., 2019) ce qui pose question sur la sincérité du chiffre annoncé. La densification de cet alliage reste problématique en raison de la précipitation de la phase Mn_3Bi qui n'est pas ferromagnétique. Compte tenu de ce problème et du fait que le Bi est classé critique par l'UE depuis 2017, le MnBi peut difficilement être envisagé comme une alternative aux APTR.

Le nitrure de manganèse Mn_4N a été identifié comme phase ferromagnétique dure. Il a été synthétisé en couches mince et présente des performances potentiellement élevées (1 T de saturation et 0,44 T de champ coercitif), mais comme la plupart des nitrures ferromagnétiques, il n'a jamais été synthétisé en massif (Suemasu et al., 2021).

2.1.1.3.2.2.5 Tétrataénite

Les alliages Fe-Ni sont bien connus pour leur extrême douceur, ils sont utilisés dans de nombreuses applications pour leur très haute perméabilité, en particulier autour de $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$, ou pour leur excellent compromis aimantation-perméabilité pour l'alliage équi-atomique. En principe ces alliages sont produits dans l'état désordonné. Lorsque l'alliage équi-atomique s'ordonne, il opère une transition de phase depuis cubique face centrée à tétragonal. Cette phase appelée tétrataénite peut se trouver dans les météorites (Lewis et al., 2014), mais ne peut être obtenue par la voie métallurgique classique. Des calculs thermodynamiques indiquent que pour s'ordonner la vitesse de refroidissement nécessaire serait de l'ordre de 1 K par millénaire. La seule voie crédible pour le moment est celle de la dénitruration de FeNiN (Goto et al., 2017). Les valeurs obtenues sont intéressantes, $B_r=0,73 \text{ T}$; $M_s>1,43 \text{ T}$; $\mu_0 H_c=0,18 \text{ T}$, la phase est obtenue à plus de 95%, mais le procédé de nitruration est assez complexe. Les produits BH restent modestes (48 kJm^{-3} soit celui des meilleurs ferrites), mais étant isotrope, un gain d'un facteur 2 pourrait être envisagé si l'on trouve un moyen de les texturer fortement, mais là encore, la performance annoncée est calculée dans l'hypothèse où le matériau serait densifié, alors que rien n'indique que le frittage est possible.

2.1.1.3.2.2.6 Alliages à base de cobalt

Le cobalt a un cours très volatile dépendant beaucoup des événements géopolitiques dans la région du fleuve Congo. Après un pic à 90\$/kg en 2018 et à 80\$ début 2022, le cours début 2025 était proche de son plancher historique de 23 \$, avant de se restabiliser autour de 35\$ puis subir une nouvelle

croissance (45€ début 2026). L'incertitude sur le prix variant de 1 à 4 et sur les approvisionnements est rédhibitoire selon des experts de l'industrie automobile sauf dans le cas où il est indispensable (températures supérieures à 250°C)

Le principal alliage magnétique dur à base de cobalt est un alliage commercial ancien (voir § 1.2.1.4), il ne fait l'objet d'aucune recherche actuellement et ne peut remplacer les APTR du fait de son faible champ coercitif. Des alternatives plus dures ont été étudiées, Co-Zr et Co-C, mais sans démontrer de réelle potentialité. Le seul résultat intéressant du point de vue des propriétés est celui obtenu avec des nano-fils de cobalt orientés dans un liant (Ener et al., 2018), mais le procédé est difficilement industrialisable et ils sont moins performants que les Sm-Co qui utilisent moins de Co et un ETR non critique. Les nano-fils de cobalts ont été également utilisés dans des nanocomposites Co/TR avec des résultats peu probants (Q. Wu et al., 2021).

2.1.1.3.2.2.7 Ferrites La-Co

Depuis le début des années 60, les propriétés des ferrites de baryum ont été graduellement améliorées. Le Ba a été remplacé par le Sr et les procédés de texturation ont permis d'atteindre une rémanence de presque 0,5 T. Le champ coercitif a été grandement amélioré au début des années 2000 par la substitution La-Co. En fait, l'élément important est surtout le Co^{2+} qui, substitué au Fe^{3+} , va par son fort couplage spin-orbite augmenter significativement l'anisotropie magnétocristalline et par suite le champ coercitif. Ce dernier atteint 0,5 T et le produit d'énergie est de presque 50 kJm^{-3} . Le La^{3+} est utilisé pour compenser les charges électrostatiques, il se substitue facilement au Sr^{2+} , car son rayon ionique est très proche. La problématique ici n'est donc pas de limiter l'utilisation du La mais de limiter celle du Co. La nano-structuration est une alternative possible, le champ coercitif est aussi élevé qu'avec La-Co, mais pour le moment seul des aimants isotropes ont été fabriqués et leur produit d'énergie (Mazaleyrat et al., 2011).

2.1.1.3.2.2.8 Nanocomposites doux/durs

Après les travaux théoriques de Coey et Skomsky au début des années 90 (Skomski & Coey, 1993) qui suggéraient la possibilité pour le produit d'énergie d'atteindre 800 kJm^{-3} , l'idée d'exploiter le couplage entre une phase dure et une phase douce de forte aimantation pour tirer le meilleur parti des propriétés des deux matériaux a été abondamment étudiée. Dans la littérature, le composite Fe/NdFeB est le plus étudié, souvent le comportement n'est pas magnétiquement monophasique et n'apporte aucune amélioration. Certains auteurs ont eu des résultats plus probants, mais la rémanence et le champ coercitif sont très en dessous des attentes (Turgut et al., 2016). La seule expérience concluante trouvée dans le corpus concerne un nano-composite SmCo/Fe-Co qui approche les propriétés du SmCo 2 :17 avec -4% de Sm et -14% de cobalt (X. Li et al., 2017).

2.1.1.3.2.2.9 Nitrure de fer

Le nitrure de fer dans la phase cubique $\alpha''\text{Fe}_{16}\text{N}_2$ est connu depuis près de 100 ans, il a été découvert pour la première fois en tant que phase très minoritaire dans l'acier de boîtes de conserve. Son aimantation, 2,9 T à température ambiante, est la plus forte connue à ce jour, mais cette phase est très difficile à obtenir autrement qu'en phase minoritaire diluée dans d'autres nitrures de fer doux ou paramagnétiques. Le sujet refait surface périodiquement, mais les données sont peu fiables et souvent contradictoires (J. Wang et al., 2018). Récemment, des procédés de nitruration de nano-poudre ont permis d'obtenir la phase quasiment pure, mais il est impossible de la fritter sans la décomposer. Compte tenu de la forte aimantation, la réalisation d'aimants liés est possible tout en conservant une rémanence assez forte. Les projections faites à partir des constantes physiques mesurées donnent des valeurs de

produit d'énergie équivalent à celui des premières générations de NdFeB, environs 280 kJm^{-3} et un champ coercitif de 0,35 T (J.-P. Wang, 2020), mais les seules expériences fiables sur le même type de matériau contredisent ces calculs, le champ coercitif ne dépassant pas 0,22 T et le BH_{max} est largement sous les 100 (Dirba et al., 2017). Néanmoins, une amélioration sensible de ces résultats offrirait une solution viable entre ferrites et NdFeB pour certaines applications, dans la mesure où le coût des éléments est extrêmement bas.

2.1.1.3.2.2.10 Recherche de nouvelles phases

Depuis quelques années, la simulation et l'intelligence artificielles sont utilisées pour rechercher de nouvelles phases magnétiques dures. Ces travaux sont essentiellement basés sur des calculs dits *ab initio*, basés sur la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) qui permet de calculer la structure électronique d'un cristal et d'en déduire les propriétés. Comme ces calculs sont valides à au zéro absolu seulement, on utilise généralement la méthode de Monte-Carlo pour thermaliser et obtenir les propriétés à l'ambiante.

L'IA peut être utilisée pour rechercher les phases stables sans ETR (par exemple des réseaux de neurones pour générer des diagrammes de phase) puis la DFT permet de sélectionner les phases de plus basse énergie et calculer l'aimantation à saturation (M_s), la température de Curie (T_c) et la constante d'anisotropie (K) (Sakurai et al., 2020). Parmi les phases prédites, certaines étaient déjà connues, les propriétés prédites étaient assez proches pour M_s et T_c , plus dispersées pour K . Le même type de dispersion a été observé pour le calcul de constantes de phases 1:12 connues (Erdmann et al., 2023). Au final, parmi de très nombreux articles sur le problème, quelques résultats intéressants peuvent être signalés :

- Fe₄CoSi, avec 1,44 T et 400 Jm^{-3} à température ambiante, cet alliage serait directement concurrent du NdFeB (Siraj Ul et al., 2024) ;
- Fe₃MnC₂, sans éléments critiques, est censé avoir M_s et H_c environs 1T (Ul Haq et al., 2023), mais il n'a pas encore été synthétisé ;
- dans le système Fe-Co-B, 7 phases inconnues ont été prévues par le calcul, une, Fe₃CoB₂ a pu être synthétisée. L'aimantation à saturation est plus faible que prévue (1,1 T à 10 K au lieu de 1,4), mais le matériau est plutôt doux, son champ coercitif n'est que de 22 mT (Xia et al., 2022).

En général, on trouve beaucoup de simulations et très peu de synthèses, la plupart des matériaux prévus n'étant pas stables. Pour le moment cette méthode n'a pas fait émerger de matériau magnétique dur crédible.

2.1.1.3.2.3 Autres matériaux magnétiques à base de terres rares

2.1.1.3.2.3.1 Matériaux magnétocaloriques

La réfrigération magnétique (ou inversement la pompe à chaleur magnétique) repose, comme la réfrigération classique, sur un changement de phase. Le point de Curie caractérise le changement d'un état magnétique ordonné vers un état magnétique désordonné auquel un changement d'entropie est associé (Almanza et al., 2023). Comparativement à la transition liquide/gaz, la variation d'entropie est beaucoup plus faible, mais le rendement global de la machine associée est théoriquement plus élevé, notamment du fait de l'absence d'efforts mécaniques. Historiquement, les réfrigérateurs magnétocaloriques ont été basés sur le Gd pur qui combine un fort moment magnétique et un point de Curie près de l'ambiante. Après la crise de 2011, beaucoup de travaux ont été menés en vue de réduire la quantité d'ETR dans les matériaux magnétocaloriques et d'augmenter la variation d'entropie. Deux familles de matériaux ont émergé, (Fe, Mn)₂(P,Si) sans terres rares et La(Fe, Si)₁₃ du fait de leur point de Curie proche de l'ambiante et de l'absence d'éléments critiques dans leur composition (Almanza et al.,

2023). Cependant, les machines magnétocaloriques utilisent une quantité importante d'aimant NdFeB pour produire le champ magnétique, même sans ETR lourds ce facteur est limitant du fait que les aimants ne sont pas substituables compte tenu du champ nécessaire pour fonctionner efficacement (de l'ordre du tesla), à moins d'utiliser des aimants recyclés (Benke et al., 2020). La littérature rapporte de nombreuses alternatives, mais soit à performances moindres (Ipus et al., 2011; Sharma et al., 2018), soit contenant des éléments rares ou stratégiques (Y. G. Shi et al., 2017; Venkatesan et al., 2021). Pour le moment seul le LaFeSi a fait l'objet d'un développement industriel (notamment avec ajout de Mn et hydruration), mais la crédibilité des entreprises qui proposent des machines basées sur ce principe n'est pas évaluable.

2.1.1.3.2.3.2 Matériaux magnétostrictifs

Les applications des matériaux magnétostrictifs se divisent principalement en deux catégories : les capteurs et les transducteurs. Concernant les capteurs, les matériaux les plus utilisés sont des amorphes à base de fer, plus particulièrement avec des compositions proches de $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$ et $\text{Fe}_{80}(\text{B},\text{Si})_{20}$ qui ont une forte constante de couplage magnéto-élastique en raison de leur nature vitreuse. Pour les transducteurs, la puissance d'émission acoustique étant liée à la déformation, un grand coefficient de magnétostriction (déformation relative de l'échantillon sous l'effet du champ magnétique) est recherché. Les matériaux les plus performants sont des alliages intermétalliques de type TbFe_2 , dits Terfenol, qui ont des coefficients de magnétostriction de l'ordre de 1 mm/m et jusqu'à 2,2 mm/m pour le Terfenol-D — $(\text{Tb}_{27}\text{Dy}_{73})\text{Fe}_2$ — alors que les amorphes ont des coefficients de magnétostriction de l'ordre 30 $\mu\text{m}/\text{m}$ au plus. Des alternatives existent comme l'Alfenol, avec un maximum de 105 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour environ $\text{Fe}_{80}\text{Al}_{20}$, et le Galfénol qui a un maximum de 240 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour une composition proche de $\text{Fe}_{70}\text{Ga}_{30}$ (Coey & Parkin, 2021) voire plus de 270 avec un dopage à l'étain de 1% (B. Chen et al., 2024).

Il faut noter que le suffixe nol signifie Naval Ordnance Laboratory (laboratoire de recherche de l'US Navy). L'usage principal des matériaux à magnétostriction géante (plus de 100 mm/m) est probablement celui des sonars destinés à détecter les sous-marins. On comprend donc que la littérature soit muette quant à la possibilité de substituer les Terfenols dans ces applications. Il est permis de supposer, compte tenu des volumes mis en jeu et de l'aspect stratégique de leur fonction, que la criticité du Tb et du Dy ne représente pas un obstacle. Des applications dans le domaine du nettoyage ultrasonique des bateaux ou des pipe-lines (N. Wang et al., 2016) sont également mentionnées dans la littérature, mais restent marginales.

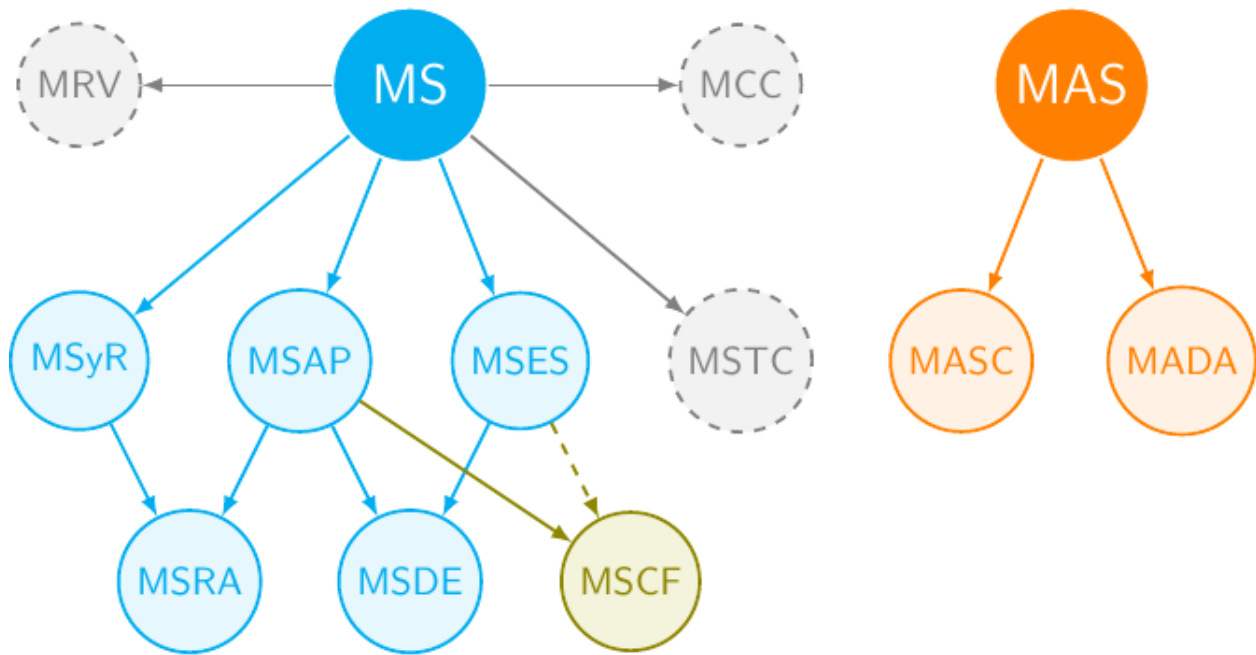


Figure 2.9 Classification des principales machines électriques pour la traction automobile et la production d'électricité. Les machines en gris ne sont pas ou plus au stade du développement.

2.1.1.3.3 Réduction de l'utilisation des aimants terres-rares dans la production d'énergie et les transports

Les machines électriques se répartissent en 4 secteurs industriels principaux, la production d'énergie, les transports, l'industrie et les applications domestiques.

Parmi les différents types de machines électriques, on distingue 2 principes, synchrone et asynchrone. La plupart sont des machines à flux radial avec l'inducteur au rotor et l'induit au stator et elles ont toutes le même stator à l'exception des machines à commutation de flux et de quelques machines obsolètes.

MSEB : machine synchrone à excitation bobinée, l'inducteur est bobiné, le flux magnétique est contrôlé par le courant d'excitation, nécessite des contacts tournants et produit des pertes Joule;

MADA : machine asynchrone à double alimentation, le flux est contrôlé par l'injection de courant au rotor, nécessite des contacts tournants ;

MASC : machine asynchrone à cage d'écureuil, l'excitation est produite par induction, très robuste, mais rendement limité ;

MSAP : machine synchrone à aimants permanents, le flux est produit par des aimants et fixé par construction ;

MSyR : machine synchro-réductante, pas d'excitation, le rotor est passif, le couplage se fait par la différence de réductance, mais le couple volumique est faible ;

MSRA : machine synchro-réductante assistée par aimants, augmente le couple par rapport à la MSyR et utilise moins d'aimants que la MSAP ;

MSDE : machine synchrone à double excitation, combine aimants et bobinages, utilise moins d'aimants que la MSAP, a un meilleur rendement que la MSES ;

MSCF : machine synchrone à commutation de flux, il s'agit fondamentalement d'un MSAP, mais de structure non conventionnelle leur rotor est passif, les aimants sont au stator (éventuellement substituables par des bobinages) et la double excitation est possible.

MCC : machines à courant continu, leurs piètres performances et le manque de robustesse les cantonnent au secteur domestique ou à des auxiliaires de petite puissance dans le secteur des transports ;

MRV : machines à réluctance variable, elles sont très simples à construire, mais peu performantes et bruyantes, elles ne sont plus aujourd'hui considérées pour les applications de traction ;

MSTC : machines synchrones supraconductrices à haute température critique, encore au stade de la recherche, il n'y a pas de consensus sur leur structure, se soit soit les MSES où le bobinage inducteur est fait en matériau supraconducteur, soit des MSAP où les aimants sont remplacés par des pastilles supraconductrices en mode permanent, pour le moment il est difficile de concevoir l'induit en conducteurs supra.

À titre de comparaisons les 4 types de rotors classiques sont représentés sur la Figure 2.11 les autres sont des variations typiques, parmi d'autres, de rotors à aimants trouvés dans la littérature et les applications.

2.1.1.3.3.1 Réduction de l'utilisation des aimants terres-rares dans la production d'énergie

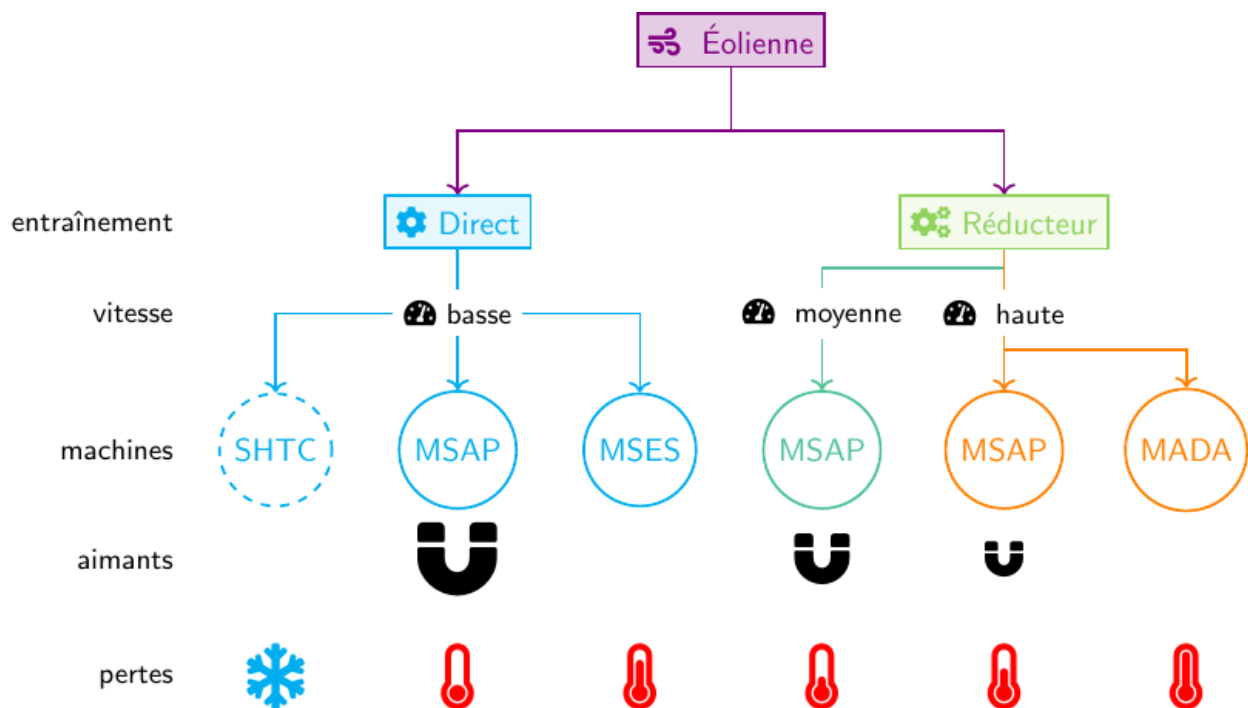


Figure 2.10 Différents types de générateurs utilisés pour les éoliennes. Les symboles qualifient qualitativement la quantité d'aimant et l'efficacité énergétique à puissance égale.

Dans le secteur de la production d'énergie, les machines synchrones à excitation séparée sont hégémoniques depuis plus de 100 ans. En effet, la stratégie de production centralisée en réseau synchrone impose un réglage de puissance à vitesse fixe qui ne peut se faire que par la variation de l'excitation. De plus, cette stratégie repose sur des centrales thermiques dotées d'alternateurs de puissance unitaire très élevée, jusqu'à 1,5 voire 2 GW. À ces niveaux de puissance, le rendement est si

élevé (~99%) que l'utilisation d'aimants permanents n'apporterait que des difficultés de construction et d'exploitation. La production décentralisée basée sur le photovoltaïque et les éoliennes change totalement le paradigme. Au départ, les éoliennes étaient directement connectées au réseau donc seules des MSES et MADA pouvaient être utilisées. Avec le développement de la production décentralisée en unités plus petites et la fluctuation des sources renouvelables, la connexion directe au réseau n'est plus systématiquement privilégiée. L'électronique de puissance permet d'injecter l'énergie en synchronisme avec le réseau et à la tension voulue quel que soit la nature de la source et les fluctuations de production, dès lors les éoliennes peuvent être excitées par des aimants.

Le gain sur la masse du générateur permet de réduire la masse et le coût de l'infrastructure. Cette solution est privilégiée pour les projets d'éolienne en mer pour les raisons évoquées plus haut et parce que le transport sous-marin en alternatif n'est pas possible à cause des courants de fuites capacitifs.

Concernant la réduction ou la substitution des APTR dans les éoliennes, aucune solution n'est proposée dans le corpus étudié sur la base de machines conventionnelles. Une étude de 2017 de la Commission européenne pointe le problème, mais ne propose pas d'autres solutions que celles connues ou d'espérer des progrès dans les aimants sans ETR (Pavel et al., 2017). Les recherches récentes sur la question se sont focalisées sur les MSCF, probablement parce que les aimants sont au stator et donc plus facile à refroidir et qu'elles sont bien adaptées aux vitesses lentes donc à l'entraînement direct. Néanmoins, peu d'études comparent la MSCF avec la MSAP. Dans une étude (Prakht et al., 2021), les auteurs ont fait cette comparaison pour un générateur de 1800 W par simulation et ils montrent que la MSCF nécessite 25% d'aimants en moins. Les 25% de cuivre en plus sont partiellement compensés par les 30% de fer en moins. Cependant, aucune validation expérimentale ne confirme ce résultat et il n'est pas démontré que cet avantage reste significatif sur des machines de plusieurs MW. Une étude comparative entre deux MSCF avec des aimants NdFeB et ferrite montre à puissance égale que la machine sans ETR aurait une masse 2,5 fois plus grande et un prix équivalent sur une base de 126\$/kg pour le NdFeB et 18\$/kg pour la ferrite en 2022 (Bharathi et al., 2022). Il est évident que la parité entre ces deux matériaux jouera un rôle primordial dans l'optimisation économique.

2.1.1.3.3.2 Réduction de l'utilisation des aimants terres rares dans les transports

Dans le secteur des transports, il faut distinguer les domaines du ferroviaire, de l'aéronautique et du routier. Le domaine ferroviaire est entièrement électrifié (y compris les motrices diesel), et n'utilise que des machines sans aimants permanents, synchrones à excitation bobinée pour des raisons de souplesse (fort couple de démarrage et défluxage à grande vitesse) ou plus rarement asynchrone. Le domaine aéronautique, n'utilise pas d'aimants dans ses générateurs pour des raisons de sécurité, car ils doivent pouvoir être désexcités. Des aimants sont en revanche utilisés dans les auxiliaires de commande (moteurs, actionneur de type haut-parleur électrodynamique) en nombre croissant avec l'électrification des commandes. La propulsion électrique en est encore au stade des études liminaires, les spécialistes estiment que les moteurs devraient être supraconducteurs, donc sans aimants.

Le domaine des transports routiers n'utilisait par le passé d'aimants que dans les moteurs auxiliaires (essuie-glaces, pompe à eau, lève-vitres, etc.), mais avec la transition énergétique l'électrification de la propulsion a généré une demande importante en aimants à base de terres rares. Les premiers constructeurs de véhicules tout électriques, Renault et Tesla, ont fait le choix initialement des machines sans aimants, synchrones (MSES) et asynchrone (MASC) respectivement pour les mêmes raisons que le ferroviaire. Toyota, premier constructeur de véhicules hybrides, avait au contraire fait le choix des MSAP pour des questions de compacité. La nécessité d'augmenter l'autonomie des VE a néanmoins poussé presque tous les constructeurs à passer aux MSAP qui ont un meilleur rendement et une plus forte densité de couple, à part Renault qui a conservé la MSES sur tous ces petits modèles (Zoé, R5, R4, Clio), suivit

par BMW (modèle i3), car le convertisseur qui alimente la machine est moins coûteux. Selon la puissance, une machine de traction automobile peut contenir jusqu'à 2 kg d'aimants, soit 600-700 g de terres rares dont près de 100 g de dysprosium/terbium (environ 3g d'ETR par kW actuellement). En ce qui concerne les poids lourds, l'électrification se pense dans un avenir encore lointain, il est donc difficile de prévoir la technologie qui prévaudra, mais il est probable que les aimants soient nécessaires. Enfin pour les micro-mobilités, les MSAP sont exclusives pour les vélos à assistance électrique et les trottinettes, elles sont souvent de type a) de la Figure 2.11 avec rotor extérieur et APTR ou de type e) avec ferrites.

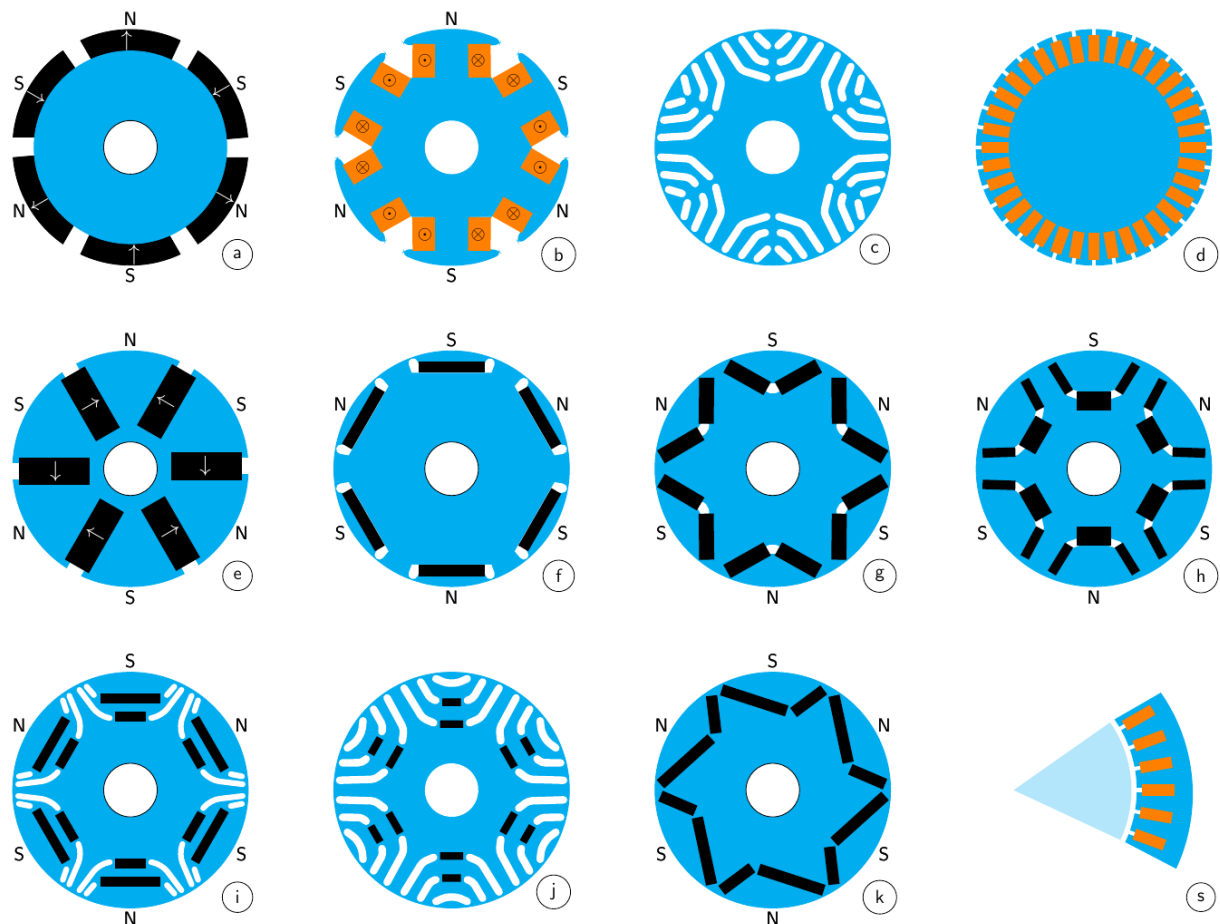


Figure 2.11 Principaux types de rotors utilisés dans les machines à flux radial de traction automobile ici représentées en configuration hexapolaire. a) aimants de surface ; b) excitation bobinée ; c) synchro-réductance ; d) asynchrone (ou à induction) à cage d'écureuil ; e) à concentration de flux ; f) à aimants enterrés ; g) à aimants en V ; h) à aimants en C ou segmentés ; i) à barrière de flux ; j) synchro-réductance assistée par aimants ; k) à aimants asymétriques ; s) les stators (1/6 représenté) sont identiques pour toutes ces machines.

2.1.1.3.3.3 Machines synchrones à aimants permanents sans terres rares lourdes

La nécessité des aimants contenant du Dy dans les moteurs de traction provient des risques de désaimantation des aimants NdFeB qui n'en contiennent pas aux températures usuelles de cette application (typiquement autour de 100°C). Cependant, en général, les aimants ne se démagnétisent que partiellement (typiquement dans les coins). Certains auteurs ont proposé des solutions d'aimants hybrides dont 90% ne contiennent pas de Dy (M. S. Islam et al., 2020), mais cela implique un procédé complexe d'assemblage de petits aimants. Une solution plus simple consiste à utiliser des aimants à infiltration de

Dy et de tirer parti du gradient de composition, la surface étant plus susceptible de se désaimanter, il n'est pas nécessaire d'infiltrer du Dy jusqu'au cœur de l'aimant (Jurkovic et al., 2015). La conception du rotor peut permettre de diminuer le taux de Dy (Hirota et al., 2015), voire de s'en passer (Hwang & Lee, 2018) au prix d'une légère augmentation de l'épaisseur des aimants intérieurs dans une structure à deux couches. D'autres publications proposent d'optimiser les barrières de flux. Une autre possibilité consiste à mettre le rotor à l'extérieur et à disposer les aimants en structure Hallbach, mais l'augmentation probablement importante du volume d'aimant n'est pas chiffrée (Husain et al., 2021). Une solution de rupture pourrait s'appuyer le principe de la MSCF (Sone et al., 2014), de par sa topologie, elle serait moins sujette à la démagnétisation et s'accommoderait d'aimants sans Dy, mais l'étude ne compare pas à une solution utilisant des aimants au Dy (Raminosoa et al., 2015). Dans toutes ces études, à l'exception de (Hwang & Lee, 2018), les résultats sont issus de simulation, sans validation expérimentale, il est difficile d'évaluer la faisabilité de ces solutions.

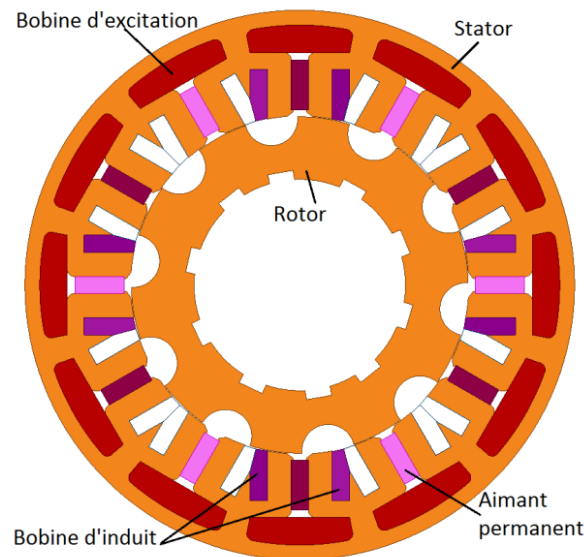


Figure 2.12 Machine à commutation de flux (ici à double excitation, réputée la plus compacte et la plus facile à refroidir parmi les machines à flux axial (Dupas, 2016).

2.1.1.3.3.4 Machines synchrones à aimants permanents sans terres rares

L'idée la plus évidente est de revenir aux aimants ferrite qui sont beaucoup moins cher et qui n'utilisent pas ou très peu d'ETR critique. Une étude extensive de la littérature (plus de 130 références) a été faite en 2020 et a conclu sans surprise que dans l'ensemble, les machines à base de ferrite ont une densité de couple 3 fois plus faible que les machines utilisant des NdFeB. Ce désavantage aux vitesses usuelles (autour de 3000 tr/min) s'érode à haute vitesse du fait que le niveau d'induction est moins élevé et produit moins de pertes fer pour des fonctionnements autour de 10 000 tr/min (Tahanian et al., 2020). Les machines à concentration de flux (Figure 2.11 e) atteignent des puissances spécifiques de 4 kW/L ce qui reste nettement inférieur aux machines avec ETR (Kimiabeigi et al., 2016), la masse du rotor est augmentée d'un facteur 3 (Eklund et al., 2014; Sjkovist et al., 2016), mais pour un prix nettement inférieur (Kimiabeigi et al., 2016). L'utilisation d'une structure en C (Figure 2.11 h) segmentée en plusieurs couches permet également d'insérer une grande quantité d'aimants (Jung et al., 2021), certains auteurs indiquent une augmentation de 22% de la masse de la machine, mais sans validation expérimentale (Raghuraman et al., 2021). Des études sur une machine disque montrent que la densité de puissance est sensiblement supérieure, 5kW/L (Chino et al., 2011), mais ce type de machines est difficile à construire et a des pertes fer importantes au rotor (Sone et al., 2014). D'autres auteurs, sur une structure de MSCF trouvent une augmentation de 100% de la masse, là encore en simulation (Oti & Awah, 2022), ce qui montre que les

comparaisons sont difficiles, car l'invariant peut être différent pour chaque étude. Néanmoins il semble que parmi les différentes structures, le type Figure 2.11 e est plus performant que a, c, ou j. Des auteurs ont également proposé une MSCF à rotor extérieur qui, d'après les simulations, aurait un couple massique égale à celui des meilleures machines à aimant NdFeB (Badewa et al., 2023).

L'utilisation du MnBi a fait également l'objet d'une étude en simulation, ses propriétés étant en principe supérieures à celles des ferrites (Brody et al., 2023, 2024). Dans une structure en V à deux étages, la masse de la machine serait supérieure d'un tiers par rapport aux NdFeB, mais ces aimants ne sont pas commercialisés. L'autre alternative consisterait à combiner le fort champ coercitif des ferrites avec la haute rémanence du nitrure de fer dans une structure en C à deux couches (Figure 2.11 h) les simulations concluent à des performances égales à celle d'un moteur commercial (Chevrolet Bolt) à aimants NdFeB (Al-Qarni & El-Refaie, 2023), mais il existe encore une très forte incertitude sur les propriétés et la disponibilité des aimants nitrure de fer.

2.1.1.3.3.5 Machines synchrones à combinaison d'aimants avec et sans terres rares

Si les performances des NdFeB sont un atout indéniable à basse vitesse pour la production de couple, ils présentent un handicap à haute vitesse du fait de leur haute rémanence et de la haute tension induite. Dès lors, certains auteurs ont imaginé combiner un rotor à concentration de flux avec des ferrites et un rotor à aimant NdFeB de surface dans un même stator (X. Zhu et al., 2017). Une réduction de la quantité de NdFeB d'un facteur 3 réduit le couple de 30%, mais aussi la tension du même taux ce qui est un avantage du point de vue batterie et convertisseur statique. Un concept plus intéressant consiste à combiner aimants NdFeB en V et ferrites à concentration de flux. Des performances identiques à celles d'un moteur 100% NdFeB ont été obtenues avec moitié moins d'ETR (X. Zhu et al., 2019) ce qui a été confirmé sur le prototype. Un certain nombre de variations autour de ce principe ont été proposées (Y. Chen et al., 2020) ou avec les aimants en C (W. Wu et al., 2016), ainsi que sur des structures plus exotiques comme une machine cloche à rotor intérieur et extérieur incluant une étude de désaimantation ou encore une machine à double stator avec les aimants sur la partie extérieure (Y. Chen et al., 2018), la plupart du temps sans validation expérimentale et sans éléments de comparaison avec les machines du commerce.

2.1.1.3.3.6 Machines synchrones à mémoire de flux

Nous venons de voir que l'utilisation d'aimants sans ETR lourds ou sans ETR pose souvent le problème de la démagnétisation. À l'opposé, un concept revient au goût du jour qui exploiterait cette faculté à se désaimanter pour moduler le flux de la machine (Ostovic, 2003), ceci pourrait se faire avec une MSCF cloche à aimants combinés sur stator intérieur (X. Li et al., 2016), mais la faisabilité à l'échelle industrielle n'a pas été démontrée. Par principe, les aimants doivent avoir un champ coercitif assez bas et une grande rémanence.

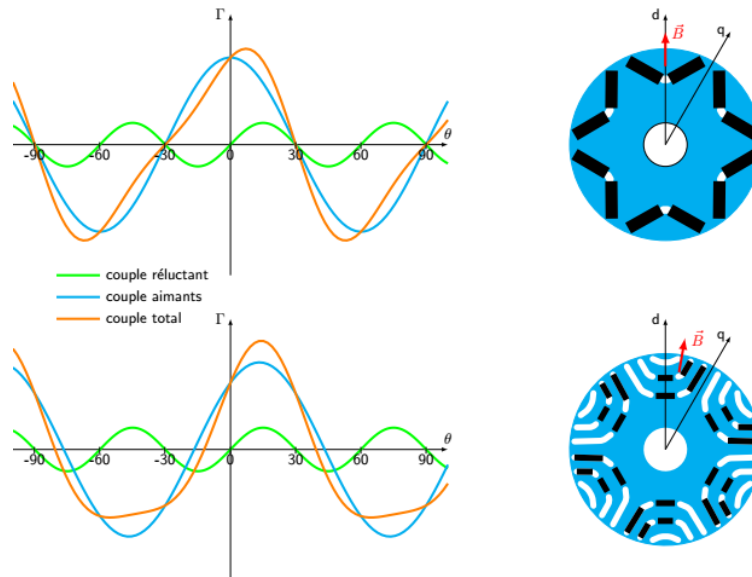


Figure 2.13 Principe de la dissymétrie du rotor pour maximiser la somme du couple dû aux aimants et celui dû à la réluctance. Exemple de machines hexapolaires avec aimants en V et synchro-réluctante avec aimants dissymétriques, le vecteur B indique le centre du pôle.

2.1.1.3.3.7 Machines synchrones à aimants permanents avec optimisation du couplage réluctant

Le couple réluctant dans une MSAP classique intervient comme un harmonique d'espace d'ordre 2 et décalé de 45° par rapport au couple dû aux aimants, ce qui fait qu'il ne contribue pas au couple moyen (cf. haut de la Figure 2.13). Introduire une asymétrie des aimants permet de rapprocher les 2 maxima et d'augmenter le couple global à quantité d'aimant égale (Yanagisawa et al., 2020), comme on le voit en bas de la Figure 2.13. Un certain nombre de variantes ont été proposées avec des aimants en V ou C différemment placés (Y. Ji et al., 2023) ou avec des aimants à ETR en concentration ou enterrés ou les deux (Yunyun et al., 2022). Des auteurs ont proposé une solution plus simple à partir d'un rotor à aimants en V de remplacer partiellement un des aimants NdFeB par un ferrite, mais sans évoquer la densité de puissance (Lv et al., 2022).

2.1.1.3.3.8 Machines synchrones à double excitation

Le concept de double excitation même s'il a des origines historiques n'a été réellement développé qu'avec les MSCF du fait que l'excitation étant au stator, il n'y a pas de contact tournant contrairement aux MSEB (Hoang et al., 2007). Ce type de machine permet à la fois de diminuer la quantité d'aimants tout en donnant de la souplesse et n'est pas pénalisante du point de vue du rendement si l'excitation en défluxage ou sur-fluxage, n'est utilisée que pendant peu de temps (démarrage, accélération...). Le même principe a été développé avec différents placements des bobines d'excitation (Bin Sulaiman et al., 2012; Gaussens et al., 2012) ainsi que sur des machines plus sophistiquées à flux tridimensionnel (Kosaka et al., 2010, 2011; Ozawa et al., 2009) qui d'après simulation aurait une puissance spécifique de $3,3 \text{ kW/kg}$; à double stator (Y. Chen et al., 2018) ou plus classique, avec aimants et excitation bobinée en quadrature (Chattopadhyay et al., 2021). Sur le principe, la double excitation permet de diminuer significativement la masse d'aimant, mais les études n'offrent pas de chiffres concernant les densités de puissance issues de l'expérience.

2.1.1.3.3.9 *Machines synchro-réductantes assistées d'aimants permanents*

Les machines synchro-réductantes (Figure 2.11-c) sont connues pour leur robustesse, leur faible coût et leurs bonnes performances à haute vitesse, mais aussi pour leur faible densité de couple. Néanmoins, cette faiblesse peut être compensée par l'atout d'aimants en quantité limitée. Le principe ressemble beaucoup à celui évoqué précédemment, mais en partant d'une MSyR. L'exemple de rotor donné Figure 2.11-j est représentatif de la structure de ce type de machine, les barrières de flux pouvant être plus ou moins remplies d'aimants selon que l'on utilise des NdFeB ou des ferrites avec des performances de l'ordre de 3,7 W/kg dans le premier cas et 2,6 W/kg pour une machine de 180 kW (Ram Kumar et al., 2019), mais la réalisation par les mêmes auteurs ne donne que 2 kW/kg ou 6 kW/L (Al-ani et al., 2023). Les machines à rotor extérieur donnent des chiffres sensiblement plus faibles, 2,9 W/L avec NdFeB et 2,6 W/L avec ferrite, mais la comparaison est difficile du fait que la vitesse nominale est plus faible d'un tiers (Md. Z. Islam et al., 2021; Reddy Bonthu et al., 2017). D'autres auteurs revendiquent jusqu'à 3,6 W/kg (Chang, 2021) ce qui est sensiblement supérieur aux MSAP des VE commercialisés. Cependant toujours d'après cette étude, les machines à aimant en V sur 2 étages atteignent 4,2 kW/kg, le surcoût en aimant serait largement compensé par l'économie sur le fer et le cuivre. La plupart du temps il n'est pas possible de chiffrer la réelle économie en masse d'aimant, soit par manque de comparaison, soit par absence de données chiffrées, d'autant que la différence entre MSAP et MSRA est parfois floue, mais globalement la MSRA se situe entre la MSAP et la MAS du point de vue de la densité de couple, <5, 6 à 8 et 10 Nm/kg respectivement (Moghaddam et al., 2020), ce classement est confirmé par d'autres auteurs (Carraro et al., 2014), mais avec des valeurs moitié moins grandes.

2.1.1.3.3.10 *Machines sans aimants permanents*

Les MSES et MAS sont les seules alternatives sans aimants utilisées actuellement dans les véhicules du commerce. Bien que de principes tout à fait différents, elles présentent le même inconvénient, savoir un rendement plus faible que les MSAP puisque l'excitation produit des pertes joules, qui plus est au rotor qui est plus difficile à refroidir que le stator. Les MSEB sont plutôt utilisés dans les VE d'entrée de gamme (Renault, BMW) alors que curieusement les MAS sont utilisées dans des véhicules haut de gamme (Tesla, vraisemblablement pour des raisons plus historiques que techniques). Parmi les différentes machines sans aimants, les MRV ont été considérées comme une alternative aux MSAP au milieu des années 2010, mais semble être aujourd'hui quasiment absente de la littérature, vraisemblablement en raison du bruit qu'elles produisent dans une bande de fréquence très désagréable à l'oreille (Gan et al., 2018) et du fait que leurs performances en termes de densité de puissance ne sont compétitives qu'en tournant à haute vitesse, ce qui impose des réducteurs de masse plus importants et d'utiliser des tôles magnétiques plus fines (pour limiter les pertes fer) et donc plus chères (Chiba et al., 2015; Takeno et al., 2011, 2012). Les MSyR présentent les mêmes avantages (rotor passif), mais sans l'inconvénient du bruit, cependant la maximisation du couple nécessite des découpes dans les tôles rotoriques (Figure 2.11-c) particulières avec des isthmes nécessaires à la fabrication, mais qui sont néfastes pour les performances. Une solution possible, mais non encore validée expérimentalement, consisterait à utiliser un acier à transformation de phase, le chauffage des isthmes localement transforme l'acier dans une phase paramagnétique et améliore le couplage, mais la densité de couple resterait inférieure à celle des MSAP (Bhageerath Reddy et al., 2017). Une alternative existe avec les MSCF sans aimants. Plusieurs structures existent (différentes dispositions des bobinages d'excitation sont possibles), certains auteurs ont mesuré une puissance volumique très compétitive (4,8 kW/kg), mais en ne comptant que la masse active, ce qui est plus favorable comparé à une machine industrielle (Chiba et al., 2015).

La comparaison est toujours un exercice difficile du fait qu'il peut exister une ambiguïté sur la masse prise en compte dans les comparaisons et du fait que la puissance dépend de la vitesse : de fait, il est facile d'augmenter la puissance par unité de masse ou de volume au prix d'une baisse de rendement et en

négligeant l'augmentation du poids du réducteur. Une comparaison plus juste peut se faire sur la densité d'énergie (Riba et al., 2016) et là il apparaît clairement que les MSAP sont plus performantes, ce qui est vérifié aussi sur la densité de couple.

2.1.1.3.4 Autres secteurs industriels

Dans le secteur de l'industrie, en dehors de la robotique, les machines électriques, essentiellement des moteurs, sont de type asynchrone, l'utilisation de machines à aimant est anecdotique dans ce secteur, car le coût et la robustesse priment sur les performances. Les robots sont généralement mus par des moteurs pas-à-pas qui contiennent des aimants permanents afin d'optimiser le couple volumique et de garder une position stable hors tension.

Dans le secteur domestique, la qualité principale d'un moteur est son prix. Suivant l'application, on utilise principalement, par ordre de puissance, les moteurs à spires de Frager (e.g. entraînement de four à micro-ondes, pompes de machine à laver), à courant continu (ou universels, e.g. robots ménagers, perceuses, machine à laver) ou asynchrones monophasés (e.g. machine à laver, nettoyeur haute pression). Parmi eux, seuls les moteurs à courant continu contiennent des aimants, mais ils sont exclusivement en ferrite. Dans ce secteur, il existe une exception notable, celle des drones de type quadricoptère pour lesquels le rapport puissance/poids et le rendement doivent être optimisés. Dans ce cas les moteurs sont de type synchrone à aimant permanent, généralement montés en surface sur un rotor cloche. Ils utilisent une très grande quantité d'aimants terre rare rapportée à la masse de la machine. Ces drones ne peuvent fonctionner efficacement sans aimants terre rare, mais la volumétrie est très modeste par rapport au secteur. En dehors des moteurs, des aimants sont utilisés dans un très grand nombre d'applications, ils sont la plupart du temps en ferrite, mais pour certaines applications, les aimants au néodyme sont indispensables à la miniaturisation (par exemple les écouteurs intra-auriculaires, têtes de disques durs, etc.) d'objets produits en grand nombre, mais ne contenant souvent que quelques grammes d'ETR.

Pertinence du corpus : Le corpus est exhaustif sur les différents types de machines et assez riche en termes de données. 20 % du corpus n'a pas été jugée pertinente et 30 % très pertinente. Une partie importante des recherches sur l'optimisation des machines électriques et sur l'évaluation de nouvelles structures de rotor se fait par simulation et le critère thermique n'est pas pris en compte en couplage fort ce qui peut donner des pistes, mais pas des solutions validées. En dehors des machines pour la traction automobile et des éoliennes, la littérature scientifique est totalement muette.

Tendances visibles depuis la littérature : L'orientation majoritaire du corpus se fait en direction de l'optimisation de la disposition des aimants permanents dans les MSAP pour en réduire la quantité tout en augmentant la densité de puissance. S'il est difficile d'avoir des données précises sur la dernière génération de machines installées dans les véhicules, la littérature permet de supposer que l'on s'approche de 5 kW/kg avec une quantité d'aimants de l'ordre de 1g/kg. Les MSRA ont évoluées finalement vers de plus en plus d'aimants pour devenir similaires aux MASP à barrières de flux. Les MSCF avec ou sans aimants occupent une partie non négligeable de la littérature, mais pour le moment aucune application n'est mentionnée.

2.1.2 Applications pour l'éclairage (phosphores pour Diodes Electro-Luminescentes, LED)

2.1.2.1 Tendance d'usage, substitution des dispositifs d'éclairage classiques par des dispositifs à LED.

Les ETR sont utilisés dans plusieurs types d'applications photoniques, dont les dispositifs d'éclairage LED de lumière blanche, les « W-LED ». Cet usage représentait 2% des usages en 2020 soit 3,6 kt mais avec une dynamique en forte baisse liée au remplacement des lampes phosphores par des dispositifs LED. En effet, les quantités d'ETR nécessaires dans une LED sont d'un à deux ordres de grandeur inférieurs à celles requises pour produire une quantité équivalente de lumière avec des lampes phosphores (Ku, et al., 2015).

On estime que l'éclairage représente 20% de la consommation électrique mondiale et que l'éclairage LED représente 35% des usages avec une cible à 85% en 2040 ans (Pattison et al., 2020). La tendance lourde à l'utilisation des LED réside dans leur faible coût de production, longue durée de vie (jusqu'à 100 000h), et faible consommation énergétique (10% d'une lampe à vapeur de sodium, 50% d'une lampe fluo-compacte). On estime ainsi que le passage de l'éclairage routier à la technologie LED permettrait de diminuer par deux la consommation énergétique associée (Beccali et al., 2018; Principi & Fioretti, 2014) et que le remplacement des lampes fluo-compactes domestiques par les LED permettrait de réduire de 4150 % les émissions de GES associées au cycle de vie d'une ampoule (Principi & Fioretti, 2014).

Les principaux avantages des LED par rapport aux autres dispositifs d'éclairage sont liés à leur capacité à émettre avec de très bons flux lumineux, dans des longueurs d'onde très étroites (précision de couleur), avec une grande efficacité de génération de rayonnement visible (faible déperdition d'énergie par production de chaleur) et une séquence marche/arrêt très rapide permettant des usages en impulsions avec des garanties de sécurité lors d'utilisation de rayonnements intenses.

Tout comme la loi de Moore caractérise l'évolution du nombre de transistors présents sur un microprocesseur (doublé tous les 2 ans), la loi de Haitz caractérise l'évolution du flux lumineux (en lumen), et le coût (en \$ par lumen) des LED (Haitz et al., 2000). On estime que le flux lumineux des LED est multiplié par 30 tous les 10 ans et que le coût du lumen est divisé par 10 sur la même période. Depuis 2010 la technologie White LED ou W-LED surpasse les lampes à incandescence en termes de flux lumineux pour un coût quasiment équivalent. On estime que le marché des LED, d'une valeur d'environ 50 à 60 milliards de dollars en 2019, représente 40 à 45 % du marché total de l'éclairage (Bünzli, 2022).

Dans le cadre de cette étude, nous nous baserons sur l'usage le plus répandu qui est celui de l'éclairage et donc des W-LED, diodes pour l'émission de lumière blanche.

2.1.2.2 Principes d'utilisation des phosphores (matériau convertisseur de lumière) d'ETR dans les W-LED

Les LED émettent de la lumière quasi-monochromatique (une très fine gamme de longueurs d'onde et donc une couleur précise), les couleurs rouge, orange et jaunes ont été disponibles dès les années 1980 (LED GaInP, GaAlAs). Le violet, bleu et vert sont devenus accessibles au début des années 1990 (LED GaInN) permettant de construire des dispositifs tri-chromatiques de type LED RGB (Red GaAlAs, Green

InGaN, Blue InGaN) (Stinson, 1991⁴). Ces dispositifs sont cependant complexes à construire, car chacune des trois LED colorées opère avec un voltage et une intensité différente. De plus chaque LED à un vieillissement différent induisant donc une distorsion de la couleur dans le temps.

Par conséquent, les LED « single-chip », faites d'une seule puce qui illumine un mélange de phosphores contenant plus ou moins d'ETR, dominent actuellement le marché des W-LED. Il existe deux technologies principales :

-les dispositifs à « *conversion totale* » où une puce émettant dans l'UV/violet/bleu illumine un mélange de phosphores rouges, verts et bleus et où tout le rayonnement de la puce est converti en lumière visible (Figure 2.14, a).

-les dispositifs à « *conversion partielle* » où une puce émettant dans le bleu illumine un seul type de phosphore YAG:Ce émettant du rouge au vert (donc perçu comme jaune). L'émission bleue de la puce est donc partiellement absorbée par le phosphore pour produire le jaune, mais une partie est transmise directement afin d'assurer la composante bleue du rayonnement final (Figure 2.14, b).

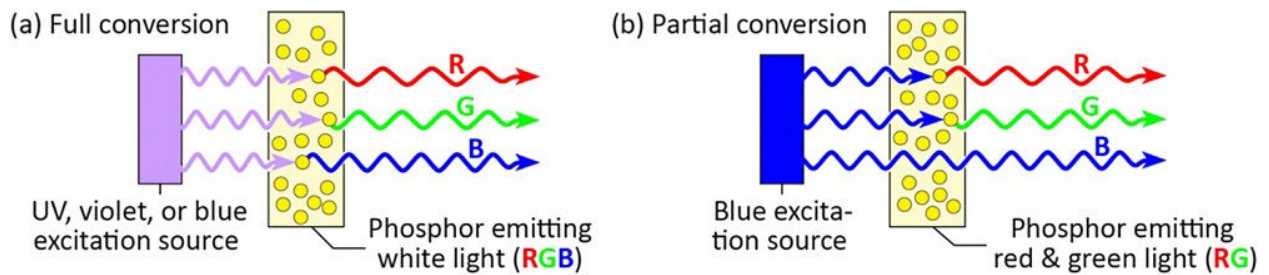


Figure 2.14 Représentation du principe de fonctionnement de LED à conversion totale (a) ou partielle (b) de la source incidente par des phosphores (Cho et al., 2017).

Ce dernier type de LED a marqué l'envol de l'application pour l'éclairage et les premières LED construites pour cet usage furent commercialisées en 1996 (Cho et al., 2017). La construction de ces « LED blanches à phosphores » (phosphor-converted white LEDs, pc-W-LEDs ou plus simplement W-LED) est dans l'approche semblable aux lampes fluorescentes où un dépôt de phosphore sur une matrice transparente est illuminée par une source. Cependant dans le cas de LED la source est un semi-conducteur et non du mercure ionisé.

⁴ Brevet : U.S. Patent 4, 992, 704, 1991

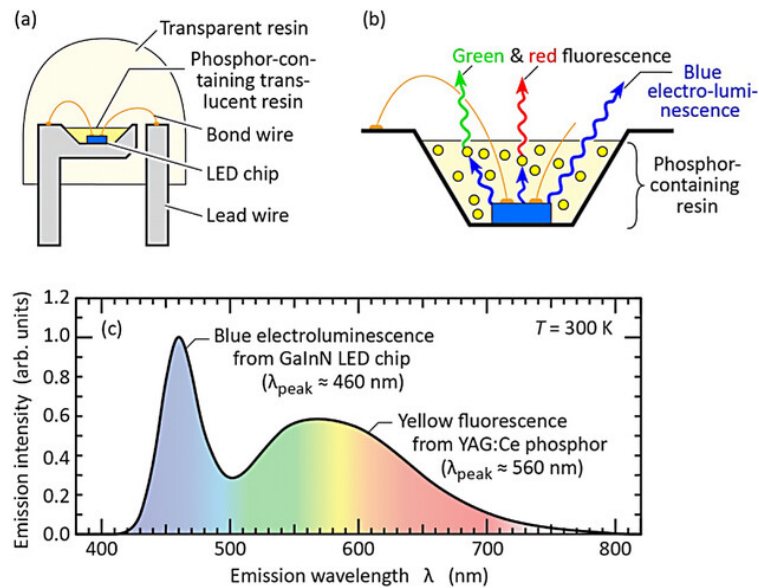


Figure 2.15 a) structure de la première W-LED (b) schéma de principe de la LED contenant une puce bleue et le phosphore YAG:Ce mélangé à une résine (c) Spectre d'émission de la première W-LED montrant la contribution bleu (puce) et jaune (phosphore) à l'émission de lumière blanche. Reproduit d'après (Cho et al., 2017).

La lampe à LED, est caractérisée par de nombreux paramètres comme son efficacité lumineuse (Luminous Efficacy, LE), flux lumineux (Luminous Flux, LF), brillance (Brightness, B), température de couleur (Correlated Color Temperature, CCT), indice de rendu des couleurs (Color Rendering Index, CRI), durée de vie moyenne. Ces paramètres, déterminants pour l'usage en éclairage, sont principalement gouvernés par les propriétés des phosphores et donc liés à l'utilisation d'ETR. C'est l'usage qui gouverne alors le choix d'une technologie LED par rapport à une autre suivant que l'on cherche des couleurs chaudes (bas CCT à 2700-300K) ou froides (haut CCT à 4000-6500K), avec un bon rendu de couleur des objets éclairés ($\text{CRI} > 90$), une longue durée de vie de la lampe, etc. Cette variété de propriétés permet ainsi d'utiliser les LED pour la plupart des usages de l'éclairage : indoor, outdoor, routier, portable....

Tableau 2-3 Avantages et désavantages des phosphores pour LED, selon les données de (Rakshita & Haranath, 2024)

Combinaison de LED	Avantages	Inconvénients
Puces LED RGB	Couleur modulable Haute LE	Besoin de sources d'alimentation multiple CCT instable
Puce LED bleue + phosphore jaune	Peu cher Fabrication facile	Faible LE Faible CRI Composante rouge inefficace
Puce LED bleue + phosphores vert et rouge	Fort CRI Forte stabilité de couleur	Faible LE
Puce LED UV + phosphors RGB	Fort LE Fort CRI Forte stabilité de couleur	CCT instable Endommagement des phosphores par la source UV

*RGB : Red Green Blue ; LE : Luminous Efficacy, efficacité lumineuse) ; LF : (Luminous Flux, flux lumineux) ; CCT (Correlated Color Temperature, température de couleur) ; CRI : (Color Rendering Index, indice de rendu des couleurs).

On distingue 3 parties dans une LED : la lampe et son bâti, le semi-conducteur, le phosphore nommé aussi « *matériau convertisseur de lumière* ». Les métaux stratégiques sont utilisés dans le semi-conducteur et les phosphores. Les ETR ne sont présentes qu'à l'état de dopant dans les phosphores (Tableau 2-3). Elles sont donc indispensables à la propriété de la LED, mais utilisées en usage dispersif à l'état de traces. Les principales évolutions des performances des LED commerciales sont dues principalement par des optimisations de l'architecture de la lampe (substrats, couches réfléchissantes, types et modes de contacts, sous-couches conductrices, texturation de la surface de la puce...) et des compositions des semi-conducteurs (GaN, GaInN....).

En 2012, Wilburn estimait que la demande de l'année 2014 en ETR pour des applications LED serait répartie comme suit : 4.1 t de Ce_2O_3 , 4,4 t de Gd_2O_3 , 12 t d' Y_2O_3 , 460 kg d' Eu_2O_3 (Wilburn, 2012). Ces valeurs ont explosé et sont de l'ordre du millier de tonnes en 2020 (Nkiawete & Vander Wal, 2025). À ce jour, les ETR sont donc uniquement utilisés dans la partie phosphore de la lampe ou le YAG:Ce à lui aussi évolué pour s'adapter à l'usage visé. La substitution partielle de l' Y^{3+} par le Gd^{3+} permet d'augmenter la composante rouge de l'émission dont manque le YAG:Ce qui possède une haute température de couleur (5000-6500K) peu adapté à l'usage domestique ou des couleurs plus chaleureuses sont attendues.

Afin de comprendre l'évolution de l'usage des ETR dans les phosphores pour W-LED certains auteurs proposent un recensement par génération de phosphore (Rakshita & Haranath, 2024).

Les phosphores de première génération de type $(\text{Ba},\text{Sr})_2\text{SiO}_4: \text{Eu}^{2+}$ et YAG:Ce, ont été utilisés pour leur grande brillance. Cependant leur mauvais rendu de couleur ($\text{CRI} < 0.9$), ne permettait pas l'utilisation pour l'éclairage domestique.

Il a fallu utiliser une deuxième génération de phosphores contenant du plomb ou des phosphores de type $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$, $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}^{2+}$, $\text{Ba}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}^{2+}$... Ces phosphores possèdent de grands CRI et une stabilité thermique et chimique accrue permettant une utilisation en éclairage intérieur.

La troisième génération de phosphores a été dédiée à l'usage dans les dispositifs de rétro-éclairage (écran TV, smartphone...) où des bandes d'émission plus fine en longueur d'onde sont requises ainsi qu'une plus grande pureté de couleur. Ils sont principalement basés sur des matrices de type $\text{SrMg}_2\text{Al}_2\text{N}_4$, $\text{SrMg}_3\text{SiN}_4$, $\text{Sr}(\text{Li}_2\text{Al}_2\text{O}_2\text{N}_2)$, $\text{Sr}(\text{Li}_{2.5}\text{Al}_{1.5}\text{O}_3\text{N})$ dopés au Mn^{4+} ou Eu^{2+} .

Enfin la quatrième génération est liée au besoin d'émission infra-rouge (IR) dans des usages tels que l'imagerie médicale, les dispositifs de vision nocturne, les cellules solaires, la culture de végétaux (Balaram, 2019). Ces phosphores utilisent des matrices dopées au Cr^{3+} , Er^{3+} et Tm^{3+} . Lorsque les phosphores usuels sont produits sous formes nanométriques, leurs propriétés émissives peuvent être maximisées (Cesaria et al., 2018; Cesaria & Baldassare Di Bartolo, 2019).

2.1.2.3 LED avec phosphores sans ETR

Le développement de LED à fort flux lumineux résulte d'un effort d'optimisation du matériau semi-conducteur de la puce, de la structure du dispositif, et aussi des phosphores utilisés, ces derniers représentant la seule vraie marge de progression encore accessible (H. Zhang, Zhang, et al., 2021).

Certains phosphores sans ETR sont utilisés pour leur composante rouge profond et sont principalement basés sur des dérivés de Mn^{4+} comme alternative aux phosphores de nitrides ou oxynitrides dopés à l' Eu^{2+} (Adachi, 2019). Ils sont insérés dans des matrices fluorures, oxydes, oxyfluorures et hydroxyfluorures, des germanates (Thejas et al., 2021), tungstates (Y. Zhang et al., 2018). Dans certains cas l' Eu^{2+} peut n'être que partiellement substitué, par exemple par du Mn^{2+} (Huang et al., 2015) ou du Cu^+ (Mao et al., 2015). La plupart des phosphores produits sont ensuite combinés avec le classique YAG:Ce (jaune) afin d'obtenir des valeurs de température de couleur (CCT) plus faibles et donc adaptées à l'usage domestique (C. Yang et al., 2017). Ils peuvent également être utilisés seuls dans certains domaines applicatifs nécessitant de la lumière rouge, notamment l'horticulture sous serre (Huang et al., 2020).

Les autres phosphores sans ETR sont envisagés en émission trichromatique ou couvrant tout le spectre de la lumière blanche. On regroupe les Quantum Dots (QD), Carbon Dots (CD), perovskites hybrides, polymères ou molécules organiques, réseaux métallo-organiques (« metal-organic frameworks, MOF) (Pier Carlo Ricci, 2020; H. Zhang, Zhang, et al., 2021) :

Les quantum dots (QD) sont des nanoparticules de semi-conducteurs abondamment utilisés dans le domaine de l'optoélectronique. Il existe une très grande variété de QD :

Les QD de type CdSe peuvent émettre directement de la lumière blanche et peuvent être encapsulés avec d'autres matériaux (ZnS, gels polymères...) pour former des composites avec une grande efficacité lumineuse et mécaniquement flexibles. La présence de Cd, toxique, reste un obstacle même s'il peut être substitué par du Zn sous certaines conditions. Les matériaux semblent raisonnablement efficaces, mais peu de dispositifs existent (H. Zhang, Zhang, et al., 2021). Les QD incluant des nitrures de carbone, du silicium, Ti_3C_2 des MXene (halides métalliques) peuvent être efficaces et sont envisagés comme des alternatives dites plus éco-compatibles. Les halides métalliques présentent cependant de faibles valeurs de CRI, une faible efficacité lumineuse et une stabilité sous émission trop courte (Mo et al., 2022).

Les QD les plus aboutis pour usage en W-LED sont de type InP (B. Chen et al., 2020). Ils sont non-toxiques, ont une grande efficacité lumineuse et une grande gamme de couleurs accessibles. Ce type de QD peut être utilisé dans une couche photoluminescente, comme un phosphore classique. Le champ de recherche semble particulièrement dynamique, mais il est peu clair si des applications commerciales sont possibles ou envisagées à court terme.

Les Carbon Dots (He et al., 2020), ou Carbon Quantum Dots (CQD) sont des nanoparticules de carbone passivées en surface. Ils possèdent des qualités optiques comparables au QD auxquels s'ajoute une faible toxicité, grande stabilité chimique et thermique, ainsi que des voies de synthèses relativement simples. Ils sont potentiellement utilisables comme phosphores pour les W-LED soit via une approche trichromatique RVB (Meng et al., 2021), soit via une approche monochromatique, qui semble la plus prometteuse. Cette dernière permet d'obtenir des matériaux émissifs à grande stabilité de couleur et faciles à produire sous forme de films, revêtement, etc. Si les propriétés d'émission des CQD sont importantes, leur rationalisation reste encore discutée. On peut noter que ces composés peuvent aussi présenter des propriétés de phosphorescence (Jiang et al., 2022).

Les pérovskites hybrides (organique-inorganique) peuvent aussi servir de matériaux émissifs pour les W-LED, en particulier lorsqu'elles sont dopées au Mn^{2+} (Yuan et al., 2020). Une grande variété de composition est à l'étude, notamment pour s'affranchir du plomb initialement contenu dans les pérovskites. À ce stade, les perovskites souffrent d'un problème de stabilité chimique lorsqu'elles sont utilisées comme W-LED (H. Zhang, Zhang, et al., 2021).

Les molécules organiques isolées ou polymériques peuvent permettre de produire de la lumière blanche (Kundu et al., 2020) et être également efficaces lorsqu'elles sont d'origine biologique ou bio-inspirées (Fresta et al., 2018; Siva Pratap Reddy Mallem et al., 2019). Par exemple des films biocomposites formés de nanocellulose cristalline, mucine gastrique de porc et chromophores organiques peuvent être utilisables en application W-LED (Gotta et al., 2018).

La plupart des molécules organiques ne sont efficaces que si le quenching par auto-agrégation est réduit. On utilise alors des micelles, des gels ou des dilutions dans des matrices (par exemple (Gaurav et al., 2023; Menendez-Velazquez et al., 2022)) . Les molécules émettrices peuvent aussi être directement constitutives d'un polymère organique. Les matériaux produits ont de faibles taux de conversion de lumière, mais bénéficient de toutes les propriétés mécaniques des polymères. Une stratégie totalement opposée est d'utiliser des molécules présentant de l'émission induite par agrégation (*aggregation-induced emission*, AIE) comme des dérivés de tetraphenylethene ou des pyrènes. Ce champ de recherche est très actif, mais encore au stade de TRL assez bas. C'est également le cas des cristaux et microcristaux organiques qui combinent parfois les propriétés AIE avec de la phosphorescence.

Les réseaux métallo-organiques (metal-organic frameworks MOF) (Karmakar & Li, 2022) sont des composés comportant un ou des ligands organiques coordonnés à des métaux de transition ou des ETR pour former des édifices hybrides présentant des vides potentiels et donc une porosité. Par abus de langage, beaucoup de polymères de coordination (coordination polymers, CP), ne présentant pas de porosité, sont indûment nommés MOF.

Un MOF est donc fait de trois entités : un ligand organique, un métal et potentiellement une molécule « invitée » incluse dans les pores. Chacune d'entre elles peut participer soit à l'absorption de la lumière UV incidente soit à l'émission dans le visible offrant une très large palette de mécanismes émissifs et donc d'optimisation possibles (Lustig et al., 2016). Pour l'application W-LED, les MOF sont utilisés avec et sans

ETR. Dans ce dernier cas on retrouve principalement du Zn^{2+} , Pb^{2+} , Bi^{3+} , Cd^{2+} , Rh^{3+} , Ir^{3+} , Al^{3+} , Ga^{3+} ou Zr^{4+} . On peut noter les bonnes performances des Zn-MOF, dont le métal n'est ni critique ni toxique.

L'avantage principal des MOF est leur grande processabilité, certains d'entre eux étant au stade de dispositifs et démontrant des propriétés significatives en termes de CRI et d'efficacité lumineuse. Ces bons résultats sont à pondérer par la relative complexité des ligands organiques (et de leur voie de synthèse) utilisés dans certains MOF qui peuvent être un obstacle au scale-up. Les TRL atteints jusqu'alors sont moyens et aucune application commerciale pour l'usage W-LED n'est relevée dans le corpus.

Enfin, des **verres émissifs de types verres de phosphates** peuvent être directement utilisés dans une LED sans phosphores (Masai et al., 2010).

2.1.2.4 Nouveaux design LED

Outre l'optimisation des phosphores, avec ou sans ETR il est possible d'optimiser l'architecture de la LED via la nanostructuration de ses composants. Ces architectures nanophotoniques sont principalement basées sur les cristaux photoniques, antennes plasmoniques et metasurfaces. La nanostructuration peut concerner la surface émissive de la puce, le phosphore, des couches émissives additionnelles... Ces approches permettent de maximiser les performances totales d'une LED et donc potentiellement de limiter la quantité de phosphore nécessaire (avec ou sans ETR). Elles induisent cependant une construction plus complexe du dispositif et bien que la fabrication à grande échelle de nanostructures progresse très rapidement l'utilisation d'architectures nanophotoniques n'est envisagée qu'à moyen terme dans des dispositifs LED commerciaux (Galisteo-Lopez & Lozano, 2021).

2.1.2.5 Autres utilisations de phosphores

On peut noter qu'au-delà des LED, des phosphores sans ETR peuvent être utilisés dans toutes les applications liées à l'affichage et aux écrans que cela soit pour les dispositifs field emission display device (FED), Laser Powered Phosphor Display (LPD) ou Inorganic Electroluminescent (IEL) Display (Satya Kamal Chirauri et al., 2022). L'applicabilité de ces nouveaux phosphores est très variable selon les usages et les domaines et les TRL semblent encore moyens.

Les OLED (Organic Light-Emitting Diode, ou diode électroluminescente organique) sont des dispositifs d'affichage ou d'éclairage basé sur des matériaux organiques semi-conducteurs capables d'émettre de la lumière lorsqu'ils sont soumis à un courant électrique. Les OLED contiennent de l'Indium (In) et de l'étain (Sn) à l'anode, et de l'Aluminium (Al), Calcium (Ca) ou Magnésium (Mg) à la cathode. Ils permettent de produire des écrans sans besoin de rétroéclairage, flexibles, à angle de vision très large et temps de réponse très rapide. Cependant, comparés aux W-LED, leur coût de fabrication est élevé, leur luminosité et leur durée de vie sont plus faibles. Leurs performances peuvent être optimisées grâce aux ETR qui améliorent la qualité de la couleur émise et la durée de vie (Utochnikova, 2021). Les écrans de smartphone actuels sont composés de W-LED en entrée de gamme ou OLED (AMOLED, Active matrix-OLED) en haut de gamme.

Pertinence du corpus : Littérature assez riche sur la thématique des phosphores sans ETR pour application W-LED, avec cependant peu de publications démontrant une réelle applicabilité voire un

intérêt commercial. Beaucoup d'études se limitent à l'aspect « Rare-Earth free » du composé voire du matériau sans envisager de dispositifs et se concentrent sur l'évaluation de grandeurs physico-chimiques pertinentes en laboratoire (rendement quantique...) sans fournir d'autres grandeurs d'intérêt applicatif du matériau ou du dispositif (brillance, luminance, efficacité lumineuse...).

Tendance visible depuis la littérature : Les LED ont vu une explosion de leur usage depuis le début des années 2000 et supplantent les autres dispositifs d'éclairage pour la plupart des usages. La tendance semble se confirmer à long terme avec également des champs d'application émergents très dynamiques comme la communication par la lumière (Li-Fi), l'horticulture, et la photothérapie.

Les LED trichromatiques RGB sans phosphores ont rapidement été abandonnées, principalement au profit de dispositifs à conversion partielle basés sur puce émettant de la lumière bleue ($\lambda \approx 450$ nm) et illuminant des phosphores aux ETR.

L'usage des ETR est donc concentré au niveau des phosphores, alors que de nombreux autres métaux critiques sont en proportions significatives dans le dispositif complet (Franz & Wenzl, 2017). L'usage des ETR est donc dispersif avec une faible quantité d'ETR dans chaque dispositif.

Une très grande variété de composés alternatifs aux phosphores ETR pour l'application W-LED est proposée par la communauté scientifique avec des valeurs de rendements quantiques et CRI égaux ou même supérieurs aux phosphores avec ETR. Cependant, la plupart des études restent à bas TRL et peu de dispositifs crédibles sont présentés. L'applicabilité bute également sur la stabilité thermique et la résistance au photo-blanchiment en condition d'usage. Les approches par Quantum Dots, notamment InP, semblent toutefois progresser très vite. L'utilisation d'architectures nanostructurées dans les dispositifs existants avec ou sans ETR semble pouvoir être une approche efficace pour maximiser les performances des W-LED. Enfin, les OLED qui initialement ne contenaient pas d'ETR, commencent à en être pourvues pour améliorer la qualité de couleur des écrans et leur durée de vie.

2.1.3 Applications pour la photonique et les télécommunications

Les ETR sont utilisées dans l'industrie du verre comme additifs, pigments ou agents de polissage. Comme additif, on utilise principalement l'oxyde de cérium Ce_2O_3 . Le Cérium peut être stable sous les formes Ce^{III} et Ce^{IV} et ses propriétés d'oxydo-réduction permettent d'oxyder de nombreuses impuretés métalliques présentes dans les verres, notamment le Fe^{II} . Ce_2O_3 bloque également les UV et est utilisé comme agent anti-brunissant dans les verres et polymères utilisés pour les écrans (Bünzli, 2022). Comme pigment, le Pr (vert), le Nd (violet) et l'Er (rose) sont utilisés pour colorer les verres et céramiques. Les ETR peuvent être utilisées aussi comme dopant de pigments comme le Zircon (ZrSiO_4) dopé au Pr qui est un pigment jaune très robuste à haute température (McGill and Bünzli 2018). Il ne faut pas confondre le Zircon (ZrSiO_4) avec la Zirconie (ZrO_2) qui est une céramique et qui peut aussi être stabilisée par l'ajout d'oxydes de Ce ou Y pour des applications dans les capteurs, les outils de coupe, les matériaux réfractaires, certains implants dentaires, voire la bijouterie fantaisie (McGill & Bünzli, 2018). Le sulfure de cérium (Ce_2S_3) est utilisé comme alternative aux pigments à base de métaux lourds comme les sulfo-seleniures de cadmium (McGill & Bünzli, 2018). Enfin et surtout, les oxydes de cérium et lanthane sont utilisés à très fort tonnage (environ 20% de la consommation mondiale d'ETR) comme agent de polissage du verre. La pureté et la morphologie des poudres de polissage peuvent être adaptées à la qualité de polissage requise et sont utilisées pour polir tout type de verre, des écrans d'ordinateur aux fenêtres de maison et aux composants optiques (par exemple, le télescope de Hubble) (Bünzli, 2022). Pour toutes ces applications, aucune étude ne figure dans le corpus, c'est-à-dire qu'aucune étude récente montrant une comparaison avec ou sans ETR ou une substituabilité entre ETR n'a été identifiée. Les seules applications relevées sont les verres pour applications utilisant des rayonnements ionisants et surtout les verres pour applications telecom.

2.1.3.1 Verres et rayonnement ionisants

Les verres destinés à des applications dans le spatial, l'immobilisation de déchets nucléaires de haute activité ou la protection aux rayonnements ionisants (principalement gamma...) peuvent être protégés de la dégradation induite par les rayonnements via un dopage par des oxydes d'ETR. **Bien qu'utilisés à l'état de traces**, la proportion de la consommation d'ETR dans les verres représentait 6% de la consommation d'ETR totale en 2020 soit 10,7kt. L'oxyde de cérium (dans sa version CeO_2) peut être utilisé dans des verres de silicates (Xinjie et al., 2014) et de borates. Pour ces derniers, l'ajout doit être très faible afin de ne pas modifier les propriétés de vitrification du verre ; son remplacement par de l'oxyde de cuivre (Cu_2O_3) est inefficace (Gomaa et al., 2024). Le dopage à l'oxyde de samarium (Sm_2O_3) des verres de borates a semblé prometteur alors que celui à l'oxyde de dysprosium (Dy_2O_3) est inefficace (Farmer et al., 2006). D'autres matériaux amorphes tels que les revêtements métalliques amorphes à base de Fe peuvent être utilisés pour l'immobilisation de déchets nucléaires et leur résistance à la corrosion est améliorée par l'ajout de faibles quantités d 'Y (Farmer et al., 2006).

Dans le cas de verres d'aluminosilicates destinés à des applications en fibres optiques pour le spatial, les fibres dopées aux ETR sont plus sensibles à la dégradation par rayonnement ionisant que celles sans ETR, non pas à cause des ETR mais à cause de l'effet de la matrice utilisée pour stabiliser les ETR (Girard et al., 2010).

En France, les déchets radioactifs de haute activité sont traités par un processus de calcination puis vitrifiés dans des verres d'alumino-borosilicates dopés avec diverses ETR (Nd, La, Ce...) à hauteur de 5%. Outre la résistance aux radiations, ce dopage aux ETR permet d'améliorer l'efficacité de la vitrification en formant des phases intermédiaires qui optimisent la cinétique de dissolution (modification des propriétés de fusion et de viscosité du verre) et donc la capacité de chargement des déchets dans le verre. Cela signifie qu'une plus grande quantité de déchets radioactifs peut être immobilisée dans la matrice du verre sans en compromettre la stabilité (Nabyl et al., 2024).

Pertinence du corpus : corpus faible par rapport aux usages connus.

Tendance visible depuis la littérature : l'ajout d'oxyde d'ETR est efficace pour protéger les verres (ou leur assurer une fonction de protection) des radiations. Usage dispersif d'ETR, à l'état de traces (dopants). Pas d'alternatives aux ETR clairement identifiées.

2.1.3.2 Verres pour application telecom (fibres optiques...)

Les fibres optiques utilisées pour les applications télécom longue distance opèrent principalement à des longueurs d'onde de 1530-1560 nm (bande C) et 1650-1610 nm (bande L). Afin d'optimiser la qualité de transmission, des amplificateurs optiques sont utilisés, car le signal s'atténue au-delà de 50 Km de distance. Il existe plusieurs types d'amplificateurs : les EDFA (Erbium-doped fiber amplifiers), EDWA (Erbium-doped waveguide amplifier), SOA (Semi-conductor optical amplifiers, basés sur des semi-conducteurs de type GaAs/AlGaAs, InP/InGaAs, etc...) et Raman.

Les amplificateurs à l'Erbium dans les fibres optiques dites libres (EDFAs) sont les plus courants. La technologie est robuste, la purification des EDFA est parfaitement maîtrisée et permet des pertes extrêmement faibles. Peu de substituabilité de l' Er^{3+} est envisageable même si récemment, des amplificateurs optiques au Thulium (Tm^{3+}) nommés par analogie TDFA (Thulium-doped fiber amplifiers) ont été proposés (Mohd Mansoor Khan & Ramesh Kumar Sonkar, 2019). Leur applicabilité semble

cependant faible, car elle impose un changement de longueur d'onde d'usage (1470 nm) peu envisageable sur les infrastructures mondiales.

Les amplificateurs à guide d'ondes (Erbium-doped waveguide amplifier, EDWA) sont un autre type d'amplificateurs et sont produits sur des substrats plans via des méthodes proches de celles des circuits intégrés électroniques. Ces derniers sont donc plus compacts et plus intégrables. Le dopage aux ETR peut aussi se faire sous forme de nanoparticules afin de maximiser l'efficacité d'amplification (Blanc et al., 2019). À l'état de prototype, les EDWA peuvent être combinés à des verres de chalcogénures, qui possèdent une très large gamme de longueurs d'onde de transmission (500-25000 nm), mais encore peu de dispositifs efficaces d'amplification du signal (Yan et al., 2015). Par conséquent des EDWA « on-chip » ont été développés très récemment en utilisant une combinaison de GdSbS et de film mince d'alumine fortement dopé à l'Erbium (C. Wang et al., 2024).

Les SOA (Semi-conductor optical amplifiers) ont été postulés au début des années 2000 comme remplaçants efficaces aux amplificateurs contenant des ETR (EDFA et EDWA). Ils sont basés sur des technologies utilisant principalement des semiconducteurs GaAs/AlGaAs, InP/InGaAs, InP/InGaAsP and InP/InAlGaAs (Mecozzi & Wiesenfeld, 2001; Spiekman & Piehler, 2011). Les publications sont pourtant anciennes et les EDFA dominant toujours l'usage.

Pertinence du corpus : corpus faible par rapport aux usages connus.

Tendance visible depuis la littérature : Les dispositifs d'amplification de signal les plus efficaces pour les applications en télécommunication optique sont basés sur les EDFA (Erbium-doped fiber amplifiers) et EDWA (Erbium-doped waveguide amplifier) qui impliquent un usage très dispersif d'ETR, où l' Er^{3+} est utilisé à l'état de traces (dopants). Pas d'alternatives raisonnables aux ETR identifiées.

L'évolution de l'usage semble faible, avec une prévalence pour les amplificateurs à guide d'onde (EDWA, Erbium-doped waveguide amplifier) car plus compacts et intégrables. L'impact et l'applicabilité des dispositifs alternatifs (SOA, (Semi-conductor optical amplifier) et Raman) sont difficiles à évaluer sur la base du corpus.

2.1.4 Applications en santé

Les ETR ont permis des avancées majeures dans plusieurs domaines de la santé. En radiographie à rayons X, les phosphores de lanthanide ont depuis longtemps supplanté le tungstate de calcium dans les écrans intensificateurs de rayons X, ce qui a permis de réduire considérablement les doses de rayons X et d'ouvrir la voie à la radiographie médicale à contraste de couleur. Les phosphores types sont $\text{Ln}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ ($\text{Ln} = \text{La}, \text{Ce}$), BaFCl:Eu , LaOBr:Ln ($\text{Ln} = \text{Tb}, \text{Tm}$). Les bio-sondes luminescentes (LLB, Lanthanide Luminescent Bioprobes) sont utilisées pour des analyses nécessitant de la détection résolue en temps, par exemple, les dosages immunologiques, l'analyse de l'ADN, la détection d'analytes et l'imagerie cellulaire. Certaines études montrent des TRL élevés (Bünzli, 2009, 2010). Enfin, plusieurs isotopes radioactifs d'ETR entrent dans la composition de produits radio-pharmaceutiques destinés à la radiothérapie du cancer (Bünzli, 2022). Pour toutes ces applications, aucune étude ne figure dans le corpus, c'est-à-dire qu'aucune étude récente montrant une comparaison avec ou sans ETR ou une substituabilité entre ETR n'a été identifiée. Les seules applications relevées sont les lasers médicaux et les agents de contrastes pour l'IRM.

2.1.4.1 Lasers

Il n'y a pas de publications comparatives de lasers haute puissance avec et sans ETR dans le corpus. Aucune occurrence ne concerne les lasers YAG:Nd de forte puissance qui sont pourtant abondamment utilisés par exemple pour la fabrication et découpe de matériaux ou dans les installations expérimentales de fusion nucléaire où ils peuvent fournir jusqu'à 500 TW (Bünzli, 2022). Les seules analyses comparatives de l'usage de lasers aux ETR se concentrent dans le domaine de la santé où les lasers de faible puissance sont utilisés.

La plupart des lasers pour applications médicales font appel à des technologies basées sur les ETR, principalement des lasers au Néodyme (YAG:Nd, 1060 nm, ou YAG est Yttrium-Aluminium Garnet), à l'Holmium (YAG:Ho, 2100 nm), et au Thulium (YAG:Tm, 2100 nm). Le taux de dopage en ETR étant autour de 1% en masse. En 2018, on listait près de 12500 études liées à l'utilisation de lasers à base d'ETR en santé : ophtalmologie, gastro-entérologie, chirurgie vasculaire, radiologie interventionnelle, pneumologie, dermatologie et urologie (Kronenberg & Somani, 2018).

Deux applications particulières montrent une substitution entre ETR avec un passage du laser YAG:Ho vers le laser YAG:Tm : la lithotripsie (le traitement de calculs rénaux trop gros pour traverser les voies urinaires) et de l'adénomectomie prostatique (ablation de la prostate dans le cas d'hypertrophie bénigne).

Dans le cas de la lithotripsie, l'usage de laser YAG:Ho est désormais ancien (30 ans) et très robuste en termes de sécurité, car applicable à tout groupe de patients (enfants, adultes, femmes enceintes, patients sous anti-coagulants...). On utilise les lasers YAG:Ho à cause de leur capacité à fonctionner en mode pulsé, le mode continu étant inadapté à ce type d'intervention. Leur optimisation vers des lasers plus efficaces YAG:Ho dits « femtoseconde » semble possible (essais in-vitro (S. Yang et al., 2023)). D'autres types de laser, les lasers YAG:Tm, peuvent aussi fonctionner en mode pulsé depuis quelques années et devraient permettre des interventions 2 à 4 fois plus rapides, sous réserve d'essais cliniques concluants (Kronenberg & Somani, 2018). Il est aussi à noter qu'en condition d'usage, les lasers YAG:Tm sont beaucoup moins sujet à la dégradation de leur pointe que les lasers YAG:Ho (Wilson et al., 2016). De plus, si les fibres optiques auxquelles ils sont associés bénéficient de revêtement anti-réflexion, la transmission est maximisée et le risque de désactivation abusive du laser diminué (détection anormale de lumière réfléchié induisant une coupure du faisceau par sécurité) (Wilson et al., 2017).

Dans le cas de l'adénomectomie prostatique, la revue de Wani et al. (14 études regroupant 2500 patients (Wani et al., 2020)) montre là aussi une substitution possible des lasers YAG:Ho par des lasers YAG:Tm, car ce dernier est aussi efficace cliniquement tout en étant associé à une durée sous cathéter réduite et donc une durée plus courte d'hospitalisation du patient. De plus, la légèreté du laser YAG:Tm, sa robustesse, son entretien réduit et sa faible consommation énergétique le rendent attractif en termes de coût. Ce résultat est confirmé par l'étude récente sur 1328 patients (Petov et al., 2022) où le bénéfice de l'utilisation du laser YAG:Tm est démontré quel que soit le groupe de patients et le volume de l'ablation pratiquée. Les complications post-opératoires sont aussi diminuées.

Peu d'alternatives à l'usage de lasers aux ETR sont retrouvées dans le corpus d'articles à l'exception des interventions sur les complications post-opératoires de chirurgie de la cataracte (apparition de perles d'Elschnig (Bhargava et al., 2013) et syndrome de distension de sac capsulaire (Bhattacharjee et al., 2014; Kollias et al., 2010) où des techniques mécaniques peuvent se substituer au laser YAG:Nd.

Le Tm^{3+} ou l' Er^{3+} utilisé comme sensibilisateur dans des lasers de verre de germanosilicates dopés à l'Holmium (Ho^{3+}) (émission à 2000 nm) peuvent être substitués par du Bismuth (Bi^{3+}) (Cao et al., 2018), mais l'applicabilité en condition réelle dans le domaine de la santé reste à démontrer.

Pertinence du corpus : corpus pertinent dans le cadre de la lithotripsie et de l'adénomectomie prostatique. Cependant, peu d'autres usages où la substitution d'ETR est évoquée.

Tendance visible depuis la littérature : dans le cas de la lithotripsie et de l'adénomectomie prostatique, les lasers YAG:Ho sont progressivement remplacés par des lasers YAG:Tm, aussi efficaces cliniquement, mais diminuant les durées et complications post-opératoires pour le patient, ainsi que le coût et la périodicité de maintenance de l'équipement. Usage d'ETR pour ces applications est dispersif, utilisés à l'état de traces (dopants). Pas d'alternatives raisonnables aux ETR identifiées.

2.1.4.2 Agents de contraste pour l'imagerie médicale

L'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) est une des techniques de diagnostic clinique les plus répandues, car elle est non-invasive, rapide et procure une très bonne résolution spatiale tout en évitant l'usage de radionucléides.

Selon les cas, les examens d'IRM peuvent-être facilités par l'usage d'agents de contraste à base de Gadolinium (Bonnet & Tóth, 2024; Bottrill et al., 2006). Ces molécules appelées GBCA, pour « Gadolinium-Based Contrast Agent », permettent par exemple de diagnostiquer et de caractériser les états pathologiques affectant le système nerveux central (Essig et al., 2012). Ainsi, les cancers du cerveau primaires et métastatiques, la sclérose en plaques et les accidents vasculaires cérébraux entraînent tous une perturbation de la barrière hémato-encéphalique qui est facilement détectable par IRM utilisant des GBCA. On estime qu'environ 10 millions de doses de GBCA sont injectées chaque année soit près de 450 millions de doses depuis 1988 (Gale & Caravan, 2018; Levine et al., 2018). Cela représente une consommation annuelle de Gd_2O_3 estimée entre 22 et 66 tonnes (Thomsen, 2017).

En France, comme dans la plupart des pays développés, la tendance est à l'augmentation de l'usage avec une croissance estimée du nombre de machines d'IRM estimée à 62% de 2011 à 2018 et corrélée avec une augmentation de l'utilisation de GBCA de 64%. On estime que chaque machine utilise de 3.12 à 3.37 kg de Gd, soit 32 à 45 kg par million d'habitants par an, avec une projection de consommation de 44 tonnes de GBCA pour les dix prochaines années. Dans le cas de l'ouest de la Bretagne, des GBCA ont été utilisés dans 40% des examens d'IRM, principalement pour de l'imagerie cérébrale (Chazot et al., 2020; Ognard et al., 2020).

Selon la Haute Autorité de Santé, la plupart des GBCA offrent un « service médical rendu » important. Il existe deux catégories principales de GBCA : les GBCA linéaires (commercialisés sous le nom de OMNISCAN®, MAGNEVIST®, MULTIHANCE®) et macrocycliques (DOTAREM® (en générique CLARISCAN) PROHANCE®, GADOVIST®, ARTIREM®...). Les GBCA linéaires ne sont plus sur le marché, car ils se sont révélés toxiques (libération de Gd^{3+}), et seuls les GBCA macrocycliques sont encore utilisés.

À la suite de signalements en 2006 (Grobner, 2006), de recommandations en 2013 (Kanal & Tweedle, 2015) et de directives en 2017 de la Food and Drug Administration (FDA) américaine puis de l'European Medicines Agency (EMA, <https://www.ema.europa.eu/en/medicines/human/referrals/gadolinium-containing-contrast-agents>), l'administration des GBCA est désormais proscrite chez les patients atteints

d'insuffisances rénales, en raison du risque de fibrose systémique néphrogénique observé dans cette population.

En France, le GBCA le plus courant est le DOTAREM® (fabrication à hauteur de plus d'une centaine de tonnes par an par la société Guerbet) ou sa forme générique CLARISCAN Gé® (commercialisé en moindre quantité par *GE Healthcare*). Un nouveau GBCA plus performant, le Gadopicienol (ELUCIREM®, Guerbet/Bracco) arrive sur le marché et permet d'injecter deux fois moins de produit pour une même efficacité diagnostique.

Agents de contraste alternatifs aux GBCA : les articles rapportant des alternatives aux GBCA actuels sont nombreux (Runge & Heverhagen, 2024). Toutefois, les auteurs d'articles de revue ayant analysé cette littérature (Bottrill et al., 2006; Gupta et al., 2020) soulignent que la grande majorité des publications concerne des travaux à faible niveau de TRL où les chercheurs eux-mêmes admettent une applicabilité lointaine (Viswanathan et al., 2010; Wesolowski & Kaiser, 2016) et pas ou peu d'essais cliniques.

Néanmoins Gale et Caravan (Gale & Caravan, 2018), montrent comment les nouvelles directives de 2017 de la FDA et de l'EMA, imposant des précautions d'administration des GBCA ont stimulé une intense recherche sur plusieurs types d'alternatives crédibles basées sur des ions paramagnétiques peu coûteux et compatibles avec le métabolisme humain :

Les nanoparticules superparamagnétiques d'oxyde de Fe^{3+} , Fe_3O_4 , également appelées Iron oxide nanoparticles (IONP) (O'Shea et al., 2020), ainsi que complexes solubles de Fe^{3+} (Boehm-Sturm et al., 2018; Y. Li et al., 2016). Le fer est abondant, peu coûteux et compatible avec le métabolisme humain et il représente une alternative prometteuse. Le Ferumoxytol (FERAHEME®), initialement utilisé comme supplément en cas d'anémie a été largement étudié pour ces potentielles propriétés d'agent de contraste (Bao et al., 2018; Gupta et al., 2020; Mustafa R. Bashir Md et al., 2015). Il est désormais employé en imagerie vasculaire pour compléter ou partiellement se substituer à des analyses utilisant des GBCA (Jalili et al., 2022; C. U. Lee et al., 2020; Luhar et al., 2016; Muehe et al., 2018; Nayak et al., 2015; Pham et al., 2019; Schubert et al., 2017; Stoumpos et al., 2020; Toth et al., 2017). Il est remarquablement toléré par les patients (Ahmad et al., 2021; Nguyen et al., 2019; Varallyay et al., 2017) y compris les femmes enceintes (Starekova et al., 2023). D'autres alternatives au Ferumoxytol émergent notamment les Ferumoxides (ENDOREM®, FERIDEX®) et le Ferucarbotran (RESOVIST®) destinés à l'imagerie du foie et/ou de la rate), mais encore à un stade précoce de développement et donc faible TRL (Y. Cai et al., 2019; Jeon et al., 2021; Rodrigo Ken Kawassaki et al., 2023; Wei et al., 2017; J. Zhang et al., 2023).

Les composés à base de Mn^{2+} sont eux développés dans l'objectif de se substituer entièrement aux GBCA (Gupta et al., 2020). Le principal composé ayant atteint le marché était le Mangafodipir trisodique (TESLASCAN®) utilisé pour l'imagerie hépatique, mais il a été retiré en 2012 pour des raisons commerciales en 2012. Malgré de nombreux travaux (Z. Cai et al., 2024; Cheng et al., 2014; Davis & Lazar, 2021; Hai-Ling Margaret Cheng PhD et al., 2014; Nystrom et al., 2022), ainsi que des essais in vivo (Gale et al., 2015) et cliniques prometteurs (Bianchi et al., 2017; Bonner et al., 2023) aucun nouvel agent de contraste à base de Mn^{2+} n'a encore dépassé un TRL supérieur à 6.

Les molécules organiques et les agents CEST (Chemical Exchange Saturation Transfer) (Hilt et al., 2017; McMahon et al., 2017; Viswanathan et al., 2010) sont également en cours de développement. Les agents CEST forment une sous-discipline de l'IRM apparue en 2000 (Ward et al., 2000) et connaissent un essor important. Contrairement aux agents de contraste

classiques qui agissent via la relaxation des protons, les agents CEST fonctionnent en réduisant sélectivement la magnétisation du signal de l'eau en utilisant des protons échangeables présents dans leurs molécules. On distingue deux catégories principales : les agents dia- (DIACEST) ou paramagnétiques (PARACEST). Ces derniers sont principalement basés sur des ions lanthanides, mais récemment certains métaux de transition ont été proposés comme alternative (Morrow et al., 2017). Par ailleurs, les études cliniques d'imagerie CEST commencent à émerger (Pavuluri et al., 2022; Viswanathan et al., 2010).

Imagerie sans utilisation d'agents de contraste : Une alternative à l'injection de GBCA consiste à modifier les séquences IRM afin d'obtenir des images de qualité comparable.

On utilise ainsi des séquences de susceptibilité magnétique (SWI, susceptibility-weighted imaging, séquence écho de gradient avec un contraste optimisé pour visualiser les structures veineuses) (Caruana et al., 2022) ou de marquage des spins artériels (ASL, arterial spin labeling, quantification du débit sanguin cérébral) (Boschheidgen et al., 2021; Mirasol et al., 2014).

Dans le cas de la résonance magnétique cardiovasculaire (CMR, Cardiac Magnetic Resonance), utilisée pour l'imagerie de la structure ventriculaire, l'approche conventionnelle basée sur le rehaussement tardif au gadolinium (LGE, late gadolinium enhancement) peut être remplacée par plusieurs séquences IRM alternatives cliniquement testées et validées telles que la cartographie T1 native (Ferreira et al., 2014), la précession libre équilibrée à l'état stable (bSSFP, Balanced Steady-State Free Precession) (Stromp et al., 2015), la combinaison bSSFP et écho de spin rapide 3D (3D FSE, Fast Spin Echo) (Henningsson et al., 2018), le transfert hybride de T1 et de magnétisation (HYTOM, Hybrid T1 and Magnetization Transfer) (C. Duan et al., 2019), le transfert quantitatif de magnétisation (qMT, Quantitative Magnetization Transfer) (Lopez et al., 2021), la factorisation de la convolution 4D (Amyar et al., 2023).

Certaines techniques d'imagerie telle que l'imagerie par tenseur de diffusion (DTI, Diffusion Tensor Imaging) (Shenton et al., 2012), l'imagerie pondérée en diffusion (DWI, Diffusion Weighted Imaging) (Soyer et al., 2011), l'IRM multiparamétrique (mp-MRI) (Zidan & Elghazaly, 2014)) peuvent être complémentaires ou se substituer à celles utilisant des GBCA.

Enfin, l'intelligence artificielle représente une alternative clé dont l'adoption progresse rapidement. Son utilisation en CMR est particulièrement prometteuse : par exemple, elle permet d'obtenir des images diagnostiques en 1 seconde au lieu de 15 minutes avec une précision équivalente à la LGE (H. Zhang, Zhou, et al., 2021; Q. Zhang et al., 2021). L'IA est également utilisée dans le suivi de l'ablation de fibromes utérins, améliorant l'efficacité et la rapidité des diagnostics (Slotman et al., 2023).

Pertinence du corpus : le corpus semble globalement pertinent, bien que les articles portant sur des essais cliniques soient sous-représentés par rapport aux études fondamentales.

Tendance visible depuis la littérature : l'usage des agents de contraste à base de gadolinium (GBCA, Gadolinium-Based Contrast Agent) est extrêmement répandu et repose sur une base clinique solide. En France, l'augmentation de la demande en GBCA suit directement l'augmentation du nombre de machines d'IRM. Les recherches actuelles sur les GBCA se concentrent principalement sur la réduction de leur usage chez les patients atteints d'insuffisances rénales. Plusieurs voies sont explorées : diminuer la dose de GBCA en développant des agents plus efficaces comme le Gadopiclenol ou remplacer les GBCA par des agents alternatifs à base de Fe^{3+} (Ferumoxytol) ou de Mn^{2+} ; le premier étant le plus utilisé. La recherche sur les agents CEST (Chemical Exchange Saturation Transfer) avec ou sans ions métalliques est importante bien que ces approches restent à un niveau de TRL encore modéré. L'alternative aux GBCA la plus aboutie réside dans la modification des séquences IRM et/ou dans l'utilisation de l'intelligence artificielle pour l'analyse d'image.

2.1.5 Applications pour la métallurgie

Les ETR sont des éléments oxophiles, qui se lient facilement à l'oxygène ainsi qu'à l'azote et au soufre. Par conséquent leur ajout dans les métaux ou alliages permet de piéger des impuretés faites d'oxydes, nitrures ou sulfures souvent responsables de pertes de propriétés mécaniques. Elles favorisent également l'apparition et l'adhérence de couche d'oxydes protectrices à la surface des métaux (passivation), les protégeant ainsi contre la corrosion (McGill & Bünzli, 2018). L'ajout est souvent inférieur à 1% en masse mais représente une part significative de la consommation d'ETR en 2020 (8% soit 13,7kt)

Lors de la production d'acier (alliage principalement à base de Fe et C), la formation d'inclusions (ou impuretés) est inévitable. Elles présentent des propriétés physiques très différentes de celles de l'acier altérant sa microstructure et donc ses propriétés physiques, ses performances et sa durée de vie (Zerbst et al., 2019). On utilise alors des modificateurs qui en réagissant avec les inclusions permettent d'en modérer, voire d'en optimiser les effets. Le Ca et le Mg sont utilisés, mais posent des problèmes de résistance à la corrosion. Au contraire, les ETR sont particulièrement performantes dans ce domaine et plus spécifiquement La, Ce et Y (par exemple (F. Ji et al., 2021; H. Li et al., 2023)). Elles se lient aux impuretés et en diminuent la taille et la dispersion de taille. Les quantités d'ajouts sont de l'ordre de 100 à 1000 ppm selon les aciers et les process utilisés. Les principales propriétés optimisées sont la dureté, le coefficient de dilatation thermique et le module élastique (X. Wang et al., 2024).

Les alliages à base de magnésium sont caractérisés par leur légèreté, rapport résistance/poids élevé, résistance à la corrosion et sont utilisés principalement dans les domaines de l'automobile et de l'aérospatiale comme une alternative plus légère à l'aluminium pur. Les plus courants contiennent de l'aluminium ou du zinc et peuvent être moulés (« cast alloys ») ou corroyés (« wrought alloys », alliages fabriqués par des procédés de déformation mécanique, tels que le laminage, l'extrusion ou le forgeage). Ils sont commercialement nommés via une nomenclature non-chimique (ASTM, B951-11(2018)) notant leur composition en masse (AZ63 correspond à du magnésium allié à de l'aluminium (6% en masse) et du zinc (3%)). L'ajout d'ETR (notés E, ou W pour Y) permet d'obtenir des alliages présentant de plus fortes capacités de durcissement par vieillissement, faible fatigue (Mirza et al., 2013c, 2013a, 2015, 2016; Mirza & Chen, 2014; Mokdad & Chen, 2015), forte stabilité thermique (W. Sun et al., 2023), forte limite d'écrouissage (Mirza et al., 2013b), résistance au fluage (Golmakaniyoon & Mahmudi, 2011), résistance à la corrosion (Dai et al., 2018; Padekar et al., 2011) et surtout possédant de très fortes limites d'élasticité (400-600 MPa) (S. Wang et al., 2023). Les ETR ajoutées dans les alliages commerciaux sont principalement Y et Nd (par exemple (Dargusch et al., 2022; Q. Shi & Allison, 2024; Tang et al., 2020) voire du mischmetal (AE44, QE 22). De nombreuses études portent sur d'autres ETR comme La, Ce (principalement wrought alloys), Nd (cast alloy WE43 pour implants médicaux biodégradables (Willbold et al., 2015) ou Sm (S. Wang et al., 2023)).

Les alliages à base de magnésium avec ou sans ETR ont de faibles ductilités ce qui peut être un obstacle à certaines applications (Jin et al., 2022). Cette difficulté est contournée en formant des alliages quaternaires et quinaires au Zn et Zr (notés ZEK, (Basu & Al-Samman, 2014; Boba et al., 2017; Deng et al., 2022; Macwan & Chen, 2016; Mokdad & Chen, 2015; W. Sun et al., 2023; Wan et al., 2015; Z. Yu et al., 2023; D. Zhang et al., 2019) et dans certains cas des alliages contenant du Ca (Dai et al., 2018; Langelier et al., 2015; B. Li et al., 2023; Q. Shi et al., 2023). On observe une tendance à diminuer la quantité d'ETR dans les alliages à base de magnésium sans pour autant égaler leurs performances (S. Wang et al., 2023). Ces modifications se font principalement pour des raisons de coût, d'approvisionnement, mais aussi de préservation de la faible densité des alliages (C. Liu et al., 2022; Mokdad & Chen, 2015; Pan et al., 2016; Peng et al., 2023; Somekawa et al., 2009; M. Wang et al., 2021; S. Wang et al., 2023; Z. Yu et al., 2023; D. Zhang et al., 2023).

Le dopage d'alliages contenant de l'aluminium par La et Y favorise la création et l'adhésion d'une couche dure et protectrice d'alumine, Al_2O_3 , comme observées sur les alliages de FeAl (D. Li et al., 2017; T. Zhang et al., 2000), FeCrAl (Issartel et al., 2017; Jedliński et al., 1996; Tolpygo, 1999; Tolpygo & Grabke, 1994), NiAl (Guo et al., 2014), NiAlCrC (Castello et al., 1999), et sur des revêtements à base d'AlCr. Des oxydes peuvent être directement ajoutés comme CeO pour l'alliage Al-6061 (Vipin Kumar Sharma & Kumar, 2019) ou formés à chaud lors de l'ajout de Ce (alliage FeAl (X. Yu & Yangshan Sun, 2003)).

Les alliages CoCr (nommés commercialement Stellite) sont des alliages de cobalt à la dureté et ténacité exceptionnelle et présentant une forte résistance à la corrosion et aux hautes températures. Ils sont utilisés pour les outils de coupe, les soupapes de moteurs à combustion, des pièces de turbines ou moteurs d'avions. L'ajout d'Y (0.5% en masse) à la Stellite 21 ou la Stellite 712 (Radu & Li, 2007) permet d'en augmenter très significativement la résistance à l'usure et spécialement à haute température.

De nombreux autres alliages peuvent être optimisés par l'ajout d'une faible concentration d'ETR tels que CuSn (Y (Zhou et al., 2014)), FeSi (Ce (X. Yu et al., 2020)), Titane TC4 (CeO_2 (Z. Li et al., 2023)), FeTiB2 (La et Ce (L. Zhang et al., 2021)), FeCoNi (Nd et Y (J. Zhu et al., 2023)), joints brasés sous vide d'alliages d'aluminium LD2 et LD30 (La, Ce (S. Wang et al., 2003)).

Alliages à très haute teneur en ETR : outre les alliages magnétiques (NdFeB, SmCo....voir partie 2.1.1.3.2), il existe également des alliages métalliques constitués quasi exclusivement d'ETR et à l'usage très répandu. Des exemples courants sont le Mischmetal (Ce à 55% La à 25%, Nd à 15-18%...Fe à 5%) connu pour son utilisation comme pierre à briquet et le dydinium (ou didymium) qui est un mélange de Nd et Pr. Il est utilisé dans la fabrication de filtres optiques, en particulier dans les lunettes de protection de soudeurs de verres ou forgerons. Pour ces usages, la substitution n'est pas clairement envisagée.

Pertinence du corpus : corpus vaste, mais la littérature est polluée par de nombreuses publications redondantes, incrémentales, fragmentées et/ou très peu citées. Par conséquent le taux de rejet lors du tri d'articles de cette catégorie est particulièrement élevé. En revanche, les publications conservées semblent fiables, comparent les alliages avec ou sans ETR, et permettent de fournir des conclusions robustes.

Tendance visible depuis la littérature : l'incorporation d'ETR et spécialement des ETR diamagnétiques comme La, Ce et Y dans des formulations d'alliages permet d'en améliorer de nombreuses propriétés physico-chimiques, principalement les propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion. L'ajout est souvent inférieur à 1% en masse. Il est à noter qu'aucun article du corpus ne démontre d'effet négatif de l'addition de faibles quantités d'ETR La, Ce et Y ; l'ajout des autres ETR en revanche est moins concluant.

2.1.6 Applications pour la catalyse

La plupart des réactions dites « de chimie durable » (conversion du CO_2 , génération de méthane depuis la biomasse, génération de H_2 ...) emploient des catalyseurs, dont de nombreux aux ETR. L'utilisation de catalyseurs est également un des 12 piliers de la « chimie verte », car elle permet d'augmenter les rendements des réactions et donc notamment d'en limiter les déchets. Cependant, les ETR sont utilisées depuis plus de 60 ans comme catalyseur de nombreuses réactions chimiques à l'échelle industrielle indépendamment de ces considérations, mais plutôt pour des raisons économiques d'augmentation de rendement. On distingue 3 principaux usages :

le craquage du pétrole. L'application la plus ancienne (1962) est la stabilisation structurale et chimique des zéolithes utilisées pour le craquage du pétrole par des procédés de craquage catalytique d'hydrocarbures en lit fluidisé (CCF, ou *fluid cracking catalysis FCC*). Les catalyseurs FCC sont utilisés pour la production de gaz de pétrole liquéfié (GPL), d'essence (50 % de la

consommation mondiale est produite par CCF), d'huiles légères utilisées dans le diesel et le kérosène, et de fioul lourd, ainsi que pour de nombreuses autres applications comme le gaz synthétique et l'huile de palme (Bünzli, 2022). Ces catalyseurs sont généralement des zéolithes d'Y stabilisées par échange d'ion avec d'autres ETR comme le La (≈ 3 wt %). Celles-ci permettent au catalyseur de rester acide, ce qui est essentiel pour la conversion de molécules de poids moléculaire élevé en espèces plus légères, en particulier dans les conditions très agressives de l'industrie pétrolière. Depuis 2013, BASF commercialise sous la marque PhinisseTM un catalyseur contenant du phosphore comme stabilisant (≈ 1 wt %) et permettant d'utiliser 50% d'ETR en moins, que les catalyseurs classiques grâce à l'effet combiné du P et du La sur la stabilisation de la zéolithe (Martínez et al., 2023).

La catalyse pour l'automobile. Le cérium sous forme d'oxyde (CeO_2 , ceria) est également largement utilisé dans des voitures à essence modernes comme catalyseur de post-combustion (pots catalytiques). Le cérium pouvant être tri- ou tétravalent, les propriétés d'oxydoréduction du CeO_2 en font un tampon d'oxygène qui stabilise la composition des gaz d'échappement et permet l'oxydation des oxydes d'azote (NO_x), du monoxyde de carbone (CO) et des hydrocarbures non brûlés, même lorsque le milieu est globalement réducteur. Ces catalyseurs ont été optimisés en formant des matrices $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2$ ou $\text{ZrO}_2/\text{CeO}_2$. Concernant les voitures diesel, une technologie également basée aussi sur de la cérine (mélange ferrocène/ CeO_2) a été développée par Solvay (Eolys). Elle permet de limiter l'encrassement des filtres à particules en réduisant notamment la température de combustion des suies. Elle équipait 10 millions de véhicules en 2015 (Bünzli 2022).

La synthèse de composés organiques. Les catalyseurs à base d'ETR sont utilisés à l'échelle industrielle dans de nombreuses réactions de synthèse en chimie organique comme l'alkylation, l'isomérisation, les approches de déhydrogenation/hydrogénation, les réactions de polymérisation, l'oxydation du CO ou des hydrocarbures (Bünzli, 2022). Des publications académiques sur ces réactions existent dans le corpus, mais sont peu significatives, car les TRL semblent bas (Bortolozzi et al., 2014; Serrano-Ruiz et al., 2007).

Les catalyseurs au nickel habituellement utilisés dans la production de butadiène (pour l'industrie de pneumatiques) ou la conversion du CO_2 en méthane (CH_4 , méthanation) sont progressivement remplacés par des catalyseurs contenant du Nd (H. Zhu et al., 2015), du Sm (Habazaki et al., 2000), de l'Y (C. Sun et al., 2021; Y. Wang et al., 2019), du La (Dahdah et al., 2017), de l' Eu_2O_3 (Mojgan Lottfali Kazemi et al., 2019), du mischmetal (Yamasaki et al., 1999) voire du Didymium (mélange Dy/Pr (Bünzli, 2022)). Dans chacune des études, la présence d'ETR améliore significativement les propriétés catalytiques des matrices considérées.

On peut cependant noter que dans le cas de l'éthanol steam reforming, (ESR) la méthode qui permet d'utiliser l'éthanol comme source de H_2 et nécessite des catalyseurs avec ou sans ETR (Anil et al., 2022); une étude montre que si en plus des paramètres techniques, des paramètres traduisant la « soutenabilité » du processus sont considérés (paramètres environnementaux, sanitaires, quantité de déchets, coût,...) alors les catalyseurs $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ sont plus performants selon ces critères que leurs homologues dopés au CeO_2 ou La_2O_3 (Omodara et al., 2020).

De récents développements montrent que l'utilisation des ETR est toujours bénéfique au rendement de la réaction chimique considérée. Ainsi des alliages PtNd sont plus stables et présentent des activités 3 à 7 fois plus importantes que les alliages PtC pour la réduction de l'oxygène (Fan et al., 2023). Les alliages $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ dopés au La sont efficaces pour les réactions d'hydrodéoxygénation pour la formation de biocarburants à partir de lignine (Escobar et al., 2023). L'oxyde d'Indium permet la réduction du Cr(VI) toxique s'il est dopé au Ce (Misganaw Alemu Zeleke & Kuo, 2021). Les oxydes de Sm_2O_3 , Y_2O_3 and Gd_2O_3 dopés au Ru (1wt%) sont jusqu'à 20 fois plus performantes que des oxydes de TiO_2 , ZnO et CeO_2 , pour la production d' H_2 à partir d'ammoniac (K. Xu et al., 2024). Des photocatalyseurs à bases d'ETR sont

également largement utilisés, et sont principalement basés sur de l'oxyde de titane (TiO_2) dopé à l' Er^{3+} , Yb^{3+} ou La^{3+} . Par exemple, l'ETR y augmente les activités photocatalytiques pour des procédés de photodégradation de l'acide formique (Meksi et al., 2015), de l'acétone et du monoxyde d'azote (catalyseurs recyclés (Ho et al., 2019)). Une approche plus innovante consiste à utiliser des composés à longue phosphorescence (avec ou sans ETR) comme source de rayonnement pour la photocatalyse (Kang et al., 2021). Pour tous ces développements, les TRL associés semblent encore bas.

Pertinence du corpus : le corpus est réduit et est un de ceux qui présentent le plus d'écart entre volume d'utilisation connue d'ETR (17% des usages d'ETR consommés en 2020 soit 27,8kt) et nombres de publications recensées (seulement 18 articles pertinents sur les 39 analysés). Compte tenu de l'ancienneté de la discipline et de la puissance économiques des secteurs associés, il est raisonnable de penser que la plupart des avancées sont non divulguées et couvertes par le secret industriel ou protégées (publication sous forme de brevets).

Tendance visible depuis la littérature : La plupart des publications trouvées sont à faible TRL. L'utilisation des ETR présente souvent un avantage important. Dans le cas des catalyseurs pour le cracking du pétrole brut (FCC), une tendance est à la réduction de l'utilisation des ETR comme stabilisant des zéolithes, au profit de mélanges ETR et phosphore. Au contraire, les catalyseurs au Nickel utilisés pour de nombreuses réactions sont substitués par des catalyseurs aux ETR qui montrent des augmentations de rendements significatives. Une étude montre cependant que cet avantage s'efface si des critères autres que techniques sont considérés.

2.1.7 Applications pour le stockage de l'énergie

Batteries NiMH. En raison de préoccupations environnementales (toxicité des métaux) et d'amélioration des performances, les accumulateurs au plomb et au cadmium ont été progressivement remplacés depuis le début des années 1990 par les batteries nickel-métal-hydrures (NiMH). Cet usage correspondait à 5% en masse des usages d'ETR en 2020 soit 8 kt. On distingue principalement deux types de batteries NiMH, les petites cylindriques pour les usages portables et les prismatiques, utilisées dans les véhicules électriques. En 2016, 70% du marché mondial des batteries NiMH était utilisé pour les véhicules électriques, ce succès étant lié à leur utilisation dès 1997 dans les Toyota Prius, avec un pic d'utilisation au cours des années 2000. Les volumes de batteries NiMH sont très difficiles à connaître, et il y a peu d'informations dans les articles scientifiques. Entre 2012 et 2014, un article indique que l'exportation chinoise (1ère production mondiale de batteries NiMH) est de l'ordre de 500 millions d'unités par an (Ouyang et al., 2017).

Dans les batteries NiMH, les ETR sont contenus uniquement dans la masse active des anodes, sous forme d'un alliage métallique de type A_xB_y où A est un mélange d'ETR et B un mélange de métaux de transition (Ni, Co). Bien que l'alliage pur LaNi_5 présente les meilleures propriétés de stockage d'énergie, un mélange d'ETR et d'autres métaux de transition appelée « mischmetal » est souvent utilisé afin de réduire les coûts. La teneur totale en ETR est de l'ordre de 2 à 3 kg par véhicule électrique (G. Xu et al., 2016). Les ETR comptent pour environ 30 mas.% de la masse des anodes (Korkmaz et al., 2018; Larsson et al., 2013), avec la répartition suivante (en % massique) : La 60-68%, Ce 21-26%, Nd 5.5-9.0 %, Pr 2.0-7.0 % et Y environ 1 % (Ebin et al., 2018; Zielinski et al., 2020).

Aujourd'hui, ces batteries sont désormais largement supplantées par les batteries lithium-ion, mais un stock important reste en circulation et il reste certains usages pour les NiMH, notamment du fait d'une plage de température d'utilisation plus large.

Piles à combustible. L'addition d'ETR (La, Ce, Dy) dans les systèmes de piles à combustible basés sur des sels de carbonate fondu (MCFC, molten carbonate fuel cell) permet d'améliorer les comportements des matériaux constituant la cathode, l'électrolyte, l'anode et aussi les catalyseurs (Wee & Lee, 2006).

Dans le cas des piles à combustibles solides (SOFC, solid oxide fuel cells) en revanche, l' Y^{3+} entrant dans la composition des cathodes peut être substitué efficacement par du Ca^{2+} (Du et al., 2017).

La technologie des **batteries redox-flow** (RFB, Redox flow batteries) constitue une des voies de stockage de l'énergie à grande échelle les plus prometteuses. Elle est principalement basée sur des électrolytes à base de Vanadium (et éventuellement Zn, Fe ou Cr). Une alternative basée sur le couple Zn-Ce se développe, mais reste à TRL moyen (Walsh et al., 2015).

Pertinence du corpus : le corpus est très réduit et très peu d'articles liés aux applications de stockage d'énergie pour la mobilité électrique sont trouvés.

Tendance visible depuis la littérature : D'après le corpus, uniquement des développements de niche avec des TRL globalement bas.

2.1.8 Conclusion

À l'échelle du matériau où l'on peut distinguer, de manière arbitraire, les matériaux à forte teneur en ETR (> 10 % en masse) tels que les aimants permanents, les poudres de polissage ou les phosphores, et les matériaux à faible teneur en ETR (< 10 % en masse et parfois de l'ordre du 1 mg / kg soit 0, 000 1 %) tels que les verres avec des enjeux de substitution qui peuvent varier entre ces 2 familles.

Contrairement aux matériaux à fortes teneurs en ETR, l'utilisation de matériaux contenant de faibles teneurs d'ETR ne stimule pas particulièrement les efforts de recherche en matière de substitution ou de réduction, car les volumes concernés et/ou les coûts associés sont limités, tandis que les gains fonctionnels apportés justifient leur maintien dans les dispositifs. C'est une problématique importante pour le recyclage où les boucles courtes* restent possibles, mais où les boucles longues sont complexes et coûteuses (voir chapitre III).

2.1.8.1 Matériaux à fortes teneurs en ETR

Aimants : Le corpus est à l'image des usages, à la fois important en volume et étendu en niveau de TRL. Il décrit la synthèse de nouveaux aimants contenant moins d'ETR, moins d'ETR lourds ou pas d'ETR.

L'utilisation des aimants est surtout documentée pour les secteurs des machines électriques de générateurs éoliens ou les véhicules électriques, les autres usages étant soit moins, peu ou pas critiques du point de vue des performances, soit liés à des produits à haute valeur ajoutée représentant un volume beaucoup plus faible et pour lesquels le prix de l'aimant est négligeable (électronique domestique, horlogerie...). Pour ces deux secteurs critiques, plusieurs voies sont à l'étude avec des niveaux de maturité différents. La réduction des ETR lourds est la voie la plus directe, elle consiste à infiltrer les ETR lourds dans les joints de grain (interface entre les grains cristallins) plutôt que dans le volume des grains, afin d'en réduire la proportion d'un facteur 2 environ à performances constantes. Pour des utilisations à température ambiante, la voie du panachage peut être envisagée. Elle consiste à remplacer une partie du néodyme par des ETR moins ou pas critiques (praséodyme principalement, éventuellement cérium ou autres), mais le taux de substitution doit rester faible pour ne pas dégrader les propriétés, à moins que l'on admette un sacrifice des performances au bénéfice du prix. Ces deux principales voies peuvent être combinées et sont d'ores et déjà pratiquées en production.

Parmi les voies de bas TRL, de très nombreux articles traitent de la recherche de phases intrinsèquement moins riches en ETR (phases dites 1:12 par exemple, soit un atome de terre rare pour 12 atomes de métaux de transition contre 1 atome de Nd pour 7 atomes de Fe et 0,5 atome de B pour les aimants NdFeB), mais si la littérature est riche sur le sujet, leur stabilité structurale reste un obstacle important à

leur développement. La recherche de nouveaux aimants sans ETR a également généré une littérature importante, mais la grande majorité des travaux a trait à la simulation et si des phases intéressantes ont été signifiées par le calcul, aucune n'a pu être élaborée pour le moment. Sur le volet expérimental, les alliages binaires de manganèse restent les principales phases étudiées, mais on ne note pas de réels progrès depuis des décennies en termes de performances qui demeurent inférieures ou au mieux égales à celles des ferrites. Le nitrure de fer α'' (Fe_{16}N_2) n'a pas, d'après les sources fiables, un produit d'énergie supérieur à celui des ferrites, mais présente un meilleur potentiel d'évolution du fait de ces caractéristiques intrinsèques (notamment l'aimantation à saturation) et de quelques avancées observées depuis 10 ans. S'il n'est pas envisageable que cet alliage puisse se substituer au NdFeB, il pourrait dans un avenir proche concurrencer les Alnico, cependant, les revendications des entreprises qui les produisent sont sujettes à caution. Finalement, si l'on exclus les AlNiCo qui contiennent entre un quart et un tiers de cobalt, le ferrite hexagonal de type magnétoplombite reste le seul aimant sans ETR utilisable, mais ses performances ne lui permettent pas de remplacer totalement les NdFeB et présentent un potentiel d'évolution, en termes de performances, quasiment nul.

Dans le domaine des machines électriques (donc haut TRL), la voie la plus fréquente est de travailler sur la disposition des aimants et des barrières de flux afin de minimiser la quantité d'aimants (et donc d'ETR) à densité de couple constante. De nombreuses variantes de rotor existent, mais toutes concourent à mieux diriger le flux produit par les aimants pour obtenir la même induction dans l'entrefer (l'espace entre les parties tournante et fixe du moteur) avec moins d'aimant, éventuellement en exploitant le couple réductant (un effet magnétique qui permet de produire du mouvement sans aimant permanent) de manière plus ou moins optimale. Cette solution est depuis plusieurs années privilégiée par les constructeurs automobiles et arrive aujourd'hui à maturité. Le recours à la combinaison d'aimants est aussi envisagé en remplaçant une partie des NdFeB par des ferrites, qui ne contiennent pas d'ETR. Une solution plus innovante revient fréquemment dans la littérature en particulier pour les générateurs comme pour la traction : la commutation de flux. Ces machines ont à la fois un rotor passif (sans aimant ni bobinage) et un stator particulier qui comporte à la fois les bobinages induits, les aimants et éventuellement des bobinages inducteurs. Ces machines très prometteuses restent néanmoins encore loin de l'application industrielle, mais les études actuelles tendent à prouver que ce concept permettrait d'atteindre des densités de puissance proche de celles des MSAP (Machine Synchrone à Aimants Permanents) à base de NdFeB utilisées dans l'automobile aujourd'hui uniquement avec des ferrites malgré un léger surpoids. Il est permis de s'interroger sur la réalité de l'impact d'un surpoids de 5 kg sur un véhicule de type SUV de 2t embarquant une batterie de 500 kg, par ailleurs peu aérodynamique et par conception surdimensionné par rapport à la nécessité de l'usage. Le recours aux machines sans aimants s'il est majoritaire dans la production d'énergie (éolien terrestre...) reste réservé aux entrées de gamme dans l'automobile.

Matériaux luminescents (phosphores) : On remarque une sur-représentation des publications par rapport à l'usage (voir 1.5) avec un niveau de TRL globalement faible, voire une applicabilité fantaisiste. Les ETR sont utilisées dans les dispositifs d'éclairage LED pour lumière blanche (white LED, W-LED où leur rôle se limite presque exclusivement aux phosphores. Ici, 'phosphores' se réfère aux matériaux qui présentent le phénomène de luminescence ; ils émettent de la lumière lorsqu'ils sont exposés à un certain type d'énergie rayonnante. Ces matériaux sont essentiels dans la chaîne de conversion de l'énergie électrique en lumière visible.

Chaque LED contient donc une infime quantité d'ETR. Une très grande variété de composés alternatifs aux phosphores ETR pour l'application W-LED est proposée par la communauté scientifique, mais les études restent globalement à un stade de développement précoce (faible TRL) et peu de dispositifs crédibles sont rapportés. L'applicabilité bute également sur la stabilité thermique et la résistance au photo-blanchiment (perte d'efficacité de phosphorescence) en condition d'usage. Les approches par Quantum Dots (nanocristaux semi-conducteurs capables d'émettre de la lumière de manière très précise en fonction de leur taille), notamment InP, semblent toutefois progresser très vite. L'utilisation d'architectures nanostructurées dans les dispositifs existants semble pouvoir être une approche efficace

pour maximiser les performances des W-LED. Enfin, les OLED (diodes électroluminescentes organiques, utilisées notamment dans les écrans de smartphones ou de téléviseurs) qui initialement ne contenaient pas d'ETR, commencent à en être pourvues pour améliorer la qualité de couleur des écrans et leur durée de vie.

Electrodes : Les ETR sont présents dans les matériaux d'électrode de batteries NiMH (La, Ce...) et pas dans les batteries Li-ion qui représentent la plus grande partie de la croissance de l'usage. Si le remplacement des batteries NiMH par des batteries Li-ion permet une diminution de la consommation d'ETR pour cet usage, la durabilité d'un tel changement de technologie est questionnable au regard de la criticité du lithium ou du cobalt et des impacts environnementaux liés à leur extraction/purification. A plus long terme, le développement des batteries au sodium semble être une solution plus durable.

Poudre de polissage : Les poudres de polissage principalement à base de cérium sont utilisées pour le polissage de matériaux durs et transparents nécessitant un grand poli de surface tels que les verres optiques (lentilles, écrans plats, smartphones, etc.) ou les semi-conducteurs. Bien que les poudres de polissage représentent une part significative de l'usage des ETR (14% en masse de l'ensemble des ETR consommés en 2020 dans le monde soit 23kt), aucun article académique concernant la réduction ou la substitution des ETR n'a été recensé. Les faibles coût et criticité des deux ETR impliqués, cérium et lanthane, expliquent certainement le peu d'engouement pour identifier des alternatives à leur utilisation. Le polissage étant toutefois une étape clé de certains secteurs industriels, il n'est pas exclu que des développements récents soient couverts par le secret industriel ou la propriété intellectuelle.

2.1.8.2 Matériaux à faibles teneurs en ETR

Dans la plupart des matériaux à faibles teneurs en ETR, les ETR sont utilisés à l'état de traces (on parle de « dopage ») et jusqu'à quelques pour cent en masse et améliorent considérablement l'usage visé, voire lui sont indispensables.

Verres et rayonnements ionisants : un corpus très faible est trouvé, mais il est cependant clair que l'ajout d'oxyde d'ETR est efficace pour protéger les verres (ou leur assurer une fonction de protection) des radiations. Pas d'alternatives aux ETR envisagées.

Verres et application telecom : le corpus est faible par rapport aux usages connus. La littérature montre que les dispositifs d'amplification de signal les plus efficaces sont basés sur les EDFA (Erbium-doped fiber amplifiers) et EDWA (Erbium-doped waveguide amplifier) qui impliquent un usage très dispersif d' Er^{3+} est utilisé à l'état de traces (dopants), sans alternatives raisonnables possibles. L'évolution de l'usage semble faible, avec une prévalence pour les amplificateurs à guide d'onde (EDWA, Erbium-doped waveguide amplifier) car plus compacts et intégrables. L'impact et l'applicabilité des dispositifs alternatifs (SOA, (Semi-conductor optical amplifier) et Raman) sont difficiles à évaluer sur la base du corpus.

Matériaux actifs pour lasers: le corpus est pertinent, mais uniquement dans le cadre de l'utilisation de lasers pour la lithotripsie et de l'adénomectomie prostatique. Les lasers YAG:Ho (oxyde mixte d'yttrium et d'aluminium (grenat) dopé à l'Holmium) y sont progressivement remplacés par des lasers YAG:Tm (oxyde mixte d'yttrium et d'aluminium (grenat) dopé au Thulium), aussi efficaces cliniquement, mais diminuant les durées et complications post-opératoires pour le patient, ainsi que le coût et la périodicité de maintenance de l'équipement. Peu d'autres usages où la substitution d'ETR est évoquée.

Agents de contraste pour l'imagerie médicale: le corpus semble globalement pertinent, bien que les articles portant sur des essais cliniques soient sous-représentés par rapport aux études fondamentales. L'usage des agents de contraste à base de gadolinium (GBCA, Gadolinium-Based Contrast Agent) est extrêmement répandu et repose sur une base clinique solide. En France, l'augmentation de la demande en GBCA suit directement l'augmentation du nombre de machines d'IRM. Les recherches actuelles sur les GBCA se concentrent principalement sur la réduction de leur usage chez les patients atteints d'insuffisances rénales. Plusieurs voies sont explorées : diminuer la dose de GBCA en développant des agents plus efficaces comme le Gadopicienol) ou remplacer les GBCA par des agents alternatifs à base de Fe^{3+} (Ferumoxytol) ou de Mn^{2+} ; le premier étant le plus utilisé. La recherche sur les agents CEST (Chemical Exchange Saturation Transfer) avec ou sans ions métalliques est importante bien que ces approches restent à un niveau de TRL encore modéré. L'alternative aux GBCA la plus aboutie réside dans la modification des séquences IRM et/ou dans l'utilisation de l'intelligence artificielle pour l'analyse d'image.

Alliages métalliques: le corpus est très vaste, mais pollué par de nombreuses publications avec peu de pertinence. En revanche, les publications conservées semblent fiables, comparent les alliages avec ou sans ETR, et permettent de fournir des conclusions robustes. L'incorporation d'ETR et spécialement des ETR diamagnétiques comme La, Ce et Y dans des formulations d'alliages permet d'en améliorer de nombreuses propriétés physico-chimiques, principalement les propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion. L'ajout est souvent inférieur à 1% en masse. Il est à noter qu'aucun article du corpus ne démontre d'effet négatif de l'addition de faibles quantités d'ETR La, Ce et Y ; l'ajout des autres ETR en revanche est moins concluant.

Catalyseurs : le corpus est un de ceux qui présentent le plus d'écart entre volume d'utilisation connue d'ETR et nombres de publications recensées. La plupart des publications trouvées sont à faible TRL. L'utilisation des ETR présente souvent un avantage important. Dans le cas des catalyseurs pour le cracking du pétrole brut (FCC), une tendance est à la réduction de l'utilisation des ETR comme stabilisant des zéolithes (catalyseur à base d'un matériau microporeux), au profit de mélanges entre ETR et du phosphore. Au contraire, les catalyseurs au Nickel utilisés pour de nombreuses réactions sont substitués par des catalyseurs aux ETR qui montrent des augmentations de rendements significatives. Une étude montre cependant que cet avantage s'efface si des critères autres que techniques sont considérés.

ZOOM. La réduction de la consommation d'ETR dans la mobilité électrique

L'objectif de réduction de la consommation d'ETR dans la mobilité électrique ne se limite pas à la phase de fabrication des aimants ou des véhicules. En fin de vie des voitures, deux stratégies peuvent également être mises en œuvre pour prolonger la durée de vie des aimants permanents, contribuant ainsi à limiter la demande en ETR :

- **le réemploi* des moteurs de véhicules**, facilité par le fait qu'un constructeur n'aura que deux ou trois modèles de moteurs électriques (contre des dizaines de moteurs thermiques) et qu'un moteur électrique est particulièrement simple et extrêmement robuste comparé aux moteurs thermiques. Par ailleurs la durée de vie d'un moteur électrique se compte en dizaines de milliers d'heures quand celle du véhicule l'hébergeant est de moins de 3000 heures en moyenne;
- **le réemploi des aimants**, mais cette solution peut être complexe à mettre en œuvre puisque l'aimant récupéré doit avoir les mêmes dimensions que celles requises par le nouvel usage ;

En dernier recours, le recyclage peut être envisagé (cf. chapitre III). À l'heure actuelle, des filières de recyclage se mettent en place et il est difficile d'imaginer quelles voies de valorisation seront privilégiées dans l'avenir (réemploi, recyclage). Cependant, compte tenu des limitations du réemploi des aimants et de celles du recyclage court (pour le moment les propriétés sont sensiblement moins bonnes), le réemploi des moteurs et le recyclage long seront probablement privilégiés pour l'automobile. Le recyclage court* pourrait être destiné à d'autres secteurs moins exigeants. Concernant les éoliennes, leur durée de fonctionnement (de l'ordre de 30 000 heures) et leur exigence en termes de performances ne laissent pour le moment envisager que le recyclage long.

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

L'essentiel

Le droit applicable à la production et l'utilisation des métaux critiques (fondé sur le Règlement européen sur les matières premières critiques de 2024) **se fondent prioritairement sur l'impératif de sécurité de l'approvisionnement**. Certains auteurs craignent dans ce contexte que la volonté de renforcer l'indépendance des industries européennes prenne la priorité sur les enjeux de sobriété, et cela en particulier dans l'hypothèse d'une relocalisation d'activités minières. Le Règlement insiste en effet sur l'augmentation de l'offre plutôt que sur la réduction de la demande, ce qui questionne la suffisance des mesures de durabilité pourtant bien présentes dans le texte. En outre, pour faciliter la « relocalisation » à court terme de l'extraction, il permet une altération des principes de la démocratie environnementale comme une réduction des délais de consultation du public pour les projets dits « stratégiques ».

Les **considérations de sobriété présentes dans la législation française et européenne sur l'économie circulaire**, qui proposent une utilisation efficace des ressources et une hiérarchie des déchets mettant l'accent sur les leviers de sobriété, **sont articulées néanmoins avec la réglementation relative aux ETR, par un mécanisme de « renvoi »**. L'économie circulaire, promue par le Règlement sur les matières premières critiques, participe ainsi à la sécurisation de l'approvisionnement en matières premières critiques et donc en terres rares.

Le *Critical Mineral Policy Tracker* de l'Agence internationale de l'énergie⁵ recense, en 2025, 450 politiques nationales relatives à la réglementation de l'utilisation des matériaux critiques (exploration, production, approvisionnement, innovation) dans plus de 35 pays. Cet outil de suivi des politiques existantes relatives aux matières premières critiques est destiné à aider les gouvernements à élaborer de nouvelles politiques en la matière. L'AIE a également publié des études visant à présenter des politiques ayant pour objet la chaîne de valeur et nécessitant une traçabilité pour s'appliquer de manière extraterritoriale⁶.

Si la singularité de ces réglementations - entre protection de la souveraineté nationale et transition écologique mondiale, retours de l'interventionnisme de l'État et régulation extraterritoriale des chaînes de valeurs - a été parfois étudiée par la littérature académique et la littérature grise, la récente réglementation européenne et l'influence de celle-ci sur le droit relatif à l'économie circulaire — y compris la sobriété — ont à l'heure actuelle été très peu traitées du fait du caractère très récent de cette réglementation.

⁵ Disponible en ligne sur le site de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) : <https://www.iea.org/reports/introducing-the-critical-minerals-policy-tracker>.

⁶ Voir par exemple IEA, *The Role of Traceability in Critical Mineral Supply Chains* 2025.

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

La mise en place d'une « gouvernance des terres rares » repose sur la volonté de réglementer l'utilisation de ces dernières, tout au long des chaînes de valeurs, en exprimant un nouveau rapport entre sécurité et durabilité dans lequel la seconde s'avère au service de la première (2.3.1). Le droit relatif à l'économie circulaire permet dans ce contexte de contribuer, dans une certaine mesure, à la sécurisation de l'approvisionnement en terres rares (2.3.2). L'analyse de cette gouvernance par la littérature académique et par la littérature grise fait apparaître des faiblesses, mais aussi des propositions concrètes d'amélioration (2.3.3).

2.2.1 L'encadrement de la production et de l'approvisionnement en terres rares sous le prisme de la sécurité

L'encadrement de la production et de l'approvisionnement en terres rares s'est développé très progressivement en Chine, et très récemment en Europe, mettant en évidence tout l'intérêt et la difficulté pour le droit d'appréhender la notion de chaînes de valeur, qui se situe au centre de ces notions. La littérature analyse cette gouvernance internationale au travers d'une dialectique entre sécurité et durabilité. Le droit européen relatif à l'utilisation des terres rares traduit parfaitement cette dialectique.

2.2.1.1 L'émergence d'une « gouvernance des terres rares » à l'échelle internationale

La politique relative aux terres rares et plus généralement aux matières premières dites critiques apparaît dès 1986 en **Chine**, et seulement au début des années 2000 au niveau européen (voir Chapitre 1). La Chine a en effet élaboré la politique des terres rares la plus ancienne et la plus aboutie, mêlant depuis près de 50 ans une politique d'incitation à la recherche et à l'exploitation de terres rares à une politique visant à développer l'économie circulaire des produits contenant des terres rares. Le septième plan quinquennal national pour l'industrie des terres rares chinois (1986-1990) marquait en effet déjà la reconnaissance par la Chine de la valeur stratégique des minéraux. Il soulignait la nécessité de mener de nouvelles recherches afin d'élaborer des applications avancées et de créer de nouveaux matériaux. Deng Xiaoping déclarait ainsi en 1987 : « [le] Moyen-Orient a du pétrole, la Chine a des terres rares » (Zeng et al., 2013) (Arboleda, 2020) (De Decker, 2023). La politique chinoise des terres rares se caractérise cependant par une certaine opacité, la seule cartographie pour les terres rares d'importance nationale étant le plan national chinois pour les ressources minérales (2016-2020) publié en 2016. L'approche de la Chine en matière de terres rares ne se limite en outre désormais plus à ses propres frontières. L'État incite les entreprises chinoises à investir à l'étranger, notamment en Afrique, pour sécuriser ses approvisionnements, et régule plus spécifiquement les chaînes de valeurs extraterritoriales de produits chinois tels que, par exemple, les voitures électriques, par le biais du *New Energy Vehicle Industry Development Plan 2021—2035*.

Ce développement volontariste de l'industrie chinoise des terres rares lui a permis de tirer parti d'un approvisionnement national à faible coût pour promouvoir une transformation et une fabrication industrielle à forte valeur ajoutée, qu'elle peut alors exporter. Cette politique relative aux terres rares a été largement couronnée de succès, redéfinissant la division internationale de la production qui existait avant les années 2000, dans laquelle la Chine exportait la majeure partie de sa production de terres rares vers les pays occidentaux pour alimenter leurs industries, les entreprises chinoises devenant désormais exportatrices de produits électroniques plus sophistiqués et au retour sur investissement plus grand. La réglementation chinoise des terres rares a ainsi transformé l'ancienne « économie-monde » décrite par Immanuel Wallerstein, modifiant ainsi à la fois les rapports économiques et les relations politiques Nord-Sud. Cette politique relative aux terres rares a aussi transformé l'économie elle-même :

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

ce déplacement, décentrement ou « dévissage » du monde extractif et économique vers l'Asie est résumé dans la littérature par le terme de « mine planétaire » (Arboleda, 2020) (Wallerstein, 2011): l'« économie monde » se caractériserait désormais à la fois par une nouvelle géographie de l'industrialisation tardive dont l'axe se déplace vers le Pacifique et par un processus d'intégration dit de « révolution logistique ». L'extractivisme dépasse alors les limites du secteur primaire à proprement parler et projette sa logique industrielle et politique dans les technologies numériques, les systèmes logistiques, les secteurs immobiliers, financiers, etc. Cette politique relative aux terres rares de la Chine a aussi été une politique de la recherche : les indicateurs bibliométriques montrent qu'une grande majorité des chercheurs publiant sur les éléments de terres rares — tous domaines scientifiques confondus — sont affiliés à des universités chinoises. Selon la base de données *Web of science Core collection* interrogée sur l'occurrence « *rare earth element* », 19 600 travaux scientifiques proviennent de Chine sur les 58 992 recensés, contre 8 831 des États-Unis et 3 375 de France.

En réaction à cette « mine planétaire » chinoise qui a pu être interprétée comme une véritable mainmise sur ces ressources, la gouvernance mondiale relative aux terres rares mise en place par la suite vise à pallier le succès de la politique chinoise par un protectionnisme des ressources et des technologies de la transition vers l'énergie propre. Les pays industrialisés ont ainsi adopté une nouvelle approche des minerais en examinant les risques d'approvisionnement, non pas en fonction de la disponibilité géologique potentielle, mais de l'origine géopolitique des matières premières utilisées dans leurs économies respectives et des risques sur leur souveraineté liés à l'approvisionnement en provenance de pays tiers, en particulier de la Chine. Naît alors véritablement la notion de matériaux « critiques » (voir *supra*, Chapitre 1).

Ce nouveau discours et cette nouvelle politique ont été repris et reformulés par des **organisations internationales**, dont la Banque mondiale, dans sa communication intitulée « *Climate-smart mining* » (Phadke, 2019). Cette expression adapte la notion de risque (la « criticité ») aux nouveaux besoins de la transition climatique. La banque mondiale renouvelle ainsi le concept de « mine responsable » (voir sur cette notion le Chapitre 4.3) sous l'influence des nouveaux besoins de l'industrie pour réaliser la transition environnementale, qui s'ajoutent désormais aux besoins plus traditionnels de la défense, de l'innovation, etc. Cependant, une véritable « gouvernance » internationale des terres rares n'existe pas encore, les divers cadres institutionnels existants étant seulement consultatifs : les programmes internationaux tels que le Panel international sur les ressources⁷, le Groupe international sur les ressources du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), ou encore le Forum intergouvernemental sur l'exploitation minière, les minéraux, les métaux et le développement durable, ont d'abord rassemblé des données sur la demande en ressources. Le Forum des ressources mondiales et *Future Earth*, qui réunit un groupe composé d'universitaires, industriels et décideurs politiques sur le thème de la rareté des ressources, n'ont ni pouvoir normatif ni même mandat d'élaboration de politiques. Les organisations d'industries telles que le Conseil international des métaux et des mines (CIMUM) ont également travaillé sur les aspects environnementaux et sociaux de l'approvisionnement en minerais.

Le G7 - alliance de sept grandes démocraties industrialisées - constatant les lacunes en termes de coopération et donc de gouvernance sur les matières premières, a créé dès 2015 une « alliance sur l'efficacité des ressources ». Cependant, aucune des agences internationales actuelles n'a pour mandat de planifier, de superviser ou de réaliser une exploitation efficiente et efficace des ressources minérales, et cette question n'a pas encore fait l'objet de travaux de l'Assemblée des Nations Unies pour l'Environnement (ANUE) ou de l'ONU plus généralement (Ali et al., 2017). Si la gouvernance internationale demeure à l'heure actuelle dans un état embryonnaire, l'ONU appelle tout de même désormais à une

⁷ Voir le site internet du Programme des Nations Unies pour l'environnement : <http://www.unep.org/resourcepanel/>

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

« coordination »⁸. En avril 2024, le Secrétaire général des Nations Unies a en effet lancé un « groupe d'experts sur les minéraux essentiels à la transition énergétique », visant notamment à promouvoir une transition juste et équitable, en particulier pour les pays en développement⁹. Le groupe d'experts a pour mandat de contribuer à l'élaboration de principes volontaires à portée mondiale visant à garantir une transition énergétique juste, équitable et durable, en assurant des bénéfices pour les pays et les communautés locales tout au long de la chaîne de valeur des minéraux critiques, dans le respect des normes environnementales, sociales et des droits humains (Nations Unies, *Panel on Critical Energy Transition Minerals*, 2024).

Les réglementations relatives aux terres rares sont ainsi principalement nationales et visent à garantir l'accès aux minéraux essentiels et à renforcer la résilience de la chaîne d'approvisionnement dans un contexte de concurrence stratégique entre les grandes économies. Ces politiques visent à promouvoir l'exploration, à offrir un soutien financier, à encourager les pratiques durables et responsables et à faciliter la coopération bilatérale et régionale, mais aussi désormais à mettre en place des incitations fiscales à la relocalisation des chaînes de valeur.

Les **États-Unis**, sous la première présidence de Donald Trump, ont adopté en 2017 une stratégie fédérale visant à garantir des approvisionnements sûrs et fiables en matières premières essentielles, visant à réduire la vulnérabilité du pays aux perturbations de l'approvisionnement en matières premières critiques (*the United States Federal Strategy to Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals*, Executive Order 13817 of December 20, 2017). La présidence précédente avait été plus rigoureuse : la loi sur la réduction de l'inflation dite « IRA » (promulguée le 16 août 2022) subventionne les technologies énergétiques produites aux États-Unis et accorde des réductions d'impôts pour les produits contenant des matières premières d'origine américaine. Par exemple, pour pouvoir bénéficier d'un crédit d'impôt à la consommation de 7500 USD pour les voitures électriques, une part minimale des composants des batteries (50 %) ou des minéraux critiques (40 %) doit provenir d'Amérique du Nord ou de pays avec lesquels les États-Unis ont conclu un accord de libre-échange (ALE). Par ailleurs, le dispositif prévoit l'exclusion progressive des matériaux provenant de certains États considérés comme stratégiquement sensibles, notamment la Russie, l'Iran, la Corée du Nord et la Chine. Enfin, l'*Inflation Reduction Act* ne définissant pas explicitement la notion d'« accord de libre-échange », l'administration américaine a adopté une interprétation souple. La secrétaire au Trésor, Janet Yellen, avait ainsi indiqué que certains accords sectoriels, notamment dans le domaine des minerais critiques, pourraient être assimilés à de tels accords à l'avenir¹⁰.

La **loi coréenne** quant à elle favorise dans ce contexte à la fois l'approvisionnement national et le recyclage des matières premières stratégiques (Framework Act on Supply Chain Stabilization Support for Economic Security, adoptée le 8 décembre 2023).

La « gouvernance des terres rares » apparaît plus récemment en Europe, dans le cadre d'un groupe de travail sur les matières premières critiques (2005), puis de l'Initiative sur les matières premières (*Raw Materials Initiative* - RMI) de 2008. La première liste des matières premières critiques pour l'UE a été publiée en 2011 et est depuis régulièrement mise à jour. **L'Union européenne** a seulement récemment élaboré, sur cette base, un droit applicable à la production et l'utilisation des terres rares, avec le Règlement relatif aux matières premières critiques (*Critical Raw Materials Act*), ou CRM ACT : le Règlement (UE) 2024/1252 du Parlement européen et du Conseil du 11 avril 2024 établissant un cadre

⁸ United Nations, Department of Economic and Social Affairs (2025), *Harnessing the Potential of Critical Minerals for Sustainable Development*. World Economic Situation and Prospects 2025, chap. 2. United Nations publication, January 2025.

⁹ Nations Unies, « **Le Secrétaire général nomme un Groupe d'experts sur les minéraux essentiels à la transition énergétique** », communiqué de presse, 26 avril 2024, SG/A/2286.

¹⁰ Congressional Research Service, « *The Inflation Reduction Act: Critical Mineral and Battery Component Requirements* », 2023—2024.

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

visant à garantir un approvisionnement sûr et durable en matières premières critiques et modifiant les règlements (UE) n° 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 et (UE) 2019/1020 du 3 mai 2024 mentionné *supra*, Chapitre 1 « la mise en politique des terres rares ». Le règlement donne pour la première fois une définition juridique des « matières premières critiques » qui relève non pas de la chimie, mais des risques qui pèsent sur la souveraineté nationale des États européens dont les industries essentielles ont des besoins qui demeurent sous la maîtrise de la Chine pour l'essentiel : industries de la transition environnementale, mais aussi de l'armement et des secteurs clefs de l'innovation, dont les technologies de l'information et de la communication. Le Règlement distingue ainsi 34 matières premières considérées comme « critiques », car elles présentent une grande importance économique pour l'industrie de l'UE et des risques plus élevés de pénurie d'approvisionnement que la plupart des autres matières premières. Cette liste de matières premières « critiques » distingue en son sein une catégorie de matières premières dites « stratégiques » au risque d'approvisionnement plus élevé encore, dont le besoin augmente de manière exponentielle ou qui présentent des exigences complexes en matière de production.

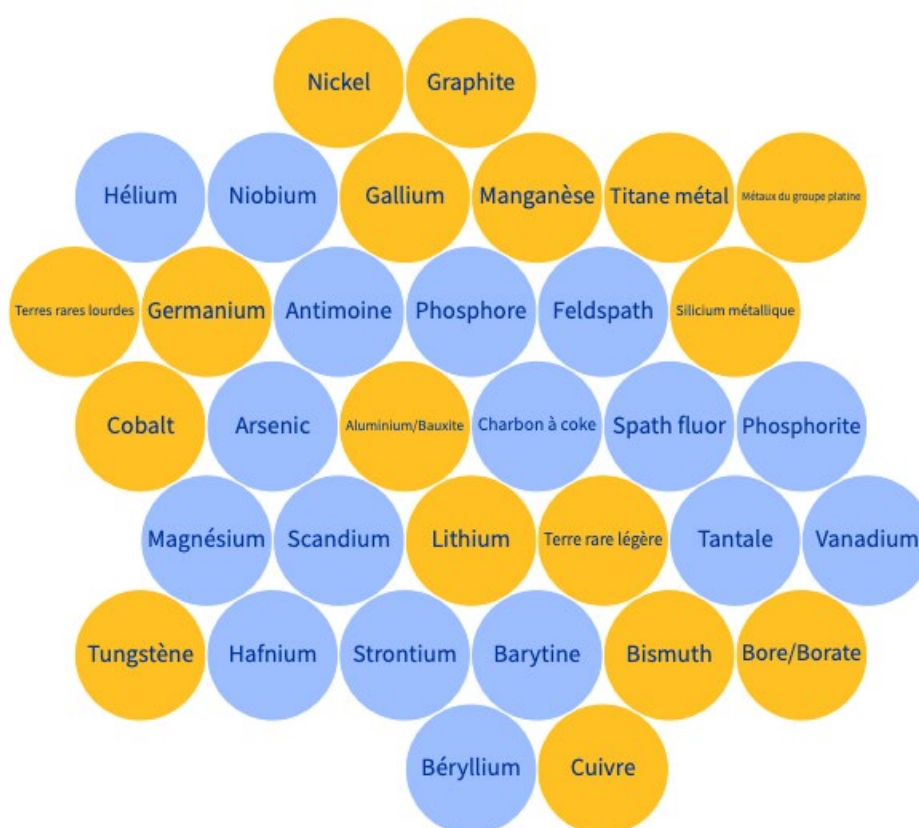


Figure 2.16 Règlement européen sur les matières premières critiques, Commission européenne, 2025 : liste des 34 matières critiques dont les matières critiques stratégiques en jaune, ces dernières comprenant les terres rares légères et lourdes.

Cette liste actualisée périodiquement exprime la dimension politique des matériaux critiques (voir Chapitre 1). Par ailleurs, cette réglementation européenne des produits contenant ces matériaux tout au long de la chaîne de valeur qui vise à limiter l'approvisionnement extérieur en terres rares donne au droit un effet extraterritorial : cette réglementation possède un champ d'application qui excède la compétence territoriale de l'État qui en est l'auteur. Certes, les tentatives d'interdiction des exportations comme mode de régulation — comme celle mise en place dans les années 2010 par la Chine — ont conduit à une condamnation par l'Organe de règlement des différends de l'Organisation Mondiale du Commerce (voir

Chapitre 1 ; voir également (Ming Hwa Ting & Seaman, 2013) et (Galazova et al., 2023). Cependant, la régulation des matières premières critiques a pris, de manière généralisée, la forme d'une réglementation relative non seulement aux produits contenant ces matières mais aussi à la chaîne de valeur dans son ensemble (Beckers, 2024). Les tentatives d'encadrement juridique des chaînes de valeurs mondiales sont ainsi en plein essor. Elles prennent la forme d'obligations pesant sur les entreprises, contrôlées par des parties prenantes, en association avec les États.

2.2.1.2 Le concept de chaîne de valeur, au cœur de la gouvernance des terres rares

La notion de chaîne de valeur est apparue de manière embryonnaire dès 1997 dans le droit européen applicable aux déchets, avec l'objectif de promouvoir les instruments d'analyse de cycle de vie et d'orienter les priorités à venir en matière de gestion des déchets¹¹. La politique européenne de gestion des déchets devait « contribuer à une réduction globale de l'impact environnemental de l'utilisation des ressources » (Thieffry, 2009). Le Règlement européen de 2024 sur les matières premières critiques vise quant à lui à préparer l'industrie de l'UE aux risques liés aux matières critiques dans les chaînes d'approvisionnement et de les atténuer en accroissant la capacité nationale d'extraction, de traitement et de recyclage. **La chaîne de valeur apparaît ici comme un réseau collectif d'acteurs qui assume une responsabilité collective à l'égard de l'État, du consommateur ou de la société civile pour le processus de production.** Les obligations consacrées visent les produits liés au territoire (importation et accès au marché intérieur) ou les processus de production tout au long de la chaîne de valeur. Ce droit européen applicable aux chaînes de valeur transforme ainsi la notion de gouvernance, désormais extraterritoriale et en partie déléguée aux entreprises. Ce nouveau modèle de gouvernance est peu à peu adopté à travers le monde, notamment par la Chine, permettant peut-être la naissance de ce que certains auteurs désignent comme un nouveau « continent » de droit, celui des chaînes de valeur globales (Tian, 2024). Le droit européen des chaînes de valeur est né en grande partie de la régulation des minerais, et en particulier des minerais de guerre qui ont été à l'origine de la première réglementation portant sur les produits, fondée sur la traçabilité et la vigilance ainsi que la délégation aux entreprises de la mission d'appliquer le droit international - en l'espèce l'embargo des minerais provenant des zones de guerre en République Démocratique du Congo (Lhuillier, 2016).

¹¹ Conseil de l'UE, résolution 24 février 1997 sur une stratégie communautaire pour la gestion des déchets : JOCE n° C 76, 11 mars 1997, p. 1 ; voir également la Communication du 21 décembre 2005 sur la stratégie thématique pour la prévention et le recyclage des déchets (COM(2005) 666 final).

ZOOM. La notion de « chaîne de valeur ».

La notion de « chaîne de valeur » est polysémique. À l'origine issue de l'économie et désignant l'ensemble des contrats nécessaires à la production et la commercialisation d'un bien ou d'un service, la chaîne de valeur est aujourd'hui également une notion juridique.

La régulation par les chaînes de contrats est un instrument d'adaptation de l'action des États qui permet d'associer les entreprises - et les parties prenantes, société civile, consommateurs — à la mise en œuvre des politiques publiques. L'insertion de clauses dans des contrats commerciaux internationaux répliquant des obligations contraignantes sur un territoire national permet d'imposer ces obligations à l'ensemble d'une chaîne de contrats et d'en multiplier ainsi la portée, de manière extraterritoriale (c'est-à-dire au-delà du territoire de l'État qui est l'auteur des obligations). Ce ne sont plus les États mais les entreprises assujetties à ces obligations que l'on peut qualifier d'obligations de « vigilance » qui vont devoir obliger leurs sous-traitants à appliquer les mêmes obligations (Lhuillier, 2022), quel que soit le territoire où ils se situent. Parmi ces clauses figurent les clauses « tunnels », dites aussi assurances contractuelles, par lesquelles une société mère peut obliger un sous-traitant ou fournisseur à imposer à ses propres sous-traitants ou fournisseurs d'appliquer ces obligations, donnant ainsi un champ d'application mondial aux réglementations nationales, tout au long de la chaîne de valeur.

La notion n'est cependant pas encore juridiquement stabilisée : la définition de la chaîne de valeur peut varier selon les textes, viser les chaînes d'approvisionnement et de sous-traitance, l'ensemble des sociétés et clients avec lesquels la société entretient des rapports commerciaux et/ou d'investissement (directs ou indirects), le groupe consolidé, etc. (Riofrancos, 2023) ; (Lhuillier et al., 2022). Ainsi, dans les principaux textes applicables aux terres rares en France et en Europe, aucune définition de la chaîne de valeur n'apparaît identique. **Le Règlement européen Matériaux Critiques définit à son article 2 la « chaîne de valeur des matières premières » comme « l'ensemble des activités et processus intervenant dans l'exploration, l'extraction, la transformation et le recyclage des matières premières ».**

Certaines règles relatives à la chaîne de valeur portent sur tous les contrats de la chaîne, d'autres sur certains matériaux seulement, et d'autres encore sur certains produits spécifiques. Par exemple, un constructeur automobile devra en premier lieu introduire dans tous les contrats de sa chaîne de valeur des clauses relatives à l'obligation de vigilance. Cette vigilance « générale » peut en effet être définie comme la prise en compte des impacts environnementaux tout au long du cycle de vie — de l'étape extractive (étape 1) à la transformation et à la production (étape 2 et 3) jusqu'à la mise sur le marché et la fin de vie du produit (étape 4) et exige donc d'évaluer la somme des impacts environnementaux des différentes étapes. En second lieu, ce constructeur sera aussi soumis à une obligation de vigilance relative aux « matériaux critiques », et devra à ce titre faire une évaluation des impacts dès l'extraction des ressources (ici les terres rares) comme composantes de nouveaux produits, en considérant également la possibilité d'une extraction provenant de sources secondaires (mine urbaine ou déchets miniers). En troisième lieu, d'autres réglementations plus restrictives interviennent : ce même constructeur automobile devra aussi insérer des clauses particulières dans tous ses contrats avec ses sous-traitants / fournisseurs dont les produits contiennent des matériaux critiques.

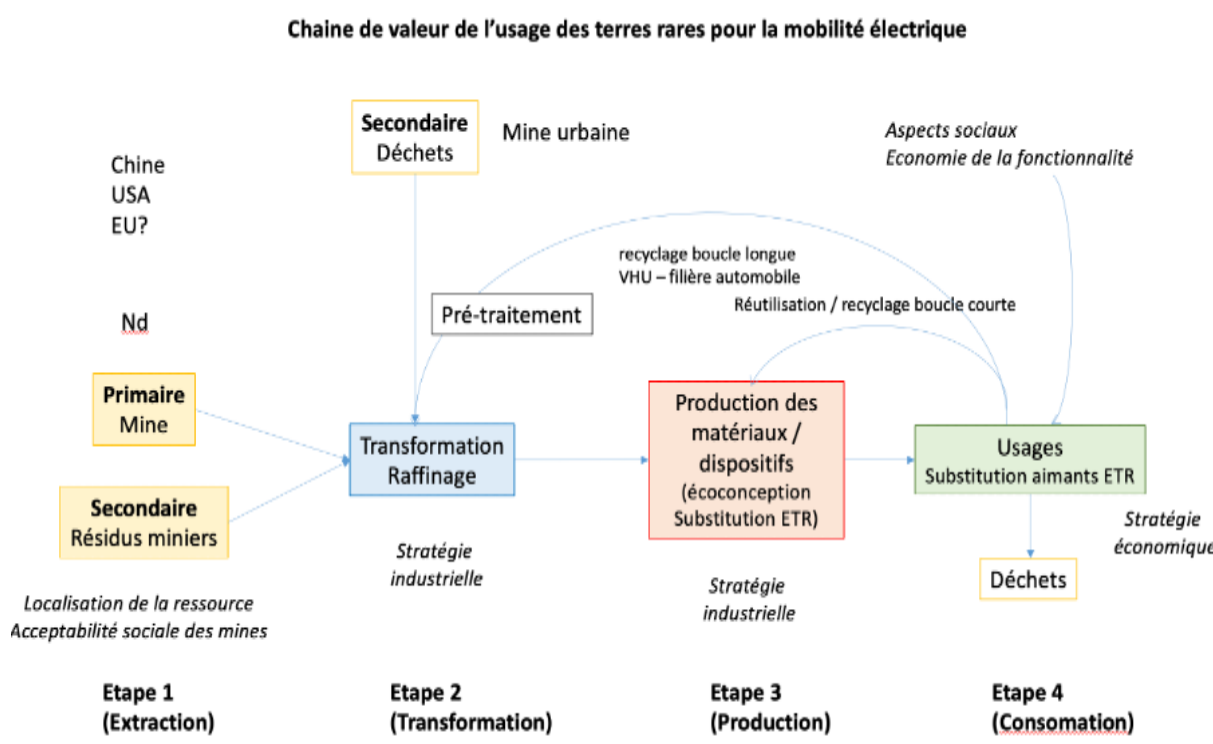


Figure 2.17 Figure réalisée par les experts de l'ESCo Terres rares ainsi que Denis Lacroix et Laurent Jammes illustrant la « Juridification » de la chaîne de valeur de terres rares dans l'exemple de l'usage des terres rares pour la mobilité électrique. La chaîne de valeur apparaît le point de rencontre entre les anciennes logiques industrielles et économiques (1/extraction ; 2/transformation ; 3/production ; 4/consommation) et les nouvelles politiques de sécurité et de durabilité qui privilégient 1/les sources secondaires dites résidus miniers issus de l'exploitation de déchets de mines anciennes dans la phase d'extraction ; 2/les sources secondaires issues de déchets ou de mines urbaines issus du recyclage dans la phase de transformation ; 3/l'écoconception des produits visant à réduire la part des terres rares dans leurs composants, la substitution de produits autres aux terres rares dans la production, voir la réutilisation, le réemploi et le recyclage court ; 4/les usages limitant la consommation de produits contenant des terres rares, telle la sobriété volontaire ou imposée pour résoudre les conflits d'usage ou l'économie de la fonctionnalité, etc.

2.2.1.3 L'analyse de cette nouvelle gouvernance par le nexus « Sécurité - Durabilité »

La nouvelle « gouvernance internationale des terres rares » a été analysée par le biais de la notion de « nouveau lien entre sécurité et durabilité » (Riofrancos, 2023) : la gouvernance actuelle des matières premières critiques, et donc des terres rares, donne lieu en effet à un discours sur l'urgence climatique mondiale, qui vise à encourager la « relocalisation » des activités minières primaires dans les pays développés et en particulier en Europe. Ce discours est en apparence paradoxal : l'extraction de minerais - et ses inévitables conséquences environnementales - est désormais justifiée par les nécessités industrielles de la transition environnementale, dans une logique de lutte contre les changements climatiques, notamment en matière d'énergies décarbonées et de transports électriques. Ce renouveau extractiviste est clairement identifié comme ayant des conséquences néfastes sur l'environnement et donc la « durabilité ». Mais à l'inverse, c'est aussi un discours qui renouvelle la conception de la durabilité (voire de la sobriété), justifiée désormais par la sécurité nationale : **la réduction de l'usage de matières par le recours à l'économie circulaire réduit en effet la dépendance des économies nationales aux**

États tiers. L'économie circulaire devient ainsi un élément à part entière de la politique visant à protéger la souveraineté et des politiques de défense.

L'analyse des chaînes d'approvisionnement en minerais demeure cependant largement lacunaire. À titre d'illustration, une étude du *Government Accountability Office* montrait qu'en 2014, environ 67 % des entreprises n'étaient pas en mesure de déterminer le pays d'origine des minerais utilisés dans leurs produits, notamment pour les « *conflict minerals* ». Il est donc difficile de remonter jusqu'au fournisseur et jusqu'à la mine pour vérifier quelles sont les pratiques et si le droit international des droits humains et de l'environnement sont respectés ou non. L'exploitation des terres rares peut ainsi être à l'origine de conflits entre entreprises locales et internationales, de conditions de travail difficiles, de travail des enfants ou encore de risques politiques et en matière de santé et de toxicité (Huber & Steininger, 2022). Pour Ehrmann et Vesa, en effet, au-delà des risques liés à l'approvisionnement, les matières premières critiques sont confrontées à d'importants risques géopolitiques, sociaux et environnementaux tout au long de leur cycle de vie (Ehrmann & Vesa, 2026). Les chaînes d'approvisionnement complexes sont particulièrement vulnérables aux perturbations causées par les tensions géopolitiques, l'instabilité politique et les restrictions commerciales dans les régions riches en ressources. De plus, la demande croissante amplifie les risques liés aux droits de l'homme dans les régions d'approvisionnement, où le travail des enfants reste une préoccupation persistante, ou les violations des droits des peuples autochtones, car d'importantes quantités de matières premières critiques se trouvent sur ou à proximité de terres autochtones. En ce qui concerne les risques environnementaux, l'extraction et le traitement des matières premières critiques entraînent, entre autres, la destruction d'habitats, la déforestation, l'érosion des sols, la contamination de l'eau et des dommages écologiques durables, ainsi que d'autres conséquences (Ehrmann & Vesa, 2026). La littérature s'intéresse par conséquent à la recherche de matières premières ou de composants de substitution ainsi qu'aux freins à l'augmentation des taux de recyclage des minéraux ((Huber & Steininger, 2022) ; voir sur ce dernier point le Chapitre 3).

La littérature grise émanant notamment des organisations internationales utilise elle aussi implicitement le nouveau rapport entre sécurité et durabilité. Elle analyse d'un côté, le bénéfice de l'investissement dans une politique relative aux terres rares par des pays en voie de développement qui sécurisent alors leurs approvisionnements et luttent ainsi contre la pauvreté dans une perspective de mise en œuvre des objectifs du développement durable (ODD) consacrés par l'Assemblée générale de l'ONU en 2015, et d'un autre côté, les dommages générés par ces politiques en termes de durabilité : « *Environmental and ecological damage and adverse social impacts can offset the economic gains from critical minerals. Extraction activities involve extensive material movement, resulting in land disturbance and waste accumulation, which can seriously damage biodiversity and ecosystems* »¹².

La littérature scientifique apparaît claire sur ces questions : une méta recherche de 323 articles analysant les politiques publiques permettant d'atteindre la sécurité de l'approvisionnement (Salim et al., 2022) montre que dans ce contexte il faudrait privilégier dans un premier temps la **réduction de la demande en terres rares** (par le biais de l'économie circulaire) et dans un second temps seulement, dans la mesure du possible et du nécessaire, relancer l'industrie minière sur les territoires européens par de nouvelles mines ou des relocalisations d'industries.

Enfin, si le terme de « sécurité » renvoie à la sécurité des approvisionnements dans les politiques publiques, il revêt cependant plusieurs acceptions parfois opposées dans la littérature. Par exemple, ce terme est lié aux évolutions géopolitiques et au « *security turn* » de l'UE. Un « **tournant sécuritaire** » est en effet discernable dans un grand nombre de textes européens dont les communications sur le *Green Deal* et la résilience des matières premières critiques, la stratégie de l'UE pour l'hydrogène, le Global Gateway, le plan REPowerEU, la stratégie énergétique extérieure ou encore la stratégie pour l'énergie solaire et le plan industriel du *Green Deal*. Ce tournant « géopolitique » de l'Union européenne est lié à

¹² United Nations, Department of Economic and Social Affairs (2025). Harnessing the Potential of Critical Minerals for Sustainable Development. In *World Economic Situation and Prospects 2025*, chap. 2. United Nations publication, January.

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

la multiplication des crises récentes — coronavirus, mais surtout guerre en Ukraine (Siddi & Prandin, 2023) (Ming Hwa Ting & Seaman, 2013) ainsi que le repli géopolitique des États-Unis. Il réintroduit alors l'idée de politique économique et de limitations imposées aux entreprises à leurs libertés d'entreprendre fondées sur cet impératif de sécurité. L'effectivité de ces politiques de sécurité est cependant peu étudiée. Les économistes tentent parfois d'en évaluer les effets, par exemple concernant les politiques de constitution de stock de terre rares par l'État et leur effet sur le prix et la production des mines légales et illégales en Chine (M. Brown & Eggert, 2018). Un deuxième exemple est celui des modèles d'analyse économique de la gouvernance extractive des terres rares, qui reprennent la dimension de sécurité versus durabilité en élaborant le concept de « régimes institutionnels intégrés » (Dyca et al., 2024). Dans ce cadre d'analyse - créé par Blake en 2020 (Hailes, 2022) (Blake. & Malcolm, 2000), le cadre est élargi aux sciences de l'écologie : l'accent n'est plus mis sur la limitation par exemple de la pollution (durabilité) mais sur un cadre plus large de gestion de l'utilisation des « stocks » d'une ressource de manière à préserver la capacité de renouvellement du « système » (les 9 limites planétaires) alors dit « intégré » de ressources (sécurité et durabilité). Les régimes institutionnels sont considérés comme « intégrés » à cette première condition, avec des ressources réglementées de manière cohérente (minerais, certes, mais aussi eau, forêts, etc.). Dans cette analyse, le cadre d'analyse n'est plus seulement économique mais aussi politique : la décision d'utiliser ou non les terres rares pour fabriquer un bien de consommation est le second critère d'une politique « intégrée ». La définition d'un élément de terre rare ne serait donc pas uniquement chimique ni géopolitique, mais aussi et surtout politique. La conséquence est importante en matière de gouvernance. L'analyse de Blake et Malcolm conclut qu'il est nécessaire de définir plus clairement les limites dans lesquelles l'extraction peut avoir lieu de manière durable, en fixant en premier lieu des priorités en termes de consommation de matières premières c'est-à-dire en déterminant des usages peu « stratégiques » pour lesquels l'utilisation de terres rares serait interdite, et d'autre part en soulignant l'importance d'un discours plus large sur la consommation responsable de minéraux, qui « bénéficierait d'une plus grande inclusion des parties prenantes locales et des acteurs de la gouvernance locale » (Blake. & Malcolm, 2000).

Enfin, la littérature affirme qu'une gouvernance des terres rares ne sera efficace que si elle parvient à réaliser ce qui est parfois nommé la « **justice de la chaîne d'approvisionnement** », ou « **justice dans la chaîne de valeur** ». La question du cobalt et des batteries lithium-ion illustre parfaitement dans la littérature cet usage du nouveau lien entre sécurité et durabilité : d'une part, la gouvernance tend à assurer la « sécurité de la chaîne d'approvisionnement » pour les minerais essentiels notamment à la transition environnementale. D'autre part la durabilité prend la forme d'une « justice de la chaîne d'approvisionnement » entre les gouvernements, les entreprises et les communautés touchées par les externalités sociales et environnementales de l'extraction du lithium. L'exemple de quatre États possédant d'importantes réserves - le Chili, l'Australie, l'Argentine et la Chine - illustre concrètement cette opposition sécurité versus durabilité, les incitations à l'investissement dans la production des batteries se heurtant au mécontentement des communautés locales ou indigènes. Ce lien entre sécurité et durabilité oblige ainsi à chercher un équilibre entre d'une part les volontés industrielles et étatiques de favoriser l'extraction, la transformation, l'innovation, et d'autre part les obligations des États et des entreprises en matière de droits de l'homme, de protection de l'environnement et des peuples autochtones, dans le nouveau cadre politique global de la chaîne de valeur (Hailes, 2022).

2.2.1.4 Le contenu du droit européen relatif à l'utilisation des terres rares

Le droit européen applicable aux terres rares prévoit des objectifs, des obligations, des moyens et des techniques d'application.

ZOOM. Le Règlement (UE) n° 2024/1252 du Parlement européen et du Conseil du 11/04/24 établissant un cadre visant à garantir un approvisionnement sûr et durable en matières premières critiques et modifiant les règlements (UE) n° 168/2013, (UE) n° 2018/858, (UE) n° 2018/1724 et (UE) n° 2019/1020

Le Règlement (UE) 2024/1252 établit un cadre visant à garantir un approvisionnement sûr et durable en matières premières critiques (dont les ETR). La sécurité par la consolidation de l'offre de terres rares -extraction et transformation- est au cœur des dispositions de ce règlement. Cela pourrait sembler à première vue éloigné des considérations de sobriété qui appelleraient plutôt à une action sur la demande caractérisée par une réduction de l'extraction et de l'utilisation de métaux. Le règlement se focalise ainsi sur l'offre plutôt que la réduction de la demande (Baldassarre, 2025), bien qu'il exprime aussi un objectif d'économie circulaire. Le règlement cible en effet l'ensemble de la chaîne de valeur — de l'exploitation du potentiel d'extraction au recyclage en passant par le (re)développement du raffinage et de la transformation de minerais sur le sol européen — tout en ambitionnant de diminuer les impacts environnementaux et sociaux de la production de métaux critiques et d'en améliorer la circularité (Hache & Normand, 2024).

Le règlement donne aux États les objectifs suivants d'ici à 2030 :

- la capacité d'**extraction** de l'UE doit couvrir 10 % de la consommation annuelle de matières premières critiques ;
- la capacité de **transformation** de l'UE doit couvrir 40 % de la consommation annuelle ;
- la capacité de **recyclage** de l'UE doit permettre de traiter 25 % de la consommation annuelle et en conséquence d'augmenter le recyclage des déchets ;
- aucun **pays tiers** ne devrait représenter plus de 65 % des **importations** destinées à la consommation annuelle de l'UE.

Pour réaliser ces objectifs, le règlement définit notamment des « **projets stratégiques** » qui devraient bénéficier de conditions réglementaires favorables, de même que la production de produits utilisant des métaux critiques, d'une manière favorisant la transparence. Ensuite, le règlement prévoit la mise en place de mesures nationales sur la **récupération des déchets d'extraction et l'amélioration de la recyclabilité des aimants permanents**. Il prévoit également la reconnaissance des systèmes de **certification de la durabilité** et la création de déclarations d'empreinte environnementale. Les promoteurs de projets sont tenus de rendre publiques toutes les informations relatives au respect des exigences du règlement. Un Comité européen des matières premières critiques est institué. Il doit conseiller la Commission et assurer les missions techniques nécessaires pour le pilotage des obligations du règlement. Est aussi créé un « Club des matières premières critiques », outil de la diplomatie « minérale » européenne pour coordonner l'action des États consommateurs d'ETR, mais aussi pour négocier des accords d'approvisionnement auprès des États exportateurs (Hool et al., 2023). Pour atteindre ces objectifs, des obligations sont aussi imposées aux entreprises qui à travers leur devoir de « vigilance » en ce qui concerne les matériaux critiques, doivent participer à la politique européenne des terres rares, notamment par la promotion de l'économie circulaire.

2.2.1.4.1 En premier lieu, dans ce contexte, des objectifs sont fixés aux États et aux entreprises par l'UE.

Le droit européen impose des objectifs chiffrés de relocalisation des chaînes de valeur des grandes entreprises industrielles sur le territoire des États membres de l'Union pour limiter l'approvisionnement extérieur en matériaux critiques. Le Règlement détermine des critères dits « de référence » afin de

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

traduire les objectifs pour l'extraction, le traitement et le recyclage des matériaux critiques au niveau national. Le règlement fixe ainsi des parts minimales de la demande de l'UE devant être couvertes par des matières premières d'origine nationale, transformées et recyclées. Cette exigence vise à contraindre les États à exercer une pression sur l'industrie minière et l'industrie de transformation pour qu'elles augmentent leurs capacités de production nationales. Ces objectifs visent également directement les entreprises qui devront reprendre ces objectifs fixés aux États dans leurs rapports sur la « vigilance matériaux critiques ».

2.2.1.4.2 En second lieu, des obligations sont imposées aux États et aux entreprises pour réaliser ces objectifs.

Le Règlement européen s'adressant aux États, ceux-ci doivent imposer aux entreprises des obligations par de nouvelles lois, ou en modifiant des textes existants relatifs par exemple à l'extraction de minerais, la régulation des produits utilisant des minerais critiques ou encore au contrôle de ces réglementations par les parties prenantes, notamment en organisant la transparence. Certaines obligations sont cependant imposées directement aux entreprises, sans qu'une « transposition » par les États ne soit nécessaire : par exemple, l'article 24(2) prévoit qu'au moins tous les trois ans, les grandes entreprises produisant des technologies stratégiques, c'est-à-dire celles produisant des batteries, des équipements pour la production ou l'utilisation d'hydrogène, ou des équipements indispensables à la production d'énergies renouvelables (ENR), devront procéder à une évaluation des risques liés à leur chaîne d'approvisionnement. Cette évaluation devra inclure une cartographie des endroits où les matières premières stratégiques qu'elles utilisent sont extraites, transformées ou recyclées, une analyse des facteurs pouvant influencer leur approvisionnement, ainsi qu'une évaluation de leur vulnérabilité aux ruptures d'approvisionnement. Le « devoir de vigilance » au cœur du pacte vert européen devient ainsi un outil non plus seulement de durabilité mais aussi de sécurité.

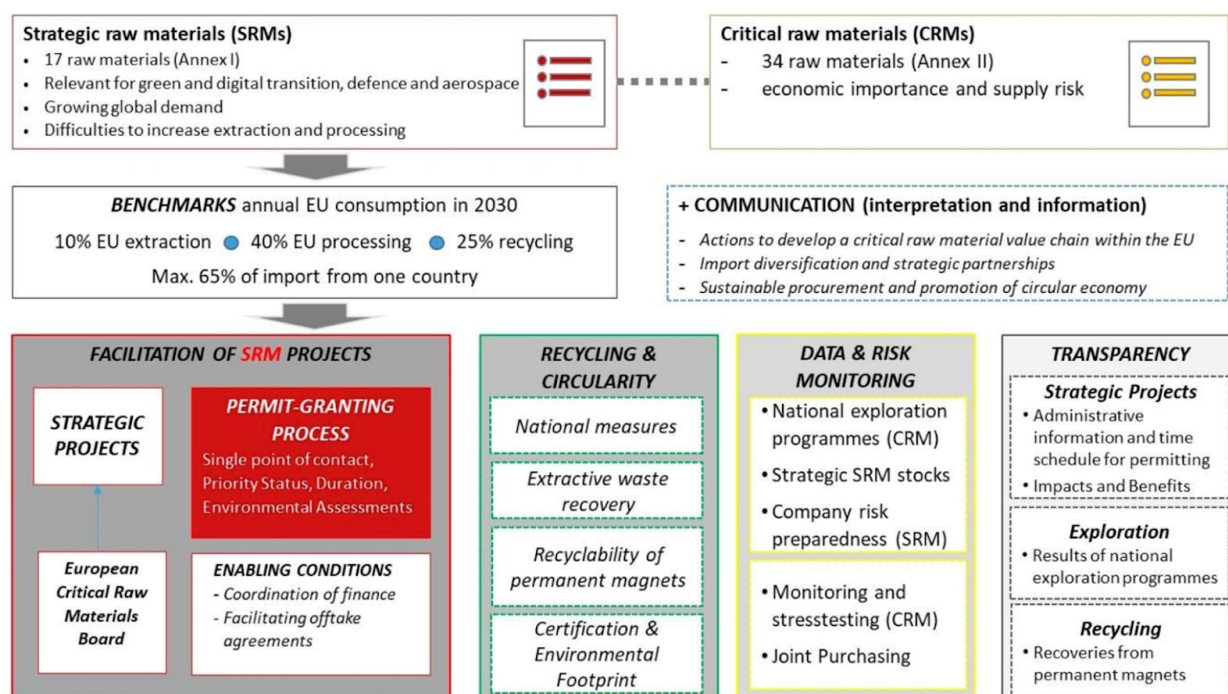


Figure 2.18 Tirée de Bernhard Tröster, Simela Papatheophilou, Karin Küblböck, 2024, p.9

2.2.1.4.2.1 *La simplification du droit en vue de l'extraction des minerais critiques*

Le Règlement de 2024 sur les matières premières critiques (CRMA) est un cadre réglementaire conçu pour répondre aux défis auxquels l'Union européenne est confrontée dans les secteurs stratégiques de la décarbonisation, de la numérisation, de l'aérospatial et de la défense. Ce règlement s'inscrit donc dans le cadre plus large du « plan industriel vert » aligné sur la « loi sur l'industrie nette zéro » (NZIA) de l'Union introduite en 2023 en réponse au plan américain « *Inflation reduction act* » (IRA) de 2022 destiné à financer la transition écologique. Le Règlement participe en effet à la stratégie visant à tenter de faire de l'UE une plaque tournante pour les industries des technologies propres. Les « paquets » NZIA et CRMA répondent aux tendances internationales de protection des technologies et des ressources énergétiques propres. Pour ce faire, ils créent un environnement plus favorable à l'augmentation de la capacité de production de l'UE pour les technologies et les produits à consommation nette zéro nécessaire pour atteindre les objectifs climatiques ambitieux de l'Europe. Le droit relatif aux matières premières critiques et donc aux terres rares encourage les activités minières pour les besoins de la transition environnementale (voir notamment (Hache & Normand, 2024)).

Le règlement CRMA est par définition juridiquement directement applicable dans l'ordre juridique des États sans qu'une transposition soit nécessaire. Il implique ainsi un alignement des lois nationales qui régissent le processus d'autorisation des projets de matières premières. Il vise par exemple à modifier les procédures d'approbation de projet en accordant aux « projets stratégiques » le statut d'« intérêt public » qui justifie des délais d'autorisation plus courts et une limitation des consultations publiques. Dans ce contexte, le 25 mars 2025, la Commission européenne a labélisé 47 « projets stratégiques » répartis dans 13 États européens. La France est le pays qui en compte le plus, avec neuf projets, la Suède en comptant sept, la Finlande six, l'Allemagne cinq et l'Espagne et l'Italie quatre chacune. Le Portugal et la Pologne comptent trois projets chacun, l'Estonie deux, la République Tchèque, la Grèce, la Belgique et la Roumanie un projet. Seule une partie de ces projets vise l'extraction, les autres concernant le recyclage, la transformation ou encore la substitution. Sur les 47 projets labellisés, 25 concernent l'extraction de nouvelles ressources en Europe et 24 la transformation des matières premières pour développer des capacités industrielles européennes. 10 projets ont pour objectif d'améliorer le recyclage des matériaux critiques et de réduire ainsi la dépendance à l'extraction ou à la transformation minière non européenne. Deux projets recherchent par ailleurs des solutions de substitution aux matières premières stratégiques afin d'en limiter l'import et la transformation.

Strategic Projects for the EU



Figure 2.19 Projet stratégique pour l'UE. Figure provenant de la Commission européenne 2025 : https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_25_864.

Concrètement, la procédure d'octroi des autorisations de projets « stratégiques » dans le secteur des matières premières critiques prévue par le CRMA ne devra pas dépasser un certain délai (par exemple 12 ou 15 mois pour les projets de transformation ou de recyclage, 24 ou 27 mois pour les projets extractifs) grâce à une procédure simplifiée et à un traitement administratif rapide et prioritaire ainsi qu'un guichet unique pour les porteurs de projet (art. 8). Le règlement entraîne ainsi des modifications aux règles françaises visant à assurer le respect des obligations issues des conventions d'Aarhus de 1998 sur l'accès à l'information et la participation du public au processus décisionnel en matière d'environnement et d'Espoo de 1991 relative à l'évaluation de l'impact environnemental (art. 14) qui fondent en droit international le principe de démocratie environnementale inscrit dans la Charte de l'environnement de 2004 ayant pourtant valeur constitutionnelle. Il est cependant prévu que l'État membre dont le territoire est concerné par un projet stratégique porte assistance au porteur du projet stratégique pour accroître la capacité des promoteurs de projets à assurer la participation constructive et active des communautés concernées par le projet (art. 14).

En France, le Règlement matières premières critiques modifie ainsi d'abord l'ordonnance n°2016-1058 du 3 août 2016 et le décret n°2016-1110 du 11 août 2016 relatifs aux règles applicables à l'évaluation environnementale des projets, plans et programmes et transposant la directive européenne relative à l'évaluation des incidences sur l'environnement (directive 2011/92/UE). L'ordonnance et le décret posent en effet les modalités dans lesquelles les projets susceptibles d'avoir des effets importants sur l'environnement doivent faire l'objet d'une évaluation des incidences sur l'environnement et d'une information et consultation des populations impactées. Le Règlement européen entraîne ensuite une

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

modification de l'ordonnance n° 2022-1423 du 10 novembre 2022 portant diverses dispositions relatives au code minier, car l'essentiel du nouveau code minier résidait dans la systématisation de la participation du public. Le code minier introduisait en effet la possibilité de prolonger les permis exclusifs de recherche, tout en soumettant ces prolongations à l'analyse environnementale, économique et sociale, pièce centrale de la réforme du code. Plusieurs actes ou procédures étaient soumis par le Code à une participation du public, tel que la mise en place de servitudes d'utilité publique sur les sites miniers existants ou en fin d'activité, la révision ou modification des plans de prévention des risques miniers, etc.

2.2.1.4.2.2 Recyclage, circularité, vigilance

Le Règlement CRMA impose aux États la mise en place de mesures sur la circularité (article 26), dont la récupération des déchets d'extraction (article 27) et l'amélioration de la recyclabilité des aimants permanents grâce à un nouveau système d'étiquetage (articles 28 et 29). Le règlement prévoit également la reconnaissance des systèmes de certification de la durabilité (article 30) et la création de déclarations d'empreinte environnementale (article 31). Le CRMA accorde une place particulière à l'amélioration de la circularité des aimants permanents.

La Commission européenne a publié le 1er juin 2025 un projet de règlement d'exécution du règlement européen CRMA qui vise en son article 26 la « circularité » (*RESourceEU Action Plan. Accelerating our critical raw materials strategy to adapt to a new reality*. Communication de la Commission de l'UE, 3. 12. 2025) : les obligations générales du CRMA en lien avec la circularité sont renforcées pour une liste des produits, composants et flux de déchets considérés comme présentant un haut potentiel de récupération de matières premières critiques. Un producteur devra, en plus des autres obligations générales, instaurer ou renforcer la circularité en lien avec les terres rares sur des produits « à haut potentiel de valorisation », à savoir : les batteries ; les équipements électriques et électroniques ; les éoliennes ; les moteurs (électriques et autres, s'ils contiennent de l'électronique ou certains matériaux) ; les moyens d'éclairage des transports ; les infrastructures énergétiques et de télécommunications ; les pompes industrielles ; les catalyseurs industriels ; les digestats ou composts issus de la collecte séparée des biodéchets ; les scories, boues et cendres ; ainsi que les déchets du bâtiment contenant des alliages d'aluminium et de cuivre et les câbles dans les bâtiments. Pour certains de ces produits, les composants recherchés sont précisés. Les États membres devront élaborer des programmes nationaux afin de promouvoir et traiter les déchets issus de ces produits et augmenter l'utilisation des matières premières critiques secondaires.

Ces obligations ne sont pas en règle générale détaillées dans le règlement CRMA ou le *RESourceEU Action plan* et sont en fait des « renvois » (juridiques) à d'autres textes existants. D'abord, ces « renvois » concernent des textes spéciaux portant sur des produits contenant des terres rares, tels que :

- Le Règlement du 12 juillet 2023 relatif aux batteries et aux déchets de batteries, modifiant la directive 2008/98/CE (règlement batteries) (UE) 2019/1020) qui prévoit une extension du principe de responsabilité élargie des producteurs (dit REP* ou obligation de recyclage) à tout type de piles et accumulateurs mis sur le marché européen et français et accentuant les restrictions d'utilisation de certaines substances dangereuses (mercure et cadmium) dans les piles et accumulateurs mis sur le marché communautaire, intégrés ou non à des appareils. Le règlement dit « batteries » prévoit des obligations de « marquage » des piles et accumulateurs mis sur le marché communautaire (symbole de la poubelle sur roues barrée d'une croix, symbole chimique des substances dangereuses contenues, capacité pour les piles et accumulateurs portables et automobiles) ainsi qu'une extension du « principe de collecte sélective » à l'ensemble des piles et accumulateurs usagés qu'ils contiennent ou non des substances dangereuses et l'introduction de taux de collecte minimaux pour les piles et accumulateurs portables, ainsi que des rendements minimaux de « recyclage » (compris pour chaque procédé de recyclage entre 50 et 75% selon les cas) ;

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

- La directive européenne relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) (Directive 2012/19/EU), qui a pour but de limiter et de réduire la quantité de déchets mis à la décharge en encourageant une réutilisation*, un recyclage et un traitement écoresponsable.
- La directive-cadre (UE) 2008/98/CE sur les déchets et le règlement concernant les transferts de déchets, avec des textes qui couvrent les opérations de traitement des déchets, comme la directive sur les émissions industrielles (incinération des déchets) et la directive sur la mise en décharge.
- Et d'autres textes spécifiques qui traitent de différents types de déchets : les boues d'épuration dans l'agriculture ; les emballages et les déchets d'emballage ; les PCB/ PCT ; les véhicules en fin de vie ; les piles et accumulateurs ; la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques (RoHS2).

Ensuite, des « renvois » à des textes généraux (écoconception, vigilance, information) :

- Le Règlement (UE) 2024/1781 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'**écoconception** applicables aux produits durables a été adopté le 13 juin 2024. Ce règlement porte en réalité sur l'économie circulaire évoquée par le règlement matières critiques, car il doit permettre d'améliorer les « aspects des produits » que sont la durabilité c'est-à-dire la possibilité de réemploi, la réparabilité, l'efficacité énergétique, la recyclabilité, le calcul d'empreintes carbone et environnementale, le traitement du produit en fin de vie, la garantie que les produits concernés ne deviennent pas obsolètes prématurément, et la création d'un passeport numérique pour s'assurer du contrôle de ces « aspects du produit ».
- La Directive (UE) 2024/1760 du Parlement européen et du Conseil du 13 juin 2024 sur le devoir de vigilance des entreprises en matière de durabilité et modifiant la directive (UE) 2019/1937 et le règlement (UE) 2023/2859 / **(CS3D)**. L'entreprise, par cette obligation de vigilance et de remédiation des incidences négatives de l'activité de l'entreprise sur les situations protégées par le droit de l'environnement ou les droits humains a ainsi un nouveau rôle social et politique global dans la gouvernance mondiale en étant directement assujettie au droit international des droits de l'homme et de l'environnement. La directive s'applique néanmoins aux seules grandes entreprises (plus de 5000 salariés et CA supérieur à 1,5M€).
- Le Règlement sur la communication extra financière : l'objectif principal de la « *Corporate Sustainability Reporting Directive* » (**CSRD**), Directive (UE) 2022/2464 du 14 décembre 2022 est d'harmoniser le *reporting* de durabilité des entreprises et d'améliorer la disponibilité et la qualité des données ESG (environnementales, sociales et de gouvernance) publiées. En résumé, les entreprises devront inclure, dans leur rapport de gestion, les informations exigées par les normes ESRS élaborées par l'EFRAG qui permettent de prévenir les risques et de comprendre à la fois (double matérialité) les incidences (ou « impacts ») de l'entreprise sur les questions de durabilité (environnement et droits humains) et la manière dont ces questions de durabilité influent sur l'entreprise, c'est-à-dire l'évolution des affaires, les résultats et la situation de l'entreprise. Le rapport de gestion des grandes entreprises et des petites et moyennes entreprises devra notamment comprendre une brève description du modèle commercial et de la stratégie de l'entreprise indiquant : le degré de résilience du modèle commercial et de la stratégie de l'entreprise concernant les risques liés aux questions de durabilité ; les opportunités que recèlent les questions de durabilité pour l'entreprise ; les plans définis par l'entreprise, y compris les actions de mise en œuvre et les plans financiers et d'investissement connexes, pour assurer la compatibilité de son modèle commercial et de sa stratégie avec la transition vers une économie durable, la limitation du réchauffement climatique à 1,5 °C. Le rapport publié par les entreprises mères d'un grand groupe devra aussi tenir compte et expliquer les différences en termes de risque ou d'incidences pouvant exister entre le groupe et une ou plusieurs de ses filiales. Le

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

« risque » visé par la CS3D et la CSRD comprend donc désormais aussi le risque de « criticité », c'est-à-dire de l'approvisionnement en terres rares¹³.

2.2.1.4.2.3 *Transparence et démocratie*

Le rapport entre sécurité et durabilité est aussi transformé en ce que l'objectif de sécurité renouvelle l'impératif de transparence nécessaire à l'application du droit relatif à l'utilisation des matières premières critiques. La transparence devrait ainsi faciliter la procédure d'octroi des permis, favoriser « l'acceptation » par les communautés locales des nouveaux projets d'exploitation minière, de traitement et de recyclage, mais aussi permettre un contrôle de l'application de ce droit des matières premières critiques par les entreprises et les États. La sécurité renouvelle ainsi la notion de démocratie environnementale, notamment dans la chaîne de valeur.

Le Règlement comporte ainsi plusieurs règles visant à accroître la transparence, en particulier des projets stratégiques. Les promoteurs de projets sont tenus de rendre publiques toutes les informations pertinentes concernant leurs projets (article 8). Les autorités doivent fournir davantage d'informations au cours de la procédure d'octroi des permis (article 18). Des informations, par exemple sur les programmes nationaux d'exploration (article 19) et les initiatives de recyclage (article 29), doivent être rendues publiques. Plus généralement, les États membres sont tenus de rassembler des données sur les stocks stratégiques (articles 22 et 23) et sur les entreprises qui produisent des technologies stratégiques. Ces entreprises sont également tenues d'effectuer des évaluations des risques pour leurs chaînes d'approvisionnement en matières premières stratégiques (MPS) incluant une cartographie de l'origine des MPS, l'analyse des facteurs pouvant influencer leur approvisionnement et une évaluation sur la vulnérabilité de l'entreprise face à une rupture de celui-ci (article 24).

En cette matière encore, le règlement « renvoie » implicitement à d'autres textes. D'abord en ce qui concerne la **traçabilité des produits**, déjà organisée par le Règlement (UE) 2017/821 du Parlement européen et du Conseil du 17 mai 2017 fixant des obligations liées au devoir de diligence à l'égard de la chaîne d'approvisionnement pour les importateurs de l'Union qui importent de l'étain, du tantale et du tungstène, leurs minerais et de l'or provenant de zones de conflit ou à haut risque : Les importateurs de minerais de l'UE doivent identifier et évaluer les risques dans leur chaîne d'approvisionnement en minerais ; mettre en œuvre une stratégie pour faire face aux risques identifiés ; faire effectuer des vérifications par des tiers indépendants de leur devoir de diligence à l'égard de la chaîne d'approvisionnement ; établir un rapport annuel sur les mesures et pratiques mises en place en faveur d'un approvisionnement responsable. La Commission de l'UE a ainsi établi un registre des mécanismes de devoir de diligence à l'égard de la chaîne d'approvisionnement certifiés, publié sur internet, ainsi qu'une liste des fonderies et affinerie internationales responsables.

Ensuite, le Règlement (UE) 2024/1781 du 13 juin 2024 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits durables prévoit de nouveaux mécanismes de traçabilité, de transparence et de « démocratisation » tels que le « **passeport numérique produit** » (voir *infra*).

¹³ Norme ESRS E5 *Resource Use and Circular economy*; voir le site de l'ESRS Knowledge Hub : <https://knowledgehub.efrag.org/eng#draft-simplified-esrs-technical-advice-30-november-2025>.

2.2.1.4.3 En troisième lieu, apparaît une nouvelle politique d'accords internationaux pour sécuriser les approvisionnements européens et d'innovation par la recherche en vue de relocaliser les chaînes de valeur.

D'abord cette politique internationale prend la forme d'une institutionnalisation de la politique mise en place en ce qui concerne les terres rares : un Comité européen des matières premières critiques est institué par le Règlement CRMA (article 35). Il doit donner des conseils à la Commission et assure les missions nécessaires pour le pilotage des obligations du Règlement. Un « Club des matières premières critiques » est aussi créé, outil de la diplomatie « minérale » européenne (Règlement (UE) 2024/1735 du Parlement européen et du Conseil du 13 juin 2024 relatif à l'établissement d'un cadre de mesures en vue de renforcer l'écosystème européen de la fabrication de produits de technologie « zéro net » et modifiant le règlement (UE) 2018/1724, considérant 4). L'objectif de diminution de la dépendance en approvisionnement de matériaux critiques auprès de la Chine oblige en effet l'Union à repenser son action diplomatique internationale, entre compétition et collaboration pour renforcer son autonomie stratégique (Hache & Normand, 2024). L'UE s'engage ainsi à renforcer ses liens non seulement avec les pays riches en ressources, mais aussi avec des consommateurs pour coopérer en matière d'approvisionnement en matières premières critiques, évitant ainsi une concurrence préjudiciable. La création d'un « club des matières premières critiques » vise à renforcer les partenariats internationaux afin de préserver la sécurité de l'approvisionnement et faciliter les investissements durables dans les pays riches en ressources (De Decker, 2023). Concrètement, un tel « club » pourra négocier des accords commerciaux axés sur les matériaux critiques avec des alliés de l'UE tels que le Japon, le Royaume-Uni et les États-Unis. Il s'agit d'abord de coordonner mutuellement les subventions climatiques pour l'industrie manufacturière et l'approvisionnement en matières premières critiques, le traitement et le recyclage de ces dernières. Ce club pourrait ensuite s'adresser, en tant qu'entité d'achat, à divers fournisseurs de matériaux critiques, par exemple en Afrique ou en Amérique du Sud, garantissant ainsi un accès fiable tout en évitant une guerre des enchères entre les pays du G-7. De nombreuses questions se posent cependant : comment ce club prendra-t-il forme ? Quelles seront ses normes en matière de passation de marchés ? Comment sera-t-il perçu par les pays riches en ressources ?

Ensuite, l'innovation par la recherche doit permettre d'aider la relocalisation des chaînes de valeurs en Europe. L'ensemble des éléments de la chaîne de valeur de biens contenant des matériaux critiques peut en effet être transformé pour réduire -par une innovation technologique- leur consommation : l'extraction, le traitement des matières premières, mais aussi l'écoconception de produits, la substitution des matériaux les plus critiques ou encore l'allongement de la durée de vie des équipements, le recyclage, etc. C'est toute l'industrie des terres rares qui doit développer l'innovation visant à réduire l'usage des terres rares importées afin de répondre à l'augmentation de l'offre de biens comportant ces terres rares. Par exemple, la Commission européenne a présenté son « Net Zero Industry Act » (NZIA), qui propose de fixer un objectif de production nationale de 40 % des technologies propres d'ici à 2030 (article 5 du Règlement (UE) 2024/1735 du Parlement européen et du Conseil du 13 juin 2024 relatif à l'établissement d'un cadre de mesures en vue de renforcer l'écosystème européen de la fabrication de produits de technologie « zéro net » et modifiant le règlement (UE) 2018/1724). Pour réussir, le CRMA et le NZIA doivent aller de pair : l'absence de diversification de l'offre de matières premières critiques en amont risque d'entraver la transition vers l'industrie verte en aval avec la production de technologies « zero net », et vice versa (NZIA, considérant 11). La Commission a donc mis en place des projets d'innovation importants d'intérêt européen commun (IPCEI) sur les chaînes de valeur des batteries, qui comprennent une section sur les matières premières et les technologies de l'information et de la communication.

2.2.1.4.4 En quatrième lieu, des indicateurs scientifiques et managériaux doivent être mis en place par les États et les entreprises pour appliquer la politique relative à l'utilisation des terres rares.

La « gouvernance européenne des terres rares » en cours d'élaboration repose sur les experts et les entreprises et son effectivité dépend en réalité de ceux-ci. Les objectifs et obligations reposant sur les États et les entreprises doivent cependant être mis en œuvre dans un dialogue avec les scientifiques. Une littérature importante porte ainsi sur les critères d'évaluation scientifique de l'impact des entreprises pour l'application de la politique relative aux terres rares. Par exemple, les « indicateurs d'impact » sont nécessaires non seulement à l'élaboration de politiques efficaces en matière de ressources pour surveiller l'extraction et la consommation par les économies, ainsi que tous les impacts environnementaux qui y sont liés, mais aussi pour faire appliquer ces politiques par les entreprises. Plusieurs méthodologies européennes sont possibles : (i) la comptabilité basée sur la « masse » (c'est-à-dire l'analyse des flux de matières) ; (ii) l'« évaluation de l'impact », fondée sur la méthodologie de l'évaluation du cycle de vie, et (iii) la « criticité des ressources », basée sur l'évaluation des matières premières critiques pour l'économie de l'UE. Or ce choix méthodologique a des répercussions importantes en termes de hiérarchisation des ressources. Par conséquent, le choix de la méthodologie comptable et la fixation des objectifs devraient être guidés par le(s) objectif(s) politique(s) (c'est-à-dire la dématérialisation, la réduction de l'impact sur l'environnement et la sécurité de l'approvisionnement en ressources), en complétant éventuellement les différents enseignements tirés des trois approches. La dimension politique des indicateurs scientifiques est ainsi soulignée par certains auteurs comme (L. Mancini et al., 2015).

La dimension sociale (« empreinte sociale ») est celle qui est la plus rarement présente dans la littérature sur les indicateurs scientifiques en lien avec les terres rares. Peu d'indicateurs prennent en effet en compte les liens entre énergie, minéraux et société. Par exemple, l'analyse de l'impact d'une ferme éolienne nécessite une meilleure compréhension des interactions complexes non seulement entre ces deux secteurs industriels, mais aussi entre l'environnement naturel et la société humaine, caractérisées comme le lien entre énergie-minéraux-société (EMS nexus) étudié par la littérature. Le nexus EMS est analysé à l'aide d'un modèle étendu d'analyse sociale du cycle de vie (sLCA) et d'une approche par scénarios. Pour cette nouvelle ACV sociale, la base de données des points chauds sociaux (SHDB) a pu être utilisée dans la littérature pour analyser la production de terres rares en Australie, en Malaisie (procédé Mount Weld), aux États-Unis (procédé Mountain Pass II) et en Chine (procédé Bayan Obo). Sur la base de la Social Hotspots Database (SHDB), le modèle sLCA permet de déterminer l'empreinte sociale de la production d'aimants permanents à base de terres rares pour 2012. L'approche du modèle d'ACV sociale permet également une nouvelle interprétation du coût du cycle de vie sociétal (CCVS). Les risques sociaux sont en effet monétisés pour les trois chaînes de production de terres rares. En intégrant l'indice de développement humain (IDH), la méthode permet une nouvelle estimation de l'empreinte sociale et de l'intensité du risque social pour les trois sites de production de terres rares (Schloer et al., 2018).

Des études de cas en dehors du champ des terres rares illustrent les incertitudes des indicateurs de criticité. Le Cobalt par exemple est un élément indispensable à la fabrication de batteries avancées, moteurs à réaction, aimants permanents à base de terres rares, catalyseurs pétroliers, pièces d'outils qui permettent la construction, la fabrication et l'exploitation minière. Or, d'une part, le cobalt obtient régulièrement un score élevé dans les évaluations des risques liés à l'approvisionnement en minerais en raison de la concentration de la production minière de cobalt en République démocratique du Congo (RDC). Et d'autre part, cette évaluation est contraire à la réalité de l'approvisionnement depuis les années 1925 qui se caractérise par une certaine stabilité résultant notamment des investissements réalisés par les entreprises chinoises à partir du milieu des années 2000. Compte tenu de cette croissance continue,

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

on peut se demander pourquoi cette offre — réelle - est perçue comme risquée. Cela dépend des critères d'évaluation du risque. Certaines analyses intègrent en effet des outils permettant de prendre en compte des considérations liées à la responsabilité sociale des entreprises ou au respect droit international (droit international des droits de l'homme, notamment) alors que d'autres analyses ne prennent en compte que les volumes historiques de production (Gulley, 2022) qui montrent que la production minière de la RDC - légale et artisanale - continuera probablement à être le principal fournisseur de la demande mondiale croissante de cobalt dans les batteries lithium-ion. Ainsi, une entreprise doit-elle qualifier l'approvisionnement en RDC comme « risqué » au sens de la « vigilance matériaux critiques » ? Cela dépendra des critères très larges élaborés par des experts dans un règlement délégué, mais aussi de leur adaptation à l'entreprise et sa chaîne de valeur par celle-ci, laissant une grande marge d'appréciation à l'industrie elle-même (Lhuillier, 2022).

Un autre exemple concerne les indicateurs de recyclage qui sont un élément important de l'évaluation de la criticité. Certes, l'UE a entrepris des efforts importants pour améliorer la base d'information des indicateurs de recyclage. En comparant les définitions des indicateurs de recyclage utilisés dans les rapports de l'UE, des chercheurs évaluent leur pertinence pour les études de criticité et les rapports européens relatifs à la circularité. Le taux de recyclage en fin de vie (*EoL RIR*, schématiquement ce qui est recyclé par rapport à tout ce qui est jeté (collecté ou non) utilisé à la fois dans les évaluations de la criticité et dans le suivi de l'économie circulaire) n'est ainsi pas approprié en soi pour mesurer les progrès accomplis dans l'économie circulaire, car il ne prend pas en compte la qualité des matériaux recyclés. Il assimile le recyclage fonctionnel au recyclage non fonctionnel ainsi que le recyclage et le décyclage (c'est-à-dire le matériau recyclé présentant une qualité inférieure au matériau original). De plus, son écart avec les indicateurs utilisés par les chercheurs en général rend difficile son appréciation (Luis A. Tercero Espinoza, 2021). De nombreuses études proposent en effet de nouveaux indicateurs ou outils d'aide à la décision, analysant les installations de gestion des déchets à l'aide de données quantitatives (techniques et économiques) et qualitatives (sociales et environnementales). Elles adoptent des technologies pour aider la conception et la fabrication de pièces réutilisables. Ces technologies permettent d'améliorer l'efficacité de systèmes complexes de reconditionnement, désormais couramment intégrés dans des plateformes de gestion et de contrôle sous forme de « cloud » (S. Mancini et al., 2023) (Mancusi et al., 2022).

Autre exemple encore, les données d'observation de la Terre (OT) par les satellites Sentinel du programme européen Copernicus, sont restées sous-utilisées. Le programme RawMatCop, cofinancé par la Commission européenne et l'EIT RawMaterials, vise à promouvoir l'utilisation des données Copernicus dans le secteur des matières premières afin de contribuer à un approvisionnement sûr et durable. Les applications peuvent être regroupées en trois catégories couvrant l'ensemble du cycle minier, de l'exploration à l'exploitation et à l'après-mine, mais aussi les sources secondaires afin d'identifier les zones minières à fort potentiel, la cartographie de l'exploitation minière informelle, la surveillance de la stabilité du sol liée à l'activité minière, les incidences sur l'environnement et les incidences industrielles et sociales des innovations technologiques sur le site. Il existe ainsi des propositions pour des modes scientifiques de monitoring, pour remplacer ou compléter les audits managériaux (Kasmaeeyazdi et al., 2021) (Voir sur ces éléments le Chapitre 4).

En définitive, le règlement européen sur les matières premières critiques apparaît comme une actualisation de la « Nouvelle Approche » de la Commission européenne en termes de régulation, nommée ainsi en mai 1985. Cette approche s'appuyait sur la complémentarité des rôles entre les pouvoirs publics, qui fixent des exigences essentielles pour la mise sur le marché des produits, et les organismes de normalisation, qui proposent des moyens pour atteindre ces objectifs. Les experts sont ainsi co-régulateurs. Le Green deal mais aussi le Règlement sur les matières premières critiques sont une mutation de ce modèle normatif, une « nouvelle - nouvelle approche » : les entreprises apparaissent aussi comme

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

un acteur de la régulation européenne des chaînes de valeurs, en charge de faire appliquer le droit européen tout au long de la chaîne de valeur (Lhuillier, 2022).

2.2.2 L'articulation de la réglementation européenne relative à l'utilisation des terres rares avec les principes de l'économie circulaire

La réduction de l'usage des ETR s'inscrit dans une logique de circularité qui prend en considération les différentes étapes du cycle de vie d'un produit. Le droit plus général relatif à l'écoconception et aux différentes facettes de l'économie circulaire s'applique ainsi aux produits contenant des ETR.

2.2.2.1 Le renvoi du Règlement européen matières premières critiques aux principes de l'économie circulaire et du développement durable

Le renforcement de l'articulation entre ces deux cadres juridiques créés de manière relativement autonome est désormais une priorité pour l'Union européenne. Par exemple, le futur projet de règlement d'exécution portant sur les matières premières critiques en vue de l'application du CRMA listera les produits, composants et déchets présentant un potentiel élevé de valorisation des matières premières critiques, intégrant concrètement la circularité dans le droit des matériaux critiques¹⁴. Ici encore, le caractère récent de ces évolutions se traduit par un faible nombre de publications directement liées à ce lien entre matériaux critiques et circularité. Néanmoins, la littérature relative au droit applicable à l'économie circulaire dans son ensemble est fournie et la notion de sobriété est elle aussi de plus en plus abordée par les chercheurs. La logique de réduction de la demande et de sobriété en matériaux est considérée nécessaire à l'eupéanisation et la diversification des filières d'approvisionnement en matières premières critiques (Hache & Normand, 2024). Il convient ici de retracer l'entrée dans la sphère juridique des notions d'économie circulaire et de sobriété afin de s'intéresser ensuite à la manière dont elles peuvent être reliées, en droit, à la question de l'utilisation des terres rares.

La première distinction entre économie linéaire et circulaire est développée chez Pearce et Turner (Pearce & Turner, 1989). Ces auteurs considèrent que dans l'économie linéaire les ressources naturelles (R) sont des actifs (inputs) servant à la production (P) et à la consommation (C) mais également des puits qui accueillent les déchets (W) issus de l'activité économique (outputs). La circularité intervient lorsque certains de ces déchets sont réintégrés en tant que ressources par le recyclage (r). La majorité des déchets n'est cependant pas recyclée et est rejetée dans l'environnement qui n'a pas nécessairement la capacité de les assimiler (*environment as waste sink*) (Pearce & Turner, 1989). L'économie circulaire est ainsi un système régénératif dans lequel l'apport en ressources et les déchets, les émissions et les fuites d'énergie sont minimisés en ralentissant, en fermant et en réduisant les boucles de matériaux et d'énergie. Cet objectif peut être atteint par la conception durable, l'entretien, la réparation, la réutilisation, la refabrication, la remise à neuf et le recyclage (Geissdoerfer et al., 2017).

Par la suite, l'économie circulaire se diffuse dans le monde. Pour certains cette diffusion est liée à l'opération de communication lancée par la Fondation Ellen MacArthur en 2010, associée au cabinet de

¹⁴ Le texte est en cours de rédaction : Commission Implementing Regulation (EU) .../... listing the products, components and waste streams considered as having a relevant critical raw materials recovery potential under Regulation (EU) 2024/1252.

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

conseil McKinsey - très introduit auprès des multinationales et des gouvernements (Marty & Druelle-Korn, 2023). Le concept s'est révélé stratégique pour certaines entreprises qui s'en sont emparées et y ont vu une opportunité de réduction de leurs coûts et de création d'emplois, dans un contexte de raréfaction des ressources. Pour Marty et Druelle-Korn, l'utilisation du concept n'est cependant pas sans risques : est-ce un « mot valise » que chaque acteur peut interpréter à sa manière, créant plus de confusion que de clarification ? Est-ce un outil de « greenwashing » pour les entreprises ? Comme le rappellent les auteurs, par exemple, « une des entreprises qui financent la Fondation Ellen MacArthur n'est autre que la Coca Cola Company, considérée comme l'entreprise qui contribue sans doute le plus à la diffusion de plastiques à usage unique dans le monde ». Le concept peut en outre laisser croire que l'on peut recycler des produits à l'infini, en boucle fermée, ce qui s'avère en réalité la plupart du temps impossible. Pour autant, ces auteurs considèrent que le concept possède d'intéressantes vertus comme celle de « mieux visibiliser et mettre en valeur tout un ensemble d'activités et de pratiques qui, jusque-là, menaient une existence discrète ou cachée : collecte, tri, valorisation énergétique, recyclage et réemploi des déchets par exemple ; services de réparation-entretien après-vente également. Il permet également de mieux relier entre elles ces pratiques — comme l'économie de la fonctionnalité, l'allongement de la durée de vie des produits, l'approvisionnement durable, l'écologie industrielle et territoriale, etc. — en soulignant qu'elles participent d'une logique commune, qui consiste à accroître la circularité de l'économie ». Quoi qu'il en soit, l'expression s'est vue largement développée et intégrée dans des textes juridiques internationaux mais aussi nationaux.

L'économie circulaire apparaît d'abord dans des législations spéciales relatives aux déchets comme en France avec la loi du 15 juillet 1975 et la loi du 13 juillet 1992 dans lesquelles il est question de faciliter la récupération des matériaux et le recyclage ; en Allemagne, en 1996 avec la loi sur le cycle fermé des substances et la gestion des déchets ; ou encore au Japon, avec la loi fondamentale du 2 juin 2000 pour l'établissement d'une société du recyclage. En Chine, l'économie circulaire est élevée au rang de stratégie politique nationale par la loi sur la promotion de l'économie circulaire du 29 août 2008, réglementation initiée dès 2002 et présentée comme une politique de l'État chinois face aux problèmes de dégradation de l'environnement et de raréfaction des ressources (Su et al., 2013). L'approche chinoise vise également et à garantir une sécurité d'approvisionnement des ressources ; le 14^{ème} plan quinquennal 2021-2025 sur l'économie circulaire expose que dans la « double circulation » des ressources (domestique et internationale), la priorité est donnée à la circulation interne des ressources (R. Chen, 2023).

ZOOM. Extrait de la loi chinoise du 29 août 2008

Article 1 La présente loi est formulée dans le but de promouvoir le développement de l'économie circulaire, d'améliorer l'efficacité de l'utilisation des ressources, de protéger et d'améliorer l'environnement et de réaliser le développement durable.

Article 2 L'expression « économie circulaire » mentionnée dans les présentes mesures est un terme générique désignant les activités de réduction, de réutilisation et de recyclage menées dans le cadre du processus de production, de réutilisation et de consommation.

Le terme « réutilisation », tel qu'il est mentionné dans ces mesures, se réfère à l'utilisation directe des déchets comme produits, à l'utilisation après réparation, renouvellement ou reproduction, ou l'utilisation d'une partie ou de la totalité des déchets en tant que composants d'autres produits.

Le terme « recyclage », tel qu'il est mentionné dans ces mesures, se réfère à l'utilisation de déchets en tant que matières premières directement ou après régénération.

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

L'économie circulaire est envisagée ensuite comme une condition du développement durable (Geissdoerfer et al., 2017). Parmi les objectifs de développement durable (ODD) adoptés le 25 septembre 2015 par l'Assemblée générale des Nations-Unies (Résolution 70/1), l'objectif 12 vise à établir des modes de production et de consommation durables, les cibles visées par cet objectif sont notamment de parvenir à une gestion durable et à une utilisation rationnelle des ressources naturelles (cible 12.2) ainsi que, d'ici à 2030, de réduire considérablement la production de déchets par la prévention, la réduction, le recyclage et la réutilisation (cible 12.5). Le 2 décembre 2015, l'Union européenne adoptait un plan d'action en faveur de l'économie circulaire (COM (2015) 614 final) visant expressément à poursuivre l'objectif 12 des ODD : « Le présent plan d'action contribuera à la réalisation des objectifs de développement durable (ODD) d'ici à 2030, et en particulier l'objectif 12 visant à garantir des modèles durables de production et de consommation ». Également en 2015, l'Accord de Paris du 12 décembre ne mentionne pas expressément l'économie circulaire, mais y fait indirectement référence dans son préambule qui souligne l'importance de "modes de vie durables et des modes durables de consommation et de production" pour faire face aux changements climatiques, s'inscrivant ainsi dans l'objectif 12 des ODD des Nations-Unies. Un nouveau plan d'action pour une économie circulaire a par ailleurs été adopté dans le cadre de l'UE le 11 mars 2020 (COM (2020) 98 final) dans lequel elle s'engage à s'efforcer de doubler le taux d'utilisation de matières contribuant à l'économie circulaire au cours de la prochaine décennie (voir le « Circular Economy Action Plan » de 2020 au sein du European Green Deal pour l'Union européenne).

En droit français l'économie circulaire est également rattachée à la poursuite de l'objectif général de développement durable. Depuis la loi n°2015-992 du 17 août 2017 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, l'économie circulaire figure dans le code de l'environnement. L'article L110-1 énonce que l'objectif de développement durable doit être recherché par cinq engagements dont : 1° La lutte contre le changement climatique ; 2° La préservation de la biodiversité, des milieux, des ressources ainsi que la sauvegarde des services qu'ils fournissent et des usages qui s'y rattachent ; 3° La cohésion sociale et la solidarité entre les territoires et les générations ; 4° L'épanouissement de tous les êtres humains ; et 5° la transition vers l'économie circulaire. L'article L110-1-1 précise que :

« la transition vers une économie circulaire vise à atteindre une **empreinte écologique neutre** dans le cadre du respect des limites planétaires et à dépasser le modèle économique linéaire consistant à extraire, fabriquer, consommer et jeter en appelant à une **consommation sobre et responsable des ressources naturelles et des matières premières primaires** ainsi que, par ordre de priorité, à la prévention de la production de déchets, notamment par le réemploi des produits, et, suivant la hiérarchie des modes de traitement des déchets, à une réutilisation, à un recyclage ou, à défaut, à une valorisation des déchets ».

Cette disposition très générale, en particulier en ce qui concerne la sobriété, a vocation à servir de guide, tout en étant juridiquement contraignante et donc obligatoire et invocable devant les tribunaux. Dans le même sens, l'article 191, paragraphe 1 du Traité sur le fonctionnement de l'Union européenne prévoit « l'utilisation prudente et rationnelle des ressources naturelles ». Un constat s'impose : dans ce « droit de la circularité » en pleine cristallisation (Baudouin, 2024) - parfois analysé comme un droit relatif à la « sobriété », même si les deux expressions ne se recoupent pas totalement - **il n'existe pas de régime spécifique concernant les produits contenant des ETR**. Le Règlement-cadre européen (UE) 2024/1781 sur l'écoconception, et la directive-cadre 2008/98/CE sur les déchets ne visent pas les ETR. Ce sont seulement des textes sectoriels dispersés qui s'appliquent au cas par cas certes à des produits « critiques » (batteries, etc.) mais sans aucune mention à la présence d'ETR ou non dans la composition de ces produits.

Le 18 octobre 2022, la Commission économique pour l'Europe (CEE) du Conseil économique et social des Nations-Unies a en outre publié des Lignes directrices en vue de promouvoir la transition vers une économie circulaire (ECE/CECI/WP/2022/4). L'économie circulaire est définie comme: "système de production et de consommation dont les principes cardinaux sont les suivants : i) élimination ou réduction

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

au minimum des déchets et de la pollution ; ii) maintien de la valeur des produits, des matériaux et des ressources dans l'économie aussi longtemps que possible ; iii) conception de produits affranchie de la notion de « fin de vie » et axée sur la régénération et la restauration ; iv) réalisation des objectifs de durabilité et réduction de l'impact environnemental". Plus concrètement, il s'agit selon ces lignes directrices, pour sortir d'une économie encore linéaire à 90% (Bhatnagar et al., 2024), de mettre en œuvre la "méthode des 6R de la durabilité" dans l'ordre hiérarchique suivant, du plus souhaitable au moins souhaitable : Réduire, Réutiliser, Réparer, Reconstruire, Recycler et Récupérer. Cette méthode des 6R est détaillée pour chaque item :

- i) Réduire la quantité de matières premières entrant dans le système, en évitant de devoir utiliser certains produits ou en revoyant la nécessité de le faire, et en maximisant l'utilisation des matériaux et des produits déjà présents sur le marché ;
- ii) Réutiliser : opération consistant à réaffecter les produits et les matériaux à l'usage pour lequel ils ont été conçus ;
- iii) Réparer : les produits et les matériaux sont réparés et rétablis dans leur forme d'origine, moyennant un surcroît d'énergie, de main-d'œuvre et de matière, afin de préserver plus longtemps leur intégrité et leur utilité ;
- iv) Reconstruire : le produit est démonté puis remonté avec des composants de remplacement qui lui assurent un niveau de performance analogue voire supérieur à celui du neuf. La reconstruction se distingue de la remise à neuf, qui consiste à remettre autant que possible le produit en état sans forcément le démonter, ni remplacer de composants ;
- v) Recycler : il s'agit de réduire le produit ou le composant à son niveau matériel le plus élémentaire, après en avoir ôté la valeur ajoutée (travail ou énergie), pour pouvoir retraiter tout ou partie des matériaux afin de fabriquer de nouveaux produits et de remettre les matériaux dans l'économie ;
- vi) Récupérer l'énergie contenue dans les déchets et résidus non recyclables grâce à des processus de valorisation énergétique ou d'autres procédés (bio-)chimiques permettant d'éviter la mise en décharge.

2.2.2.2 L'économie circulaire au service de la réduction de l'utilisation des terres rares

Le recours à des alternatives aux terres rares dans de nombreux produits —ou substituabilité— est étudié par la littérature. L'enjeu en termes de sobriété se situe notamment dans la conception de produits contenant des constituants fiables sur une longue durée, pour diminuer la demande de terres rares, et dans une conception de produits où la séparation des terres rares est facilitée en vue d'en permettre le recyclage. D'autres concepts comme l'optimisation des usages ou de la durée de vie des objets contribuent également à cet objectif. Mais le droit en construction joue actuellement un rôle déterminant dans la poursuite de ces objectifs en adoptant une approche véritablement transversale de ces différents piliers de l'économie circulaire, se trouvant alors parfois confronté à des difficultés d'articulation avec des corps de règles plus anciens telles les règles relatives à la biodiversité (voir par exemple (Ehrmann & Vesa, 2026).

2.2.2.2.1 La réduction de l'utilisation de terres rares par le biais de la promotion et de l'encadrement de l'écoconception par le droit européen

En droit, l'écoconception est une notion relativement récente et peu étudiée (Horn et al., 2023) et ce malgré l'adoption d'une directive consacrée à cette notion dès 2009 puis d'un Règlement (EU) 2024/1781 du 13 juin 2024 sur l'écoconception qui s'y substitue. La littérature juridique sur le rôle de la réglementation en matière de consommation et de production durable reste faible malgré un intérêt croissant pour les politiques de transition (Entsaló et al., 2023).

La définition juridique de l'écoconception figure à l'article 2 du Règlement écoconception de 2024. Elle consiste en « l'intégration de considérations relatives à la durabilité environnementale dans les caractéristiques d'un produit et dans les processus mis en œuvre tout au long de la chaîne de valeur du produit ». D'une part, l'écoconception présente une définition matérielle et fonctionnelle : préserver les matériaux, étendre l'écoconception au-delà du seul processus de conception : une approche globale fondée sur la consommation durable, par exemple en matière de textile (Sadowski et al., 2021). D'autre part, l'écoconception a aussi une dimension performative : l'élaboration d'un cadre juridique harmonisé avec des exigences d'écoconception pour un ensemble de produit oblige leurs producteurs et metteurs sur le marché à opérer des choix relativement aux normes de circularité et de durabilité applicables. Si la Directive sur l'écoconception de 2009 se concentrait sur l'efficacité matérielle et énergétique de quelques produits, le règlement de 2024 vient élargir le champ d'application des produits visés. Bâti autour de trois mesures clés - durabilité, réparabilité, « réutilisabilité » - la législation sur l'écoconception peut être représentée sous la forme d'un tableau d'ensemble (Bundgaard et al., 2024) traitant de : la réduction, la durabilité (fiabilité, possibilité de mise à niveau); la réutilisation, réparation et reconditionnement (désassemblage, pièces en séries, pièces détachées, réparation et information d'entretien, suppression des données); le recyclage (démontage, plastique, substances préoccupantes).

On trouve ainsi dans l'écoconception une double articulation entre circularité et efficacité matérielle - « *material efficiency* » (Allwood, J. M., Ashby, M. F., Gutowski, T. G., & Worrell, E., 2011) - et circularité et durabilité environnementale des produits, deux dimensions qui peuvent être rattachées à la notion ancienne d'éco-efficience ou « *eco-efficiency* » en anglais (Papanek, 1972). C'est néanmoins la notion d'écoconception qui est aujourd'hui retenue, le recyclage en constituant le complément nécessaire (voir infra, chapitre 3).

Finalement, deux processus de transition sont observés dans l'écoconception, l'un sur l'efficacité énergétique, l'autre sur la circularité avec l'harmonisation de prescriptions minimales (Entsaló et al., 2023). La réglementation - élaborée selon une méthode participative (États membres, parties prenantes, consultations en ligne du public) - a accéléré la déstabilisation du modèle économique linéaire au profit de celui de la circularité. L'approche par produit (pas à pas) stimule et accélère les changements, notamment lorsqu'une mesure est adoptée, rendue plus stricte puis étendue à d'autres produits. La réussite du cadre juridique relatif à l'écoconception réside dans sa cohérence à introduire des normes harmonisées entre les États membres et à faire du marché européen un levier, notamment :

- par l'évitement de règles anti-concurrentielles intra-européennes,
- la faible possibilité de déroger aux règles d'écoconception et l'existence d'obligations nationales strictes (Ecodesign and Energy Labelling...),
- l'obligation de tous les fabricants de respecter les normes européennes pour pénétrer le marché, conduisant d'autres pays à un alignement de leurs propres normes sur les normes européennes (Entsaló et al., 2023).

La conception est ainsi un vecteur essentiel de l'économie circulaire et de la sobriété plus généralement, en ce qu'elle requiert des produits durables, entretenus, mis à niveau ou améliorés, réutilisés, réparés, reconditionnés et finalement recyclés (Bundgaard et al., 2024) ; (Halkos & Aslanidis, 2024).

ZOOM. Présentation du Règlement européen écoconception et méthode de mise en œuvre.

Règlement (UE) 2024/1781 du 13 juin 2024 sur l'écoconception (ESPR)

Double objectif : Améliorer la circularité afin de réutiliser les matériaux et l'écoconception pour une meilleure performance énergétique et une durabilité environnementale des produits (caractéristiques produit et processus mis en œuvre dans la chaîne de valeur).

Champ d'application large : Concerne initialement uniquement les produits liés à l'énergie (éclairage, chauffage, électroménager, etc.) avec la directive 2009/125/CE et désormais, avec le règlement, quasiment tout bien physique mis sur le marché européen.

Exigences d'écoconception qui seront précisées dans des actes délégués (textes d'application) :

- Le règlement écoconception constitue le cadre juridique pour établir de nouveaux critères de durabilité, réutilisation, l'amélioration et la réparabilité des produits.
- Contrôle des substances qui entravent la circularité (ex qui empêche le recyclage).
- Optimisation de l'efficacité énergétique et de l'efficacité des ressources sur l'ensemble du cycle de vie.
- Seuil minimum de contenu recyclé.
- Refabrication et recyclage possible par les procédés de fabrication ; Interdiction de destruction des invendus (à l'image de la loi AGECE en France qui interdit la destruction des invendus textiles).

Le Passeport Numérique du Produit (PNP) : un outil d'identification pour les terres rares ?

Véritable « carte d'identité » numérique, le Passeport Numérique du Produit (PNP) ou *Digital Product Passport* (DPP) contient des informations relatives aux composants et matériaux, donc *a priori* sur la présence de terres rares. Il vise à rendre accessibles, sous forme numérique, les informations essentielles sur l'empreinte carbone, la composition chimique, la provenance des métaux, la réparabilité et le contenu recyclé d'un produit. Cette traçabilité est normalisée par les normes ISO 14040 et 14044 et s'est diffusée, mais demeure actuellement sous-utilisée dans les politiques publiques et les réglementations existantes, ne serait-ce parce qu'elle n'a pas encore de statut juridique pleinement opératoire - elle demeure dans la plupart des cas volontaires, pour remplir des obligations qui sont obligatoires. La « **déclaration de performance environnementale** » (DPE) par exemple, oblige à présenter les impacts environnementaux d'un produit tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières jusqu'au recyclage éventuel. **La DPE, obligatoire seulement pour certains secteurs et entreprises, est presque systématiquement exigée par les acheteurs industriels.** Le passeport numérique, une fois mis en place, permettra lui aussi d'informer les parties prenantes et les consommateurs quant à l'origine et aux conditions de fabrication des produits, de manière généralisée (Adisorn et al., 2021; Jansen et al., 2023). Certains produits, comme les batteries et les produits électroniques, devraient être soumis obligatoirement à ce passeport dès 2027, ainsi que les produits qui contiennent des matières premières critiques à partir de 2028. Le PNP est essentiel au règlement écoconception en ce qu'il doit permettre la traçabilité du produit tout au long de la chaîne de valeur (information sur la composition matérielle, substance préoccupante, précautions d'usage, information sur le recyclage de façon à faciliter la gestion du produit en fin de vie.

Calendrier : Règlement entré en vigueur le 18 juillet 2024. Octobre 2024, mise en place d'un Forum de l'écoconception composé d'un groupe d'experts. Adoption d'un Plan de travail sur l'écoconception pour les produits durables et l'étiquetage énergétique 2025-2030 (COM(2025) 187 final, 16 avril 2025).

Ce plan prévoit l'adoption de mesures d'écoconception horizontales d'ici 2027 à 2029 pour augmenter la réparabilité, le contenu recyclé et la recyclabilité des produits électriques et électroniques.

Le processus de mise en œuvre de l'écoconception dans l'UE commence par l'analyse d'un certain nombre de groupes de produits jugés pertinents pour l'élaboration de réglementations en matière d'écoconception, et par la publication d'une liste des produits les plus pertinents dans le « plan de travail sur l'écoconception » (étape 0). En général, les groupes de produits sont classés par ordre de priorité en fonction des économies d'énergie potentielles qui seront réalisées si les réglementations en matière d'écoconception sont mises en œuvre (Peiro et al., 2020).

L'élaboration d'une réglementation européenne en matière d'écoconception pour un groupe de produits peut ensuite être conceptualisée en six étapes :

- Étape 0 : Plan de travail sur l'écoconception. Identification des produits pertinents en matière d'écoconception, étude préparatoire
- Étape 1 : Travail préparatoire. Étapes techniques, procédurales et juridiques
- Étape 2 : Évaluation de l'impact politique et économique. Variantes selon analyse d'impact coûts/avantages
- Étape 3 : Projet de texte. Discussion au sein de la Commission européenne et adoption du projet
- Étape 4 : Soumission aux États membres. Vote des États-membres
- Étape 5 : Adoption. Processus législatif UE

La publication d'un règlement sur l'écoconception pour un certain groupe de produits peut être suivie de mandats confiés aux organismes européens de normalisation (OEN) afin qu'ils élaborent des méthodes normalisées pour l'évaluation des paramètres réglementés. Toutes les étapes du processus de mise en œuvre de l'écoconception dans l'UE ne sont pas ouvertes aux parties prenantes. En effet, les parties prenantes contribuent généralement à l'étude préparatoire du produit (étape 1) et à l'évaluation de l'impact de la politique (étape 2). Parmi les différentes parties prenantes, il est important de distinguer les experts des États membres de l'UE qui font partie du comité de réglementation et ont donc le dernier mot sur l'approbation des règlements (étape 4).

2.2.2.2.2 La réduction par le biais de l'amélioration de la durabilité des produits permise par l'allongement de leur durée de vie

La directive (UE) 2024/1799 du 13 juin 2024, établissant des règles communes visant à promouvoir la réparation des biens, introduit un droit à la réparabilité comme outil complémentaire de la circularité, notamment par l'extension d'un an de la garantie légale pour les biens réparés, participe également de ce tableau. Cette directive traduit un décloisonnement majeur des sujets traités par la Commission européenne, une volonté de se rapprocher des préoccupations quotidiennes des consommateurs européens et de faire de ceux-ci des contributeurs de la transition écologique et notamment du Pacte vert (Libaert, 2024). S'ajoute à cette volonté de faire des consommateurs des acteurs de la durabilité, la proposition de directive COM(2023) 166 du 22 mars 2023 sur les allégations écologiques qui vise à lutter contre les pratiques d'éco-blanchiment des entreprises (Lhuillier, 2024). De telles allégations doivent alors « préciser, étayer, démontrer » les informations relatives aux produits (Marion et Dronnier, 2023) (Carreño, 2023). S'ajoute à cette volonté de faire du consommateur un acteur de la durabilité, la directive (UE) 2024/825 du 28 février 2024 pour donner aux consommateurs les moyens d'agir en faveur de la transition verte grâce à une meilleure protection contre les pratiques déloyales et grâce à une meilleure information.

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

Deux lois en droit français ont principalement contribué à créer une synergie entre circularité et consommation durable (Pascal, 2024) :

D'abord, la Loi dite AGECE n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire introduisant ;

- information des consommateurs sur les qualités et caractéristiques environnementales des produits générateurs de déchets et allégations environnementales (art. 13-1)
- indice de réparabilité (art. 16)
- information des consommateurs sur le tri des déchets (art. 17)
- dispositions de lutte contre le gaspillage alimentaire (art. 33 à 35)
- dispositions relatives à la publicité (art. 46,47 et 50)
- interdiction de la vaisselle et certains produits en plastique à usage unique (art. 77)
- garantie légale de conformité visant à faciliter la réparation (art. 20 à 22)
- délit d'obsolescence programmée (art. 25)
- condition d'utilisation du terme "reconditionné" (art. 37)
- obligation d'élaborer un plan de prévention et d'écoconception (art. 72) pour les producteurs soumis à une filière de responsabilité élargie des producteurs, ayant pour objectif de réduire l'usage de ressources non renouvelables, d'accroître l'utilisation de matières recyclées et d'accroître la recyclabilité de ses produits dans les installations de traitement situées sur le territoire national.

Ensuite, la Loi dite « Climat et résilience » n°2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets avec ;

- dispositions relatives à la publicité (art. 7 et 12)
- interdictions et obligations relatives aux allégations de neutralité carbone (art. 12)
- dispositions relatives aux pièces détachées et aux pièces de rechange issues de l'économie circulaire (art. 30)
- reconnaissance du greenwashing comme pratique commerciale trompeuse visant expressément les allégations portant sur l'impact environnemental du produit ou la "portée des engagements de l'annonceur en matière environnementale" (art. 10 et 11)

Le droit européen est venu compléter ces textes à travers ;

- le Règlement (UE) 2023/1670 du 16 juin 2023 établissant des exigences en matière d'écoconception applicables aux smartphones, aux téléphones portables autres que des smartphones, aux téléphones sans fil et aux tablettes conformément à la directive 2009/125/CE et modifiant le règlement (UE) 2023/826.
- Le Règlement (UE) 2023/826 du 17 avril 2023 établissant les exigences d'écoconception relatives à la consommation d'énergie en mode arrêt, en mode veille et en veille avec maintien de la connexion au réseau des équipements ménagers et de bureau électriques et électroniques conformément à la directive 2009/125/CE.
- La directive (UE) 2024/825 du 28 février 2024 pour donner aux consommateurs les moyens d'agir pour la transition verte.
- Le règlement (UE) 2024/1781 du 13 juin 2024 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception pour des produits durables (règlement écoconception).
- La directive (UE) 2024/1799 du 13 juin 2024 sur les règles communes visant à promouvoir la réparation des biens.
- La proposition de directive COM(2023) 166 du 22 mars 2023 sur les allégations écologiques.

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

- Le règlement (UE) 2025/40 du 22 janvier 2025 sur les emballages et déchets d'emballages (révision des textes précédents).

Pour la catégorie des équipements électriques et électroniques (EEE), il existe des dispositifs de **lutte contre l'obsolescence programmée** c'est-à-dire de la pratique qui vise à réduire la durée de vie d'un produit pour augmenter son taux de remplacement. Perçu positivement à la sortie de la crise de 1929 pour relancer l'économie (« New deal »), le taux de remplacement prématuré des produits encouragé par la société de consommation est désormais problématique depuis les années 1970 avec la multiplication et l'accumulation des déchets générés par la consommation. Depuis 2015, le droit français interdit l'obsolescence programmée au titre des pratiques commerciales trompeuses lorsque celle-ci est délibérée (article L441-2 du code de la consommation): « Est interdite la pratique de l'obsolescence programmée qui se définit par le recours à des techniques, y compris logicielles, par lesquelles le responsable de la mise sur le marché d'un produit vise à en réduire délibérément la durée de vie ». La mention des logiciels renvoie également à la question de la « sobriété numérique » (Flipo, 2021) et à celle de l'information des consommateurs. En effet, le vendeur a depuis le 1er janvier 2022 l'obligation spécifique de veiller à ce que le consommateur soit informé de la période pendant laquelle il peut légitimement s'attendre à recevoir les mises à jour nécessaires au maintien de la conformité de son bien (Art. L217-3, 2°, L217-19 c. consommation), ce qui permet de lutter contre le renouvellement prématuré de terminaux du seul fait de logiciels devenus obsolètes.

En parallèle, l'**analyse du cycle de vie** (ACV), présente dans la directive déchets de 2008 (2008/98/CE), offre une approche holistique qui pourrait permettre de mieux quantifier les impacts environnementaux globaux (extraction, production, usage, fin de vie) des produits à base d'ETR. Pour répondre à ces enjeux, la Commission européenne recommande depuis 2021 de mettre en place une méthode harmonisée pour évaluer la performance environnementale des produits tout au long de leur cycle de vie, par exemple via la DPE. Or, le Critical Raw Materials Act n'intègre pas encore systématiquement les DPE ou données d'ACV dans ses mécanismes de suivi et d'évaluation. Ainsi, les produits intégrant des ETR sont rarement couverts par des DPE (les données sont complexes à réunir, car souvent confidentielles ou indisponibles).

2.2.2.2.3 La généralisation de l'information sur la durabilité : la transparence au service de la réduction

Dans l'objectif d'une Europe efficace dans l'utilisation des ressources (*Roadmap to a Resource Efficient Europe*, COM(2011)576, 20 septembre 2011), la mise en place d'un marché unique de produits verts (COM(2013)0196, 9 avril 2013) et d'une économie circulaire, l'UE poursuit l'amélioration de l'information relative à la performance environnementale des produits et des organisations. Certains auteurs ont pu relever une fragmentation initiale du cadre juridique dessiné par le couple RE/CE aux objectifs parfois divergents (Domenech & Bahn-Walkowiak, 2019). Néanmoins l'adoption d'une approche plus systémique et intégrée de l'économie circulaire dans l'ensemble des politiques tend à unifier et généraliser l'information sur la durabilité.

La prévention des déchets et la préservation des matières premières critiques prend ainsi forme à travers l'émergence d'indices non plus seulement de réparabilité mais également de durabilité. Ces indices de durabilité ont pour objet de résoudre l'asymétrie d'information entre le consommateur et le vendeur sur la qualité du bien et sa longévité (avec notamment des critères de fiabilité et de robustesse) mais aussi d'instaurer une concurrence entre les fabricants autour de cet affichage afin de les inciter à mieux concevoir leurs produits pour les rendre plus durables. Par exemple, le 8 avril 2025, l'indice de réparabilité des lave-linges a été remplacé par un indice de durabilité. Il s'agit de la deuxième catégorie de produits, après les téléviseurs en janvier 2025, à être visée par ce nouvel étiquetage qui synthétise la réparabilité, la fiabilité et la robustesse des équipements électriques et électroniques (EEE). Ce nouvel

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

l'indice est composé de deux grandes catégories de critères de poids égal : la réparabilité qui mesure notamment la possibilité de démonter l'objet, la disponibilité et le prix des pièces détachées (ces indicateurs reprennent ceux de l'indice de réparabilité) ; et la fiabilité qui rend compte de la résistance à l'usure et la facilité d'entretien. L'intérêt de l'évolution de cet indice est qu'il intègre, à travers la possibilité de démonter, l'idée d'une plus grande facilité à recycler les pièces d'un déchet électrique et électronique. Pour l'Académie des sciences commerciales, une pièce détachée est définie comme une « pièce destinée à être intégrée à un ensemble en remplacement d'une pièce identique usée ou cassée et qui est vendue séparément. Quand elle est stockée par l'utilisateur, la pièce détachée s'appelle 'pièce de rechange' ».¹⁵ Les composants comprenant des éléments de terres rares peuvent être qualifiés ainsi et être visés comme un critère de « démontabilité » de pièces détachées.

La durabilité s'entend donc ici selon le **principe d'utilisation durable** introduit en droit français par la loi n°2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité. Selon le code de consommation, l'utilisation durable désigne « la capacité d'un bien à maintenir les fonctions et performances requises dans le cadre d'un usage normal » (art. liminaire, 12° du code de la consommation). On trouve également ce principe de durabilité à l'article L217-5, 6° du code de la consommation dans les dispositions relatives à la garantie légale de conformité pour les biens :

« I.-En plus des critères de conformité au contrat, le bien est conforme s'il répond aux critères suivants : (...) 6° Il correspond à la quantité, à la qualité et aux autres caractéristiques, y compris en termes de durabilité, de fonctionnalité, de compatibilité et de sécurité, que le consommateur peut légitimement attendre pour des biens de même type, eu égard à la nature du bien ainsi qu'aux déclarations publiques faites par le vendeur, par toute personne en amont dans la chaîne de transactions, ou par une personne agissant pour leur compte, y compris dans la publicité ou sur l'étiquetage. »

Au-delà de la garantie légale de conformité, on trouve également dans le code de la consommation la possibilité offerte au vendeur de proposer au consommateur une « garantie commerciale de durabilité » à l'article L217-23 selon laquelle :

« Le producteur peut consentir au consommateur une garantie commerciale l'engageant pendant une période donnée, supérieure à deux ans (ci-après dénommée « garantie commerciale de durabilité »). S'il propose une telle garantie commerciale de durabilité, le producteur est directement tenu à l'égard du consommateur de réparer ou de remplacer le bien, pendant la période indiquée dans l'offre de garantie commerciale de durabilité ; il est également tenu de la mettre en œuvre dans des conditions identiques à la garantie légale. »

Facultative, la garantie commerciale de durabilité pourrait ainsi être systématiquement proposée ou rendue obligatoire lorsque le produit contient des terres rares.

Déjà envisagée par la loi AGECE n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et pour une économie circulaire, la proposition de directive sur les allégations écologiques (COM(2023) 166 du 22 mars 2023 prévoit l'interdiction d'allégation environnementale qui ne respecte pas des critères minimaux (art. 3). Le professionnel devra justifier et étayer l'allégation environnementale (brochure, publicité, page internet, forme visuelle ou sonore, groupe de mots, dénomination, etc.) par une évaluation ; par exemple, l'allégation portant sur les matériaux et ressources utilisés lors de la production - notamment la part de contenu en matière biosourcée ou recyclée - à travers l'étude de l'empreinte environnementale du produit. Son calcul se base sur la recommandation (UE) 2021/2279 de la Commission du 15 décembre 2021, relative à l'utilisation de méthodes d'empreinte environnementale pour mesurer et indiquer la performance environnementale des produits sur l'ensemble du cycle de vie.

¹⁵ Voir le site internet de l'Académie : https://www.sciences-commerciales.com/index.php/Pi%C3%A8ce_d%C3%A9tach%C3%A9e.

La faible **teneur de matières premières critiques dont les terres rares peut ainsi être indiquée par le professionnel dans l'allégation environnementale** inscrite dans sa « pratique commerciale », c'est-à-dire « toute action, omission, conduite, démarche ou communication commerciale, y compris la publicité et le marketing, de la part d'un professionnel, en relation directe avec la promotion, la vente ou la fourniture d'un produit aux consommateurs » (article 2 de la directive 2005/29/CE du 11 mai 2005 sur les pratiques commerciales déloyales). En France, un Guide pratique des allégations environnementales a été publié pour la première fois en 2010 et mis à jour en 2023 par le Conseil national de la consommation¹⁶.

En parallèle, dans sa recommandation (UE) 2021/2279 du 15 décembre 2021 relative à l'utilisation de méthodes d'empreinte environnementale pour mesurer et indiquer la performance environnementale des produits (PEF) sur l'ensemble du cycle de vie, la Commission européenne donne ainsi des instructions détaillées sur la manière de modéliser et de calculer les impacts environnementaux des produits, celles-ci s'appuyant sur des pratiques, des indicateurs et des règles existants et internationalement admis (notamment la norme ISO 14044, le manuel ILCD *International Reference Life Cycle Data System*, l'empreinte écologique ou *Ecological Footprint Standard* ou encore le protocole sur les gaz à effet de serre ou Greenhouse Gaz Protocole), afin que les États adoptent une méthode harmonisée d'analyse du cycle de vie du produit.

Selon la distinction opérée par l'OCDE, il existe six types d'analyse de flux de matière qui sont, chacun associé à un outil comptable. L'analyse du cycle de vie fait partie de ces analyses ; elle est réalisée à l'aide d'inventaires de cycles de vie. Elle a pour objet de mieux connaître et de comprendre la circulation des flux de matière dans un système particulier : celui du cycle de vie d'un produit¹⁷. « Méthode d'évaluation environnementale, (elle) permet de quantifier les impacts d'un produit (qu'il s'agisse d'un bien, d'un service, voire d'un procédé) sur l'ensemble de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à l'élimination en fin de vie, en passant par les phases de distribution et d'utilisation »¹⁸. L'analyse du Cycle de vie est un outil normalisé. En effet, selon la norme ISO 14040, la méthodologie de l'ACV est composée de 4 étapes : la définition des objectifs, l'inventaire du cycle de vie, l'évaluation des impacts sur l'environnement, la recherche d'amélioration. Ces étapes sont décrites dans la norme ISO 14044.

Comme mentionné ci-dessus, le Règlement européen de 2024 sur les matières premières critiques n'intègre pas encore systématiquement les DPE ou données d'ACV dans ses mécanismes de suivi et d'évaluation. Il apparaît que les produits utilisant des ETR sont rarement couverts par des DPE, notamment du fait de la complexité à réunir les données nécessaires, souvent confidentielles ou indisponibles.

2.2.3 Les critiques du droit applicable à l'utilisation des terres rares et les propositions visant à en renforcer l'effectivité et la cohérence

La littérature académique est critique quant à la capacité du Règlement européen sur les matières premières critiques à intégrer de manière effective les principes relatifs à l'économie circulaire. Certains

¹⁶ Ce guide est disponible au lien suivant :

https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cnc/avis/2023/Allegations_environnementales/guide_2023.pdf?v=1685082633&trk=public_post_comment-text

¹⁷ Commissariat général au développement durable, « Matières mobilisées par l'économie française. Comptes de flux pour une gestion durable des ressources », *Études et document*, n° 6, juin 2009, p. 12.

¹⁸ Définition de l'Ademe, www.ademe.fr.

auteurs considèrent que « même si le règlement matériaux critiques atteint ses objectifs de référence, l'UE continuera à dépendre de sources extérieures pour la majorité de son utilisation de matières premières critiques, à moins qu'elle n'adopte des politiques strictes et globales visant à réduire l'utilisation de l'énergie et la consommation de ressources au sein de la société » (Tröster et al., 2024). Les faiblesses intrinsèques du Règlement identifiées par la littérature sont par ailleurs à la fois géopolitiques, écologiques, et démocratiques (2.3.3.1). Dans le même temps, certains auteurs proposent des voies par lesquelles ces faiblesses pourraient être palliées, notamment par le biais d'une démocratisation de la chaîne de valeur prenant en compte les dimensions écologiques, grâce, entre autres, au « passeport numérique » qui doit accompagner les produits conformément au Règlement européen de 2024 relatif à l'écoconception mais qui n'est pas encore mis en place en pratique (2.3.3.2).

2.2.3.1 La dénonciation des faiblesses géopolitiques, écologiques et démocratiques du Règlement sur les matières premières critiques

2.2.3.1.1 Une faiblesse géopolitique

Concernant la diplomatie minérale, plusieurs accords dédiés « métaux critiques » ont été signés en 2023 et 2024 entre l'Union européenne et l'Australie, le Brésil, le Canada (Québec et Saskatchewan), la RDC, le Japon, le Kazakhstan, la Mongolie, la Serbie. D'autres sont en négociation avec le Chili et l'Arabie Saoudite. L'examen de cette politique en Afrique permet de comprendre les difficultés de la diversification de l'approvisionnement européen par la diplomatie minérale prévue par le Règlement européen (Ngom, 2022). La prise de conscience d'une trop grande dépendance vis-à-vis des exportations chinoises et des limites des alternatives à l'utilisation des terres rares ou du recyclage de ces métaux a également amené l'UE à chercher de nouvelles sources d'approvisionnement en Afrique. La Chine a en effet depuis longtemps recours à des « paquets d'aide » (construction d'infrastructures contre ressources naturelles), accords permettant, en échange du financement de la construction de projets prestigieux d'infrastructures, une prise de participation dans un projet minier à travers l'acquisition de parts dans une entreprise nationale ou de licences. À titre d'exemple, l'Angola a fait des terres rares une priorité de son développement minier afin de satisfaire les besoins chinois, de même que la Tanzanie avec sa mine de Fungoni. Un autre exemple est celui du contrat dit « du siècle » en RDC qui montre comment les contrats extractifs dits « Ressources contre investissements » sont utilisés par la Chine pour sécuriser les approvisionnements en terres rares. L'exemple chinois alimente les craintes que l'exploitation mal régulée des terres rares et l'utilisation de technologies obsolètes continuent de causer de graves dommages à l'environnement et aux populations. Des chercheurs africains rappellent ainsi la nécessité de respecter le droit international dans cette course aux terres rares (Ngom, 2022). Les industriels peuvent en effet utiliser à la fois le dumping économique avec des coûts de production réduits, le dumping écologique puisque les dommages environnementaux causés ne sont pas intégrés dans les coûts de production, et le dumping social puisqu'ils peuvent disposer d'une main-d'œuvre bon marché et peu en mesure de critiquer leurs conditions de travail. Les enjeux géo-économiques, les défis géopolitiques et les dangers écologiques des terres rares nécessitent donc une conscience écologique globale et un encadrement juridique international qui sont toujours en gestation face à l'urgence climatique mondiale, malgré l'évolution du droit de l'environnement.

La critique, par ailleurs, du projet de « Club des matières premières critiques » fondé sur l'exemple chinois est principalement géopolitique (Balavoine, 2024). D'une part sa faisabilité même est dénoncée comme étant incertaine. Le projet aligne en effet la politique européenne à la politique américaine et à sa volonté de créer un contrepoids au « risque de monopole chinois », alors même que les États-Unis s'orientent vers une politique de protectionnisme industriel et que l'UE, face à ce protectionnisme, envisage un

rééquilibrage des relations avec la Chine. D'autre part, une pratique visant à conclure de nouveaux accords entre l'Union européenne et les pays producteurs de terres rares émerge. Dans la plupart des accords de libre-échange conclus aujourd'hui entre l'Union européenne et les pays tiers, la question de l'exploitation des minerais occupe un rôle central. Ainsi, son nouveau plan d'action sur les matières premières critiques de la Commission vise à négocier des partenariats avec des pays tiers qui disposent de ressources abondantes en utilisant tous les instruments de politique extérieure en application d'une initiative appelée « Global Gateway » par laquelle la commission cherche à maintenir l'accès aux matières premières — avec la RDC, le Rwanda ou tout autre pays (Vogel, 2022) (Radley, 2024). Cette nouvelle politique d'accords européens relatifs aux terres rares qui a émergé en Afrique a abouti récemment à la signature du protocole d'accord entre l'UE et le Rwanda afin de « renforcer leur partenariat en vue d'une intégration plus étroite des chaînes de valeurs pour les matières premières »¹⁹. L'accord prévoit des investissements européens notamment pour raffiner des matières premières au Rwanda, alors que le Rwanda n'a quasiment pas de terres rares et les importe illégalement de République Démocratique du Congo (RDC) en soutenant les groupes armés, cause objectivée par les Nations Unies d'une guerre particulièrement meurtrière (Lhuillier, 2016). La contradiction est totale entre l'accord portant sur les terres rares entre l'UE et le Rwanda et les autres politiques européennes qui visent à lutter contre les minerais de guerre, et une controverse importante est présente dans la littérature grise, plus réactive²⁰. La bataille de Goma de mars 2025 - une campagne militaire lancée par le groupe rebelle congolais du Mouvement du 23 mars (M23) soutenus par le Rwanda contre la capitale régionale de Goma - a relancé les critiques contre cet accord européen et montre que de tels accords sont actuellement pilotés par la Commission européenne sans être harmonisés avec la diplomatie européenne ou les autres réglementations et ne contribuent pas à la régulation durable des chaînes de valeur des minerais (Vogel, 2022) (Radley, 2024). L'opposition sécurité versus durabilité est particulièrement conflictuelle en Afrique.

2.2.3.1.2 Une faiblesse écologique : le règlement sur les matières premières critiques met l'accent sur l'amélioration de l'offre et non sur la réduction de la demande.

Le Règlement est en effet adopté sur le fondement de l'article 114 du Traité sur le fonctionnement de l'Union européenne (TFUE), relatif à l'établissement et au fonctionnement du marché intérieur, dans une logique principalement économique - bien que l'article fasse également référence à la nécessité de protection de l'environnement (Ehrmann & Vesa, 2026). En l'absence de politiques plus strictes visant à réduire l'utilisation de la consommation des terres rares, l'Union européenne continuera à dépendre de sources extérieures pour ses industries essentielles. Or, la littérature scientifique considère qu'il est essentiel que les stratégies aillent au-delà de la simple augmentation de l'offre primaire ou de l'exploitation de nouvelles mines, et qu'elle s'oriente vers une meilleure gestion des ressources minérales secondaires déjà contenues dans toute une série de produits (Cavoski et al., 2023). L'analyse d'impact réalisée par la Commission européenne dans le cadre de l'adoption du Règlement européen sur les matières premières critiques notait, dans ce contexte, que « *If left unaddressed, the environmental footprint of CRM extraction and processing may cancel out, to an extent, the environmental benefits of their use in green technologies and could mean that decarbonisation comes at the cost of an increase of other detrimental impact* »²¹.

¹⁹ Eurac. Réseau Europe Afrique Centrale. Note à l'attention de la direction générale des partenariats internationaux (INTPA) de la Commission européenne, mai 2024.

²⁰ *Ibid.*

²¹ Commission Staff Working Document, Impact Assessment Report Accompanying the Document Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council Establishing a Framework for Ensuring a Secure and Sustainable Supply of Critical Raw Materials and Amending Regulations (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, 2018/1724 and (EU) 2019/1020, SWD(2023) 161 final.

Apparaît ainsi l'idée de l'inévitabilité de choix politiques nécessaires quant à l'utilisation des terres rares qui pourrait être limitée à des usages essentiels (Walter Leal Filho et al., 2023). Premièrement, « des initiatives législatives visant à réduire la quantité de terres rares contenues dans les produits à usage unique devraient être adoptées ». Deuxièmement, « améliorer les processus de récupération et la réutilisation des produits contenant des terres rares ». Troisièmement, « les programmes de financement de la recherche peuvent être utilisés pour trouver des alternatives et des substituts appropriés aux terres rares » (Walter Leal Filho et al., 2023). Un décalage apparaît ainsi entre les politiques et les chercheurs qui analysent la manière dont la sécurisation de l'approvisionnement en terres rares pourrait aussi être favorisée par une limitation des usages industriels. De fait, la question n'est pas seulement de savoir si une substitution des terres rares est possible pour continuer à fabriquer des objets en contenant, mais de décider collectivement si ces objets doivent nécessairement présenter les mêmes fonctionnalités, les terres rares devant être réservées à d'autres usages plus essentiels à nos sociétés. Les scientifiques ont en effet rapidement souligné les limites de la substituabilité pour alerter sur la disponibilité des ressources nécessaires aux usages actuels (Graedel et al., 2015). La notion de hiérarchisation des usages - et de sa réglementation - entre ainsi désormais dans le débat scientifique, en décalage avec son absence des discours politiques. Comme le résumait E. Hache et E. Normand, « il paraît étonnant que l'UE ne privilégie pas dans son approche première une logique de réduction de la demande et de sobriété des matériaux. La sobriété est le pendant nécessaire de l'euphorie et de la diversification des filières d'approvisionnement en matières premières critiques : elle est partie intégrante de la solution et prendra de multiples formes. L'UE pourrait montrer la voie en ouvrant la réflexion à grande échelle sur la nécessité de réduire la taille, le poids des véhicules et la puissance des batteries et en incitant à la mutualisation des équipements et de leur utilisation au moyen du report modal, du covoiturage ou encore du développement de l'auto-partage. Les mesures de sobriété devront dans tous les cas être multidimensionnelles pour espérer réduire suffisamment la demande » (Hache & Normand, 2024).

2.2.3.1.3 Une faiblesse démocratique : le droit relatif aux terres rares n'a pas suffisamment permis d'organiser la gouvernance des chaînes de valeur globale, c'est-à-dire leur institutionnalisation politique.

Tout d'abord, sur le plan démocratique, la limitation potentielle de la consultation du public — ou du débat politique — pour des projets stratégiques prioritaires pourrait aller à l'encontre de l'impératif « d'acceptation sociale » et de **démocratie environnementale**. Le Règlement sur les matériaux critiques introduit en effet une limitation du droit de consultation du public prévu par le droit de l'environnement, pour favoriser un approvisionnement local des industries, ce qui peut également s'avérer problématique en termes de compatibilité avec d'autres textes européens comme les directives Oiseaux (1979) et Habitats (1992) (Ehrmann & Vesa, 2026). La situation de la mine de terres rares Per Geijer de LKAB près de Kiruna, dans le nord de la Suède, témoigne de la difficile conciliation entre la priorité — et donc l'urgence - accordée à un projet extractif et la garantie des droits environnementaux et humains également prônée par le droit européen. Le processus de mise en œuvre du projet « stratégique » d'extraction est susceptible d'être considérablement ralenti, si ce n'est entièrement entravé, notamment parce qu'il chevauche des zones traditionnelles d'élevage de rennes du peuple sami. Comme l'affirme E. Kiorri, « Kiruna se trouve désormais au cœur d'un test à fort enjeu de ce que les chercheurs appellent le « paradoxe du Green Deal » de l'UE : l'ambition industrielle axée sur le climat exige une action immédiate, mais se heurte à des protections juridiques solides pour les terres, la biodiversité et la culture autochtone »²².

²² E. Kiorri, « La plus grande mine de terres rares d'Europe : comment le financement de l'UE se heurte au droit de l'environnement », *Euro News*, 22 janvier 2026.

Ensuite, la dimension politique des chaînes de valeur est oubliée. Les plus récentes méta recherche sur les chaînes d'approvisionnement mondiales montrent que la recherche va au-delà de la détermination des principales questions de durabilité sociale du point de vue de l'entreprise. Elles s'interrogent sur la manière dont leurs actions peuvent être transformées ou reconfigurées pour améliorer les conditions sociales et bénéficier à la société dans son ensemble, soit sur l'effectivité des politiques de régulation des chaînes de valeur. Pour étudier les chaînes d'approvisionnement mondiales, il est par exemple nécessaire d'adopter une perspective plus diversifiée et de ne plus se concentrer uniquement sur les acheteurs des « pays développés », mais de reconnaître également le rôle des fournisseurs des « pays en développement/émergents », qui ont des perspectives et des cultures différentes. Quatre nouvelles frontières de recherche nécessaire pour développer des études sur la durabilité sociale dans les chaînes de valeur (supply chain sustainability - SCS) sont identifiées : (1) Un changement de paradigme dans la théorie et la pratique est nécessaire pour que les membres de la chaîne d'approvisionnement intègrent la durabilité sociale ; (2) Les pratiques culturelles devraient jouer un rôle important dans la durabilité sociale, car il est nécessaire de tenir compte des différences contextuelles ; (3) L'inclusivité peut émerger grâce à des pratiques transformatrices en matière de diversité, d'équité et d'inclusion pour la durabilité sociale ; et (4) Une perspective de recherche décolonisée est essentielle pour accroître nos connaissances sur la durabilité sociale dans les chaînes d'approvisionnement mondiales. Des études récentes ont appelé à des études de durabilité sociale qui examinent les influences des éléments culturels sur les SCS (Fritz & Silva, 2018), telles que les traditions locales (par exemple, le lien indigène avec la nature et les valeurs ancestrales (León Bravo et al., 2022). Par exemple, le concept d'état d'esprit de durabilité est emprunté à la recherche en psychologie qui a développé un outil éducatif ciblant la capacité des étudiants et des professionnels à identifier, comprendre et relever les défis de la durabilité (Rimanoczy, 2020).

2.2.3.2 Des propositions de réforme de la « gouvernance des terres rares »

2.2.3.2.1 Les propositions de nouvelles conventions internationales

Certains auteurs préconisent la négociation d'un accord international relatif à la régulation des chaînes de valeur, en lien avec l'utilisation des terres rares (Ali et al., 2022). Ces auteurs proposent la création d'une instance par un accord international en formalisant par exemple un lien entre le Groupe international sur les ressources et le Forum intergouvernemental sur l'exploitation minière, les minéraux, les métaux et le développement durable, qui pourraient alors utiliser les mécanismes conventionnels existants pour une planification plus efficace des ressources. L'Assemblée des Nations Unies pour l'environnement pourrait avoir pour rôle de garantir que la dimension écologique soit incorporée dans une planification efficace. La proposition est silencieuse sur sa portée normative : est-ce qu'il s'agirait d'un texte de *soft law* ou d'un instrument de droit international impératif ? À moins qu'il ne s'agisse d'une proposition équivalente à l'Initiative sur la transparence dans les industries extractives, contraignante à la fois pour les États et les entreprises adhérents ? Matériellement, les auteurs proposent six actions (Ali et al., 2022) :

1. Parvenir à un consensus sur les objectifs internationaux en matière de production minérale mondiale (ainsi que de carbone, d'écoconception, d'économie circulaire, etc.).
2. Contrôler l'impact de la production et de la consommation de minéraux en établissant un système de suivi de l'utilisation des minéraux tout au long de la chaîne de valeur. Éventuellement sur la base de l'« empreinte digitale » mise au point par le service géologique allemand pour le tantale.
3. Améliorer la coordination de l'exploration minière, avec une coopération entre les secteurs public et privé afin de développer de nouvelles techniques d'exploration minérale, en s'inspirant

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

de programmes tels que « UNCOVER : Searching the Deep Earth » de l'Australie ou l'initiative Blue Mining de l'Union européenne pour les gisements de minéraux océaniques profonds.

4. Soutenir l'investissement et la recherche dans les nouvelles technologies d'extraction des minéraux. Les technologies permettant de maximiser l'efficacité, de minimiser les déchets et de réduire la consommation d'eau devraient être partagées plus efficacement par le biais d'accords de propriété intellectuelle à l'imitation des réformes proposées dans le secteur pharmaceutique.

5. Harmoniser les meilleures pratiques mondiales pour un développement responsable des ressources minérales (établissement de pratiques mondiales qui équilibrent l'exploitation minière et le traitement des minéraux avec la protection de la biodiversité, l'agriculture et l'urbanisation, et d'autres utilisations des terres et de l'eau).

6. Élaborer des cartes et des inventaires montrant la disponibilité des métaux recyclables. Ces cartes indiqueraient l'emplacement et l'état des stocks de métaux en cours d'utilisation, disponibles pour un usage futur.

Les auteurs évoquent aussi la création d'un système d'alerte comprenant une série d'alarmes : géologiques (avons-nous des réserves suffisantes ?) ; temporelles (nous savons que les réserves existent, mais peuvent-elles être exploitées à temps ?) ; liées à la gouvernance (nous savons où elles se trouvent, mais peuvent-elles être exploitées de manière durable ?) ; technologiques (utilisations nouvelles et imprévues pour des métaux auparavant indésirables (par exemple, le tellure, le germanium, l'indium) ; environnementales (les risques pour les écosystèmes et les populations locales sont-ils trop élevés ?) ; sociales (les populations locales résisteront-elles ou devraient-elles résister à l'exploitation minière ?) ; géopolitiques (la propriété des terres ou d'autres utilisations (agriculture, parcs, réserves, autres industries) empêcheront-elles l'exploitation minière ?) ; liées aux risques commerciaux (des changements dans les règles fiscales et d'investissement ou l'instabilité politique rendront-ils l'exploitation minière non rentable ?).

2.2.3.2.2 Améliorer une gouvernance internationale des terres rares fragmentée

Les auteurs spécialistes de la gouvernance des minerais estiment très peu probable la création d'une nouvelle institution telle une « International mineral and metal agency », assignant aux organisations internationales au mieux un rôle de diffusion des « best practices » (Christmann, 2021). La question de l'application du droit international à des objets transnationaux tels les chaînes de valeurs des grandes entreprises peu en effet être questionnée. En premier lieu, le droit international est très lacunaire : actuellement, seules l'exploration et l'exploitation des gisements de minéraux en eau profonde situés dans les zones internationales des océans sont réglementées au niveau international par la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM, voir infra Chapitre 4.1), avec une organisation internationale spécifique chargée de sa mise en œuvre et de la fourniture d'orientations scientifiques et techniques : l'Autorité internationale des fonds marins, basée à Kingston, en Jamaïque et créée en 1994. En second lieu, la méfiance envers un droit international extractif s'explique aisément, de nombreux travaux montrant que les États font souvent eux-mêmes obstacle à l'application du droit international en matière extractive (Lhuillier, 2016). En troisième lieu, le rôle de l'Union européenne dans la régulation des chaînes de valeur est vu comme bien plus efficace pour une régulation mondiale des chaînes de valeur.

2.2.3.2.3 D'autres voies de régulations que le droit international classique

D'autres voies de régulations que le droit international classique, interétatique, apparaissent comme déterminantes, les entreprises étant les principales actrices dans le domaine des terres rares.

- Premier exemple : l'adhésion de la France à l'**Initiative sur la transparence extractive (ITIE)**. L'un des instruments internationaux les plus influents dans le secteur extractif est l'ITIE, qui impose à ses adhérents - États et entreprises - la publication des contrats extractifs, donne pour mission à la société civile de surveiller les comptes — et donc la sous-traitance et la chaîne de valeur - et notamment les versements des paiements des entreprises aux États, et de vérifier la propriété réelle de ces entreprises, indispensable par exemple à la régulation des chaînes de valeur extractives. Or la volonté des États de participer au processus et de réguler les activités extractives est encore incertaine. En juin 2013, le Président de la République française François Hollande a annoncé lors du sommet du G8 de Lough Erne la candidature de la France à l'Initiative pour la transparence dans les industries extractives (ITIE). En juin 2016, le ministre de l'économie Emmanuel Macron avait annoncé que le gouvernement visait « une adhésion effective de la France à l'ITIE avant fin 2017 » et mis en place un groupe de travail présidé par une ingénieure générale des mines, associant société civile, entreprises et administration pour préparer l'adhésion de la France. Mais cette adhésion n'a pas encore eu lieu, faisant craindre à certains une « *corporate capture* » du politique et de l'administratif. La France n'a toujours pas formalisé son adhésion (Gilles, 2018). Il est possible que la potentielle adhésion de la France ait permis de structurer politiquement les acteurs du conflit relatif au projet d'exploitation de la mine de la montagne d'or en Guyane et d'éviter ainsi que celui-ci prenne de l'importance (Lhuillier, 2024).
- Deuxième exemple : la création d'un grand **marché commun européen et chinois** par l'harmonisation des droits de la chaîne de valeur. Le Règlement européen sur les matières premières critiques (CRMA) impose des obligations aux entreprises européennes tout au long de la chaîne de valeur - c'est-à-dire jusqu'en Chine où se situe à tout le moins les activités de raffinage des terres rares. Comment appliquer en Chine des législations européennes extraterritoriales telles que les obligations d'information extra-financières (Directive 2022/2464/UE du 14 décembre 2022 sur la publication d'informations en matière de durabilité par les entreprises (la CSRD, « Corporate sustainability reporting Directive »), qui font partie plus généralement du devoir de vigilance tout comme le droit relatif à l'économie circulaire, alors que les entreprises chinoises sont elles-mêmes assujetties à des règles nationales ? Le Pacte vert européen comme les règles chinoises de responsabilité sociale des entreprises ou de vigilance ont en effet vocation à réguler les chaînes de valeur dans leur ensemble. La question est donc celle de la « convergence » du droit européen et de ses obligations ou techniques (transparence, vigilance, plans, contractualisation, responsabilité, etc) avec le droit chinois. La « Corporate sustainability reporting Directive » a pour finalité de vérifier l'application des règles du Pacte vert. C'est un « tableau de bord » pour aider mais aussi contrôler les entreprises dans leur application du droit européen et international de l'environnement et des droits humains. Il faut donc la lire comme un ensemble cohérent, avec les 80 textes du pacte vert. Ensemble, ces règles constituent un nouveau droit du commerce international « vert » par lequel l'Union européenne souhaite se positionner comme un « régulateur du monde » (Bradford, 2020). La Commission européenne a confié sur ce point à l'European Financial Reporting Advisory Group (EFRAG) le soin d'élaborer des « European Sustainability Reporting Standards (ESRS) ».

Le droit chinois, quant à lui, prévoit depuis peu des règles qui reprennent les techniques juridiques européennes de reporting et de vigilance (Tian, 2024). Il s'agit du « Plan for the construction of social credit system » (2014); des « Measures for the Administration of Legal Disclosure of Enterprise Environmental Information » (2021); ou encore du « Human Rights Action Plan of China » (2021-2025).

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

La Chine a également adopté des « Guidelines to the State-Owned Enterprises Directly under the Central Government on Fulfilling Corporate Social Responsibilities » (2011), des « Guiding Opinions on Building a Modern Environmental Governance System » (2020), des « Guiding Opinions of the State Council on Accelerating the Establishment of a Sound Economic System with Green, Low-carbon and Circular Development » (2021) ou encore les « Format Guidelines for the Disclosure of Enterprise Environmental Information in accordance with the Law » (2022). Enfin, depuis 2024, au sein des régulations boursières des Beijing / Shenzhen / Shanghai stock exchange, la notion d'« interopérabilité », c'est-à-dire d'équivalence des normes (telles que l'EFFRAG et la Global Reporting Initiative (GRI)) pourrait être utilisée pour faciliter l'application du droit européen en Chine. L'enjeu pourrait être celui de la création d'un marché européen - chinois qui exclurait les entreprises par exemple américaines - qui par exemple ne respectent pas les règles d'écoconception ou de recyclage ou d'empreinte carbone consacrées en droit européen et en droit chinois (Lhuillier, 2022).

La création d'une préférence européenne dans les marchés publics, dite « Buy European and Sustainable Act » (BESA), pourrait participer de la régulation des ETR comme c'est le cas aux États-Unis et en Chine. Il s'agirait de réglementer la manière dont les autorités publiques des États membres de l'UE attribuent des contrats pour des biens, des services et des travaux en introduisant des critères supplémentaires en matière d'environnement, d'émissions de gaz à effet de serre et de production locale. La littérature scientifique n'aborde généralement pas cette question, il faut plutôt se tourner vers la littérature grise pour accéder à des analyses et des propositions concrètes sur ce point²³. Le Conseil national de l'Industrie (CNI) en France a repris cette proposition dans un avis du 13 juin 2025 intitulé « Faire de la préférence européenne un levier de réindustrialisation ». Certains partis politiques mentionnent également une telle option : par exemple, le Président de la République française, Emmanuel Macron, affirmait en novembre 2022 que « l'Europe ne peut pas être le seul endroit où il n'y a pas de 'Buy European Act' ». En effet, les réglementations applicables aux terres rares reposent, aux États-Unis et en Chine, sur une préférence nationale dans les marchés publics. Certains défendent donc la possibilité de s'aligner sur les États-Unis en imposant, comme dans le « Buy American Act », dans les marchés publics, qu'un certain pourcentage - ici 50% - des biens et services aient été produits aux États-Unis ou par une entreprise américaine. Alternativement, l'Inflation Reduction Act (IRA) prévoit des clauses de « contenu local » (« local content rules ») qui conditionnent tout octroi d'aides d'États et de crédits d'impôt à une obligation de rapatrier une partie de la production sur le sol européen. Le « Buy European and Sustainable Act » pourrait ainsi prendre la forme d'une directive européenne réglementant la manière dont les autorités publiques des États membres de l'UE attribuent des contrats pour des biens, des services et des travaux en introduisant des critères supplémentaires en matière d'environnement, d'émissions de gaz à effet de serre et de « contenu local ». Néanmoins, cette proposition se heurte *a priori* aux règles internationales et européennes de non-discrimination.

La nécessité, enfin, de mieux définir les chaînes de valeurs : la réelle prise en compte du cycle de vie des produits exige une plus grande cohérence juridique du cadre applicable (Langlais, 2010). C'est ce qui ressort également de l'étude d'Ida Mae de Waal (Ida Mae De Waal, 2023) qui identifie plusieurs freins juridiques à une prise en compte plus circulaire des déchets électroniques (identifiés dans la littérature mais aussi des entretiens avec des praticiens aux Pays-Bas) : pour l'auteur, il serait souhaitable d'améliorer l'interaction au sein du cadre juridique régissant le cycle de vie des DEEE ; de mieux aligner la législation sur les objectifs de l'économie circulaire et de la réflexion sur le cycle de vie, notamment en déplaçant l'accent de la directive DEEE vers des niveaux plus élevés de la hiérarchie des déchets, ainsi qu'en faisant

²³ Hughes-Marie Aulanier, Alain Grandjean, Antoine Crépel et Jori Damond, dans *Buy European and Sustainable Act : accélérer la transition vers une économie européenne bas-carbone*, Carbone 4, 2024. <https://www.carbone4.com/publication-buy-european-and-sustainable-act>.

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

un meilleur usage des instruments et possibilités existants dans la législation, tels que l'amélioration de la REP et la définition d'exigences plus circulaires en matière d'écoconception. Et ce, sans perdre de vue les aspects pratiques, tels que l'applicabilité et la complexité de la législation (Ida Mae De Waal, 2023). De même, cette prise en compte des impacts environnementaux tout au long du cycle de vie invite à considérer les impacts globaux, soit à l'échelle planétaire, générés par l'utilisation des terres rares. Le secteur textile peut être source d'inspiration.

2.2.3.2.4 Améliorer la traçabilité : focus sur l'analyse du futur passeport numérique par la littérature scientifique

La création d'un passeport numérique des produits est prévue par le Règlement européen de 2024 sur l'écoconception (présenté *supra*). Le droit européen présente le passeport numérique comme un moyen de traçabilité, donc de régulation, mais aussi de démocratisation des chaînes de valeur. Le passeport numérique complète ainsi la déclaration environnementale de produit ou DEP, document qui présente le cycle de vie complet d'un matériau, et depuis le CRMA, la présence de terres rares dans un bien importé.

2.2.3.2.4.1 Avantages et fonctions du passeport numérique

L'un des obstacles identifiés par la littérature à la mise en place d'une économie circulaire des métaux est l'enjeu du manque d'information concernant la composition, l'usage et la fin de vie des produits (Adisorn et al., 2021; Rajaeifar et al., 2022). La traçabilité est ainsi définie comme « la capacité à tracer et vérifier l'histoire, la distribution et la localisation des produits, de leurs composants et des matériaux qui les constituent » (Psarommatis et al., 2024). La traçabilité présente de nombreux avantages tout au long du cycle de vie du produit, de sa conception à son recyclage (Pietron et al., 2023; Psarommatis et al., 2024) :

- Dans la phase de production, la traçabilité permet d'améliorer la transparence de la chaîne d'approvisionnement, conduisant à un « *sourcing* » plus responsable et une minimisation des impacts environnementaux.
- Au moment de l'achat, la traçabilité permet aux consommateurs de prendre une décision informée.
- Au moment de la fin de vie du produit, la traçabilité facilite la réutilisation ou le recyclage, permettant une meilleure récupération des métaux.

Certains auteurs vont plus loin en identifiant neuf fonctionnalités systémiques d'un DPPE, un écosystème du passeport digital des produits, qui correspondent aux intérêts de différentes parties prenantes. Chacune de ces fonctionnalités présente des avantages ou des inconvénients pour différentes parties prenantes, et est ainsi soutenue ou au contraire bloquée par des parties prenantes spécifiques. Ainsi, la Commission européenne voit dans le DPPE un outil prometteur permettant d'accroître la transparence des entreprises, dans une perspective de compliance, tandis que les acteurs économiques peuvent s'opposer à la mise en place d'un DPPE pour des raisons d'intérêts commerciaux et de propriété intellectuelle. Le tableau ci-dessous reprend les 9 fonctionnalités d'un DPPE, les moyens mis en œuvre et les objectifs de chaque fonction (King et al., 2023) :

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

Le DPPE est...	Qui...	En...	Pour...
Un système d'échange d'informations (A)	Augmente la valeur des données relatives à un produit	Fournissant un mécanisme d'identification et de description uniques et en échangeant les données des produits et des acteurs	Faciliter les activités en aval du cycle de vie du produit Augmenter l'efficacité du partage d'informations entre entreprises.
Un système de comparaison des produits (B)	Garantit une information fiable et adéquate	Fournissant des sets d'attributs comparables de produits à identification unique	Faciliter le choix du consommateur Faciliter les décisions d'achat des marchés publics Faciliter la comparaison produit et les services de conseil
Un système pour augmenter la transparence des entreprises (C)	Augmente l'incitation pour les entreprises à adopter des pratiques responsables	Exigeant des preuves pour confirmer les déclarations de chaque acteur	Garantir la conformité avec les différentes réglementations Éviter le greenwashing Mieux répondre aux risques de la chaîne de valeur
Un outil pour mesurer la performance de l'industrie (D)	Facilite vers la transition vers une économie circulaire	Définissant des métriques pour mesurer la circularité tout au long du cycle de vie du produit	Cibler les investissements et l'innovation là où la marge d'amélioration est la plus opportune Mesurer les impacts des business models les plus soutenables
Un outil de conception des produits (E)	Encourage les fabricants à créer et réparer des produits durables	Définissant des exigences de circularité et de durabilité pour chaque type de produit	Encourager des produits davantage réutilisables, réparables, recyclables, upgradables...
Un outil de traçabilité des produits tout au long de leur cycle de vie (F)	Augmente la transparence de la vie du produit après son achat	Capturant des preuves d'une chaîne de possession [chain of custody : les différents propriétaires et usagers du produit] et des événements associés	Prouver l'authenticité d'un produit et lutter contre les contrefaçons Garantir la qualité des produits de seconde main Fournir un meilleur service après-vente pour les produits sous ou hors garantie Utiliser les retours des consommateurs pour améliorer la conception

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

Un système de communication d'informations opérationnelles sur les produits (G)	Augmente l'espérance de vie des produits et garantit une récupération maximale de la valeur en fin de vie	Fournissant l'information nécessaire pour étendre la vie utile du produit et optimiser sa mise au rebut	Améliorer la manipulation des produits par l'utilisateur Améliorer la capacité de maintenance des produits Augmenter la disponibilité et le coût des pièces de rechange et services de réparation Encourager l'adoption de systèmes de récupération des produits en boucle fermée et d'autres initiatives de recyclage des produits
Un système d'évaluation de l'impact du produit tout au long de son cycle de vie (H)	Rend l'impact total d'un produit transparent	Exigeant une analyse de cycle de vie totale avec des métriques sociales et environnementales	Encourager une réduction de l'impact chez les producteurs à l'impact le plus élevé
Un système d'identification des matériaux et composants d'un produit (I)	Permet la traçabilité de tous les composants d'un produit	Identifiant les matériaux de valeur, problématiques ou toxiques à récupérer dans un produit	Améliorer la récupération des matériaux Récompenser et sanctionner les fabricants en fonction des matériaux utilisés Garder une trace des stocks et des flux matière

2.2.3.2.4.2 Obstacles à la mise en œuvre du passeport numérique

Si plusieurs initiatives existent, dans un cadre réglementaire ou volontaire, celles-ci restent isolées et sectorielles. C'est le cas par exemple de l'initiative BAMB (Buildings as Material Banks) dans le domaine de la construction ou des passeports Cradle-to-Cradle (King et al., 2023).

Une revue de la littérature permet d'identifier deux obstacles majeurs à une mise en œuvre universelle du DPP : le manque de données robustes, et au-delà, l'absence de consensus impliquant la totalité des parties prenantes sur les types de données nécessaires à la mise en œuvre du DPP ; et, par ailleurs, l'absence de cadre universel, exhaustif et standardisé facilitant l'interopérabilité.

Jansen et al. identifient ainsi 4 jeux de données nécessaires au DPP (Jansen et al., 2023) :

- Des données de fabrication : composition du produit, matériaux utilisés
- Des données d'utilisation : composants du produit qui ont été réparés ou remplacés
- Des données sur la fin de vie du produit : collecte, tri et traitement
- Des données sur le cycle de vie du produit : volume de mise sur le marché, permettant d'anticiper le volume de mise au rebut.

2.2.3.2.4.3 Proposition d'une méthodologie de mise en œuvre du passeport numérique

Concrètement, pour implémenter le DPP au sein de chaque secteur industriel, Psarommatiset al. proposent une méthodologie en 7 étapes (Psarommatiset al., 2024) :

- Analyse du secteur industriel pour comprendre les spécificités du processus opérationnel de cette industrie, les dynamiques de la chaîne d'approvisionnement et le cadre réglementaire

2.2 Le cadre juridique applicable à l'utilisation des terres rares, entre sécurité de l'approvisionnement et économie circulaire

- Identification des parties prenantes, pour comprendre les besoins en données et leurs interactions
- Cartographie des besoins en données, pour s'assurer que le DPP capture bien toutes les données nécessaires sur l'ensemble de son cycle de vie
- Évaluation de la technologie : évaluer le contexte technologique actuel pour identifier les meilleurs fournisseurs de données et plateformes potentielles pour l'intégration du DPP
- Compliance réglementaire, pour s'assurer que le cadre du DPP est compatible avec les réglementations spécifiques à l'industrie en question
- Pilote : développer un test en phase pilote avec un échantillon de participants issus de l'industrie et recueillir leurs retours pour améliorer le modèle.
- Guide d'implémentation pour passer à l'échelle, incluant des stratégies d'intégration, un programme de formation, et des métriques d'évaluation.

Il est à noter deux gaps dans la littérature sur le DPP, identifiés par Jansen et al. : l'utilisation des ressources et de l'énergie nécessaires à l'implémentation du DPP d'une part : dans certains cas, l'économie de ressources et d'énergie permise par le DPP pourrait être contrebalancée par la quantité de ressources et d'énergie facilitée par son implémentation, constituant ainsi un effet rebond caractéristique (Jansen et al., 2023). L'enjeu de la protection des données, d'autre part : si des données sensibles doivent être collectées, il faudra veiller à ce que les cadres réglementaires comme le GDPR soient respectés.

Enfin, nous observons que si les concepts de logistique inversée (*reverse logistics*) ou de chaîne d'approvisionnement inversée (*reverse supply chain*) sont convoqués dans la littérature (Berger et al., 2022) qui propose une étude de cas portant sur les batteries de véhicule électrique ; (Koppelaar et al., 2023; Panza et al., 2023), celui de *reverse engineering*, pratique consistant à déterminer manuellement les composants d'un produit en le démontant afin d'obtenir des informations sur les composants et les matériaux (mais évidemment pas l'origine), en l'absence de données fournies par le fabricant, n'apparaît jamais. Aucun des auteurs s'étant penchés sur le sujet du DPP n'envisage donc la possibilité de mettre en place un passeport numérique sans l'accord et la participation active de tous les acteurs de la chaîne de valeur (Walden et al., 2021).

2.2.4 Conclusion

En conclusion, le droit relatif aux terres rares repose sur des considérations scientifiques, géopolitiques, économiques tout autant qu'écologiques, et ses acteurs sont de plus en plus les experts, les entreprises, les scientifiques, en plus des États. L'effectivité de ce droit et de cette gouvernance des terres rares dépend en réalité de la qualité du débat entre ces acteurs (Hale et al., 2025). En outre, des mesures réalisables pourraient contribuer à la construction d'un « droit des chaînes de valeur » par une harmonisation des droits notamment européens et chinois, ou la création d'un *Buy European Act*, qui, ensemble, permettraient de contribuer à la relocalisation des chaînes de valeur sur le territoire européen. Finalement, un nouveau droit se construit en matière d'utilisation des terres rares, par une « juridification » progressive de la chaîne de valeur. Dans l'institutionnalisation de ce nouveau « continent » du droit peu appréhendé par la littérature, la dimension démocratique demeure cependant lacunaire.

2.3 Concevoir, consommer et posséder autrement

L'essentiel

Le changement des modes de conception, de fabrication et de consommation (action sur la demande) est central pour optimiser la consommation et sécuriser les approvisionnements. La littérature sur l'économie circulaire ne mentionne pas spécifiquement les ETR, la plupart du temps. Néanmoins, ses principes généraux sont susceptibles d'être appliqués aux dispositifs qui en contiennent, qui font, eux, l'objet d'études. Cette littérature se concentre notamment sur l'écoconception, l'économie de la fonctionnalité et les préférences des consommateurs.

Pour écrire ce chapitre, un peu plus de 300 références bibliographiques, d'inégale pertinence, ont été consultées : seuls les articles les plus importants sont cités de manière explicite. En effet, les ETR ne constituent pas le point focal de la majorité des articles : ceux-ci mentionnent souvent des dispositifs* contenant des ETR (des véhicules électriques par exemple), sans que les ETR ne soient individualisés dans l'analyse. Nous avons donc pris le parti, dans les paragraphes qui suivent, de mettre en avant les éléments saillants de cette littérature en faisant apparaître sa signification pour le sujet ETR.

Cette partie ancrée dans les sciences humaines et sociales aborde des sujets et des thématiques qui relèvent de l'économie circulaire, conçue comme une manière alternative et plus sobre de produire (2.3.1), de posséder (2.3.2) et d'utiliser (2.3.3) des produits. En cela, cette partie décline les quatre modalités de la sobriété relevées par l'ADEME (Cézar & Mourad, 2019) : la sobriété structurelle (organiser l'espace ou les activités pour favoriser la modération), la sobriété dimensionnelle (dimensionner les équipements à leurs conditions d'usage), la sobriété d'usage (utiliser au mieux les équipements pour réduire leur consommation), et la sobriété conviviale (mutualisation).

2.3.1 Concevoir et fabriquer autrement

L'éco-conception est l'un des piliers de l'économie circulaire qui « vise à minimiser les impacts environnementaux des produits et services dès leur conception et sur l'ensemble de leurs chaînes de valeur » (ADEME). C'est un processus itératif qui intègre les considérations environnementales dans la conception et le développement de produits ou de services. Au-delà de la simple réduction des impacts négatifs sur l'environnement, l'éco-conception cherche à créer des solutions innovantes à la fois profitables pour l'entreprise et moins coûteuses pour la planète. Elle repose sur une approche globale permettant de comprendre et de réduire l'impact des choix de conception, des matériaux, des méthodes de production et, plus généralement, des différentes étapes du cycle de vie ayant un effet sur l'environnement. Cette approche ne se limite pas à la réduction des déchets ou à l'amélioration de l'efficacité énergétique ; elle englobe également l'amélioration de la fiabilité, de la réparabilité et de la recyclabilité — et réfléchit à la synergie entre ces différents items (Daniel Belchi Lorente, 2016). Par exemple, Andre et al. indiquent que l'utilisation d'ordinateurs portables d'occasion fournis par une structure de réparation et de revente est vertueuse de deux points de vue : elle étend la durée d'utilisation des dispositifs (et donc, allonge l'amortissement de l'impact environnemental de leur production) ; elle permet l'orientation des flux d'ordinateurs en fin de vie vers des structures de recyclage de haute efficacité (Andre et al., 2019).

Dans les paragraphes qui suivent, nous abordons les justifications de l'éco-conception, ses démarches, et enfin, ses résultats et ses limites.

2.3.1.1 Pourquoi éco-concevoir ? Décliner l'éco-conception à chaque niveau fonctionnel.

Les objectifs d'une démarche d'éco-conception peuvent être résumés ainsi :

- **Réduction des impacts environnementaux** : émissions de gaz à effet de serre, émissions de particules polluantes et production de déchets à chaque étape du cycle de vie du produit.
- **Utilisation efficiente des ressources** : minimisation de la consommation d'énergie, maximisation de l'utilisation de matériaux recyclés ou renouvelables, rationalisation des quantités de matériaux utilisés et optimisation de l'efficacité des procédés de production par la réduction des rebuts.
- **Durabilité et longévité des produits** : conception de produits plus durables, faciles à réparer et pouvant être recyclés ou réutilisés, réduisant ainsi leur empreinte écologique sur le long terme.
- **Conformité aux normes et réglementations** : respect des réglementations environnementales en vigueur et anticipation des futures directives en matière de durabilité.

L'éco-conception peut se décliner à chaque niveau fonctionnel au sein des objets fabriqués : au niveau des **constituants**, au niveau des **matériaux** et au niveau des dispositifs et des **produits**. Dans la littérature de SHS de notre corpus, il existe peu d'analyses du niveau « constituant » (a contrario : (Cisternas et al., 2022) à propos de la mise en œuvre de l'économie circulaire dans le traitement des minerais). Les niveaux « matériaux », « dispositifs » et « produits » sont davantage traités et sont souvent associés sous une unique bannière de « material efficiency » (Song et al., 2023).

2.3.1.1.1 Matériaux

L'éco-conception des matériaux est parfois présentée dans la littérature comme la mise en œuvre d'un « développement durable des matériaux ». Il s'agit d'incorporer des considérations et des métriques de soutenabilité dans le design des matériaux au-delà des strictes considérations de performance (Schoenung & Olivetti, 2023). Cette approche est justifiée par les caractéristiques des matériaux contenant des ETR, emblématiques de la transition énergétique : ils sont à la fois de plus en plus massifs/nombreux au sein des produits, leur fabrication et leur démantèlement sont de plus en plus complexes, et ils sont soumis à des risques d'approvisionnement (criticité). Par ailleurs, Nansai et al. montrent une corrélation positive et significative entre l'augmentation des flux de métaux au sein des économies et la dégradation des indicateurs de développement durable (Nansai et al., 2019).

Certains articles invitent à ne pas raisonner de manière globale à propos des ETR au sein des matériaux et à singulariser l'analyse pour chaque ETR. Par exemple, Binnemans et al. indiquent que les deux catégories d'ETR lourds et d'ETR légers sont elles-mêmes extrêmement composites : comme l'holmium, l'erbium, le thulium et l'ytterbium ne font pas l'objet d'usages à fort volume, ils n'ont pas le même caractère de criticité que d'autres terres rares, en particulier le néodyme (Binnemans et al., 2018, p. 128).

L'écoconception appliquée aux matériaux suppose de prendre en compte la dimension sociale, environnementale, voire politique, de la production de certains matériaux (Bailey et al., 2017; Goe & Gaustad, 2014) — et des méthodologies ont été développées pour cela sur la base de l'analyse du cycle de vie (Hackenhaar et al., 2024). Un même matériau peut avoir des caractéristiques socio-

environnementales très variables selon son lieu et ses modalités de production. Par exemple, dans leur analyse comparée (Social Life Cycle Analysis) des risques sociaux dans trois chaînes d'approvisionnement en aimants NdFeB (Chine, Australie/Malaisie et États-Unis/Japon), Werker et al. indiquent que la chaîne d'approvisionnement américaine présente les risques sociaux les plus faibles, tandis que celles de Mount Weld (Australie) et de Bayan Obo (Chine) sont confrontées à des risques sociaux plus élevés, notamment en ce qui concerne la corruption dans le secteur public. L'étude souligne aussi que les intrants utilisés dans le traitement des ETR, en particulier lors des étapes d'enrichissement et de séparation, présentent des risques sociaux et environnementaux notables, notamment en Chine. Elle suggère que l'amélioration de la durabilité sociale nécessite de meilleures données sur les pratiques au sein de la chaîne d'approvisionnement conjointement avec le renforcement de la transparence et de l'approvisionnement responsable (Werker et al., 2019). Ce constat est partagé par Bing et Tu (Bing & Tu, 2019). Ces auteurs partagent un modèle conceptuel d'utilisation des big data pour favoriser l'émergence d'une chaîne de valeur chinoise environnementalement plus vertueuse. Ils suggèrent que l'information sur les ETR et leurs conditions de production devrait être partagée entre les six groupes d'acteurs qui interviennent dans la chaîne de valeur : les entreprises minières appartenant aux six grands groupes chinois actifs dans ce secteur, les entreprises de traitement du minerai, les entreprises qui développent des matériaux contenant des ETR, les entreprises qui utilisent des matériaux contenant des terres rares pour fabriquer des dispositifs et enfin, les entreprises qui font commerce des ETR.

2.3.1.1.2 Dispositifs

La littérature d'analyse du cycle de vie fournit un certain nombre d'exemples où les avantages comparés de dispositifs contenant des ETR sont analysés. Les études d'ACV mettent en lumière les impacts environnementaux notables liés à l'extraction, au traitement et à la fabrication des terres rares, puis à leur usage dans des dispositifs manufacturés (Levy et al., 2017). Par exemple, en ce qui concerne les aimants aux terres rares qui constituent une utilisation finale majeure pour des éléments comme le néodyme et le samarium, des ACV comparatives de fabrication d'aimants pointent une optimisation possible selon le choix :

- de constituants - par ex. entre 13 et 23 % de l'impact environnemental en moins en utilisant du Sr-ferrite pour la construction de moteurs plutôt que des aimants NdFeB (Nordelof et al., 2019),
- et de méthodes - par ex. 11 % d'impact environnemental en moins en utilisant des imprimantes 3D plutôt que des moules²⁴ (Kulkarni et al., 2023).

Bailey et al. ont mené une analyse du cycle de vie comparative entre les aimants au samarium-cobalt (SmCo) et ceux au néodyme-fer-bore (NdFeB), révélant que les aimants SmCo génèrent 135 kg d'émissions de CO₂ équivalent pour chaque 2,04 kg produit (Bailey et al., 2020, 2021). En comparaison, les aimants NdFeB émettent environ 30 kg de CO₂ équivalent par kilogramme. Bien que le remplacement du néodyme par le samarium puisse partiellement atténuer les contraintes liées à l'approvisionnement en néodyme, cette substitution introduit de nouveaux défis, notamment une dépendance accrue au cobalt et au samarium, deux éléments eux-mêmes associés à des risques géopolitiques d'approvisionnement et à des préoccupations éthiques liées aux pratiques minières.

Autre exemple, dans le cas des technologies de réfrigération magnétique, les aimants en NdFeB représentent environ 30% de l'impact total sur le changement climatique durant la phase de production

²⁴ La fabrication additive (Big Area Additive Manufacturing, BAAM) plutôt que le moulage par injection (Injection Molding, IM).

(Monfared et al., 2014). L'empreinte environnementale de ces aimants est principalement due aux procédés d'extraction et de raffinage de l'oxyde de néodyme, qui sont à la fois énergivores et polluants : même s'ils sont plus économes en énergie que les réfrigérateurs conventionnels, le bilan global des émissions de CO₂ pour les réfrigérateurs magnétiques reste négatif.

Tableau 2-4 Contribution des principales étapes du cycle de vie à l'impact total sur le changement climatique de chaque réfrigérateur. Selon les données de (Monfared et al., 2014).

	Production	Use phase	End of life	Total (kg CO2 eq)
Magnetic refrigerator	33%	65%	2%	808
Conventional refrigerator	25%	73%	2%	718

En plus des technologies vertes et des dispositifs contenant des aimants, les terres rares sont également utilisées dans d'autres applications, telles que les catalyseurs pour la production de biodiesel. Par exemple, des oxydes de terres rares comme les oxydes de cérium, de lanthane et de néodyme ont été synthétisés à partir de minerai de monazite et utilisés comme catalyseurs dans la production de biodiesel (Ratthanaphra & Suwanmanee, 2019). Les ACV de ces procédés montrent que les catalyseurs à base de La₂O₃ présentent des impacts environnementaux plus faibles comparés à ceux à base de CeO₂ et de Nd₂O₃, soulignant encore une fois l'importance du choix des matériaux pour minimiser l'empreinte environnementale des dispositifs. L'ACV et des pratiques de modélisation qui en dérivent aboutissent à des résultats intéressants, notamment en matière d'analyse multicritères : Baars et al. montrent que la densité énergétique des batteries de véhicules électriques est réduite de 20% quand les autres paramètres (coût, émissions de gaz à effet de serre ou criticalité) sont optimisés (Baars et al., 2023).

2.3.1.1.3 Produits

La littérature privilégie certains objets emblématiques qui associent plusieurs dispositifs contenant des terres rares, notamment les véhicules électriques et les technologies renouvelables de production d'électricité (Holcombe et al., 2023). Parmi ceux-ci, les éoliennes tiennent une place particulière car c'est une technologie populaire dans les pays occidentaux (Firestone & Kirk, 2019), dont le développement tire la demande pour les ETR (Alonso et al., 2012; Fishman & Graedel, 2019), faisant planer le risque d'une demande excédant largement l'offre (Kleijn & van der Voet, 2010; J. Li et al., 2020). Si toutes les éoliennes ne comportent pas de terres rares (Brussa et al., 2023), celles qui en contiennent sont plus performantes techniquement et économiquement. Dans une étude récente menée par Aridi et al. (2025), différents systèmes d'énergie renouvelable ont été comparés à l'aide du coût actualisé de l'électricité (LCOE) (Aridi et al., 2025). Les résultats ont montré que l'énergie éolienne affichait le LCOE le plus bas, à 0,030 €/kWh, suivie de l'hydroélectricité (0,045 €/kWh), du solaire (0,048 €/kWh), de la biomasse (0,065 €/kWh) et du stockage par pompage (0,085 €/kWh). Cet avantage économique de l'éolien est principalement attribué aux avancées technologiques qui réduisent les coûts d'exploitation et augmentent la production d'énergie — avancées qui reposent sur un usage accru d'ETR. Du fait du risque de tensions sur le marché des ETR liées au développement de l'éolien offshore dans le futur (Kleijn & van der Voet, 2010), la littérature appelle à aborder les éoliennes via les outils de l'économie circulaire (P. D. Jensen et al., 2020) et identifie des stratégies de substitution des ETR au niveau des matériaux et des dispositifs (Pavel et al., 2017). Quelques rares exemples existent, qui donnent de l'information sur la mise en place effective de

l'éco-conception au sein des entreprises de fabrication d'éoliennes : par exemple, Bonou et al. décrivent le cadre développé par Siemens Wind Power pour éco-concevoir ses turbines (Bonou et al., 2016). Il est à noter que les ETR sont mentionnés à propos de la réflexion engagée par l'entreprise pour louer, et non vendre, ses moteurs d'éoliennes et ainsi conserver la propriété des aimants qu'ils contiennent.

De manière plus générale, la littérature invite à améliorer la prospective technologique à propos des produits contenant des ETR (Christmann & Lefebvre, 2022) afin de mieux aligner l'offre et la demande dans une perspective de croissance des usages (de Koning et al., 2018; Granvik et al., 2025).

2.3.1.2 Comment ? Démarches, stratégies et outils de l'éco-conception

L'adoption de l'éco-conception dans l'entreprise nécessite une stratégie claire et des objectifs précis. En optimisant la durabilité des produits dès la phase de conception et en intégrant des principes de l'économie circulaire tels que la recyclabilité et la réutilisabilité, l'éco-conception contribue à créer un système dans lequel les produits ont une durée de vie plus longue et un impact environnemental réduit.

2.3.1.2.1 Démarches générales

Les organisations internationales et gouvernementales ont publié des guides généraux sur la mise en pratique de la démarche. La publication du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (UNEP) intitulée *Design for Sustainability: A Step-by-Step Approach*²⁵ décline trois approches différentes d'éco-conception pour les designers et l'industrie : la refonte de produits existants, le développement de nouveaux produits et l'innovation radicale en faveur de produits durables allant au-delà du seul pilier de la durabilité environnementale.

Selon l'ADEME²⁶, le déploiement d'une stratégie d'éco-conception suppose de suivre une démarche structurée, par étapes :

- Définition du projet : fixer des objectifs clairs et un cadre pour le projet d'éco-conception.
- Inventaire et analyse du cycle de vie : réaliser une première analyse environnementale afin d'évaluer les impacts à chaque étape du cycle de vie du produit.
- Identification des pistes d'amélioration : à partir de l'interprétation des résultats de l'ACV, rechercher des leviers de réduction des impacts en tenant compte de leur faisabilité.
- Mise en œuvre : appliquer les changements conçus pour améliorer la performance environnementale du produit sur les impacts concernés.
- Communication : partager les efforts et les réussites en matière d'éco-conception avec les parties prenantes, de manière sincère et transparente.
- Évaluation et amélioration continue : mesurer les progrès réalisés et poursuivre la recherche d'améliorations.

²⁵ <https://www.unep.org/resources/report/design-sustainability-step-step-approach>

²⁶ <https://economie-circulaire.ademe.fr/ecoconception#ressources-recommand%C3%A9es-par-l%E2%80%99ademe-pour-passer-%C3%A0-l%E2%80%99%C3%A9coconception>

2.3.1.2.2 Exemples de stratégies

La littérature fait état d'occurrences d'éco-conception d'objets qui contiennent des ETR, sans nécessairement singulariser la dimension « terres rares » dans l'analyse. Voici quelques exemples de stratégies :

Le *repurposing* (ou « utilisation en cascade ») est le processus industriel par lequel des produits en cours ou en fin d'usage premier sont utilisés dans des applications différentes. Il se distingue du *ré-emploi* (où le produit est réutilisé pour le même usage fonctionnel) et de la *re-fabrication*, où le produit subit un nouveau processus de fabrication partielle, ce qui permet généralement d'économiser des ressources : de 2 à 6% dans le cas des batteries usagées d'une étude (Huster et al., 2022). Des produits qui ont été correctement maintenus sont plus faciles à refabriquer, comme le montre le cas des turbines d'éoliennes (Ortegon et al., 2014). La thèse de Tom Bauer (Bauer, 2018) fait des propositions méthodologiques pour développer le *repurposing*, dont la déclinaison la plus connue concerne les batteries au lithium des véhicules électriques. Celles-ci peuvent être utilisées pour des usages stationnaires pendant leur exploitation — par exemple en les utilisant comme capacité de stockage pour des réseaux électriques quand les véhicules ne circulent pas (Bohnsack et al., 2015; Hunter & Young, 2015) — ou lorsqu'elles sont en fin de vie (Bode et al., 2018; Fallah & Fitzpatrick, 2022; Voscort et al., 2018). Cette littérature note que les freins au *repurposing* ne sont pas techniques, mais plutôt organisationnels (Alamerew & Brissaud, 2020) : le *repurposing* doit être pris en compte au moment de la conception de l'objet et doit pouvoir être intégré dans un modèle d'affaire robuste, qui fait souvent défaut.

La définition de normes de performance ou de durabilité. La normalisation de la performance des produits est un élément central des stratégies d'éco-conception (Gonzalez-Torres et al., 2023). L'instauration de normes minimales de performance (par exemple les normes MEPS — minimum energy performance standards — sur la performance énergétique) permet la transformation des industries par un remplacement progressif des produits (de Almeida et al., 2017). Les normes peuvent être fondées sur des indicateurs de performance technique, mais aussi sur des indicateurs de durabilité des dispositifs et des procédés. Par ailleurs, les normes peuvent être associées à des politiques d'étiquetage (*labelling*). Néanmoins, dans leur évaluation des effets de la politique européenne de MEPS en matière de froid domestique, Schleich et al. montrent qu'ils ont tendance à être surévalués (Schleich et al., 2021). De la même manière, si les étiquettes de performance apportent une information utile au consommateur, leur contribution précise reste dépendante du contexte (Fang et al., 2023).

La substitution. La substitution peut jouer un rôle dans le renforcement de la durabilité des approvisionnements en ETR — en limitant notamment l'exposition au risque géopolitique (Cimprich et al., 2018, 2019). Dans leur analyse économétrique du cas américain, Lee et al. montrent que la réduction de la consommation via la substitution constitue la meilleure stratégie de réduction de la dépendance à la Chine (Y. Lee & Dacass, 2022). Schmid arrive à la même conclusion à propos du Japon (Schmid, 2019).

L'amélioration de la recyclabilité. La prise en compte de la refabrication future, ou du recyclage, est une déclinaison importante de l'éco-conception (Pini et al., 2019). Siderius analyse quatre stratégies d'éco-conception applicables aux panneaux solaires : la refabrication des dispositifs, la réutilisation des composants, leur recyclage et enfin, la récupération des matériaux de base (Siderius, 2013). Il montre que les matériaux et les architectures utilisés déterminent à la fois la faisabilité technique et la rentabilité de ces activités, ce qui est congruent avec les conclusions de Lander et al. à propos des packs de batteries de véhicules électriques : les packs de batteries de fabricants chinois sont près de quatre fois moins chers à désassembler ceux de constructeurs européens et japonais, car ils comportent moins de modules et moins de fixations (Lander et al., 2023).

2.3.1.3 Jusqu'où ? Limites de l'éco-conception dans le cadre de l'économie circulaire

Deux types de limites sont identifiés dans la littérature.

Premièrement, la littérature remarque qu'il est souvent difficile de construire et de stabiliser une chaîne de production adéquate pour des produits éco-conçus — par exemple, en trouvant des fournisseurs qui répondent aux critères sociaux et environnementaux du fabricant. Muench et al. ont analysé les critères de sélection environnementaux de leurs fournisseurs par les fabricants de véhicules électriques (Muench et al., 2022) : ils montrent que le critère principal est le respect des normes et certifications environnementales, mais que les perspectives de long terme (durabilité forte) sont moins importantes que les dispositions de court terme (prévention de la pollution).

Deuxièmement, si le cadre de l'économie circulaire est largement convoqué pour penser l'éco-conception des produits contenant des terres rares, celui-ci est jugé insuffisant par plusieurs auteurs, notamment parce qu'il ne prend pas en compte de façon satisfaisante les enjeux sociaux et le contexte local. Afin d'**intégrer davantage de parties prenantes dans les décisions de design des matériaux et de produits**, Ralph propose un cadre innovant pour l'éco-conception des énergies renouvelables (notamment les éoliennes, qui contiennent des ETR) (Ralph, 2021). Il s'agit de rapprocher les principes de l'économie circulaire et la réflexion sur la « convivialité » des techniques au sens de Illich (Illich, 2021) — c'est-à-dire des technologies que les utilisateurs développent et utilisent de manière collaborative, en échappant aux acteurs dominants. L'outil de conception convivial « Circular Economy — Conviviality Design Tool » propose **cinq critères de technologies conviviales** à prendre en compte pour chacune des étapes de la démarche d'économie circulaire :

- **Relatedness** : Comment la technologie crée-t-elle, ou non, du lien social ? (ex. Centralisé vs distribué)
- **Access** : Qui peut produire et utiliser cette technologie ? (ex. Breveté vs open source)
- **Adaptability** : Quelle est l'indépendance du système ? (ex. Utilise-t-il des matériaux spécifiques ou standardisés ?)
- **Biointeraction** : Quelles interactions avec le vivant ? (ex. Déchets toxiques vs matériaux biodégradables)
- **Appropriateness** : La relation entre l'input et l'output est-elle appropriée ? (ex. Sourcing lointain vs local)

Les cinq questions posées peuvent être comprises comme une *checklist* de questions à poser au moment de la conception d'un objet.

2.3.2 Posséder autrement (l'économie de la fonctionnalité)

L'économie de la fonctionnalité (*Product-Service System*, *Product-as-a-Service*) est une approche commerciale et organisationnelle qui met l'accent sur l'usage du produit plutôt que sur sa possession. Elle désigne donc un ensemble de pratiques comme la location, la mutualisation, le partage qui permettent de maintenir les usages, d'augmenter le taux d'utilisation des produits et donc, de réduire la quantité de matériaux utilisés pour une même quantité d'usage (Sakao et al., 2023). Concrètement, il s'agit par exemple d'acheter un nombre de kilomètres à parcourir plutôt que des pneus, ou un nombre d'impressions plutôt qu'une imprimante. Cela permet une optimisation des ressources ainsi qu'une meilleure éco-efficience et réparabilité du produit, dans la mesure où la charge de la maintenance repose sur le producteur et non sur le consommateur (Lanzilotti et al., 2022). À ce titre, l'économie de la fonctionnalité est considérée comme un des piliers de l'économie circulaire (Matschewsky, 2019) : elle

est néanmoins difficile à mettre en place pour des raisons qui tiennent à la fois aux modèles économiques et au cadre juridique (Golinska-Dawson et al., 2025; Neramballi et al., 2024). Par ailleurs, l'économie de la fonctionnalité suppose souvent d'adapter la conception des produits eux-mêmes, par exemple en les rendant plus robustes (Hidalgo-Crespo et al., 2024).

Douze articles dans notre corpus traitent directement ou indirectement d'économie de la fonctionnalité, dont sept se concentrent sur le partage de véhicules. Les cinq articles restants traitent des enjeux et avantages de l'économie de la fonctionnalité pour l'éolien et l'usinage. Si aucun ne mentionne explicitement les terres rares, tous en revanche s'appuient sur des études de cas d'objets contenant des terres rares ou facilement transposables.

2.3.2.1 Le partage de véhicules électriques

La plupart des études portent sur l'économie de la fonctionnalité dans le domaine de la mobilité, soit le partage de véhicule sous différentes formes plutôt que l'achat individuel. Les résultats montrent que le partage de véhicule est considéré par les consommateurs comme une pratique davantage en rupture que l'achat d'un véhicule électrique. Par conséquent, l'acceptabilité sociale est un élément essentiel à prendre en compte pour l'ensemble des parties prenantes, et constitue la principale question de recherche de la littérature. Si le signal prix apparaît comme peu significatif dans une étude (Kannstatter & Meerschiff, 2015), en revanche l'âge des usagers est déterminant (les plus de 45 ans sont plus fortement dépendants à la culture de la voiture individuelle), ainsi que la conscience environnementale et la perception des bénéfices. Cela est congruent avec les études réalisées dans d'autres pays — par exemple en Corée (Hur et al., 2015).

Le partage de véhicules est l'un des secteurs les plus étudiés de mise en application des principes de l'économie de la fonctionnalité. Tous les articles étudiant des systèmes de voitures partagées se concentrent sur des modèles de véhicules électriques contenant des terres rares dans le moteur. Méthodologiquement, les articles ne distinguent pas toujours entre la dimension véhicule électrique et la dimension partage de véhicule, ce qui rend les résultats parfois difficiles à interpréter. La question de recherche principalement posée est celle des **déterminants socio-démographiques et axiologiques de l'acceptabilité sociale et de l'adoption du partage de véhicules**. Les principales conclusions sont :

- **Le prix est peu déterminant.** Kannstatter et Meerschiff analysent ainsi le premier service de voitures électriques partagées en Allemagne (Kannstatter & Meerschiff, 2015), RUHRAUTOe, qui a vu son nombre de trajets mensuels multiplié par 100 en 1 an (de mars 2013 à mars 2014 : de 50 à 500 trajets mensuels). La distance moyenne parcourue est de 44km, pour une durée de location de 6,5 heures (location à l'heure). Le prix de la location est peu élevé (1,95 € de l'heure pour le modèle le moins cher, une Renault Twizy). **Seulement 15% des répondants (n=120) ont estimé qu'un prix plus faible augmenterait leur utilisation du service.**
- **L'âge est déterminant.** Dans une étude norvégienne auprès de 865 répondants, les plus de 45 ans sont les plus fortement dépendants à la culture de la voiture individuelle (Julsrud et al., 2023). Dans une étude russe auprès de 1671 répondants (Turner et al., 2022), les plus jeunes sont également les plus disposés à adopter le partage de véhicules électriques autonomes.
- **Au sein de la génération Z, la conscience environnementale et la perception des bénéfices** pour l'utilisateur impactent directement et positivement la volonté d'avoir recours à un service de partage de véhicules (Vatamanescu et al., 2023), qui donnent les résultats d'une enquête auprès de 399 répondants **roumains**.
- **Le partage de véhicule apparaît comme plus iconoclaste que l'adoption de la voiture électrique**, et il est donc moins plébiscité (Turner et al., 2022).

2.3.2.2 L'économie de la fonctionnalité dans l'industrie

L'économie de la fonctionnalité dans l'industrie s'opère en B2B (*Business to Business*), et les gains environnementaux ou en économie de ressources sont analysés principalement sous le prisme de l'efficacité économique. Dans l'industrie (usinage), l'économie de la fonctionnalité permet à la fois un gain de temps significatif pour le remplacement des pièces ainsi qu'un gain de rentabilité.

Ainsi une étude dans le domaine de l'usinage (Lanzilotti et al., 2022) montre qu'une démarche d'économie de la fonctionnalité associée à un suivi des outils avec une puce RFID pour les outils de découpe (composés à 81% de tungstène et qui ne contiennent pas de terres rares, mais dont la transposabilité est forte) permet à la fois un gain de temps important (remplacement de l'outil défaillant en 20 minutes au lieu d'une semaine), et une rentabilité économique importante avec un retour sur investissement en 9 mois.

L'économie de la fonctionnalité est beaucoup moins présente dans notre corpus que les autres piliers de l'économie circulaire (notamment éco-conception et recyclage). Les études considérées s'intéressent principalement soit aux déterminants de l'acceptabilité sociale pour les pratiques individuelles, notamment dans le domaine de la mobilité, soit aux gains de productivité et rentabilité pour les pratiques industrielles. Il serait cependant intéressant d'explorer, à l'inverse, les gains (en argent, en temps...) associés à l'économie de la fonctionnalité pour les individus, ainsi que les leviers d'acceptabilité et de désirabilité pour les industriels.

2.3.3 Consommer autrement

La littérature s'intéresse principalement aux choix des consommateurs concernant l'achat d'un véhicule électrique, sans mentionner explicitement la présence de terres rares. Cette dimension est néanmoins importante pour mieux anticiper les besoins en terres rares contenues dans les moteurs des véhicules électriques.

2.3.3.1 Préférences des consommateurs par rapport au véhicule électrique : les principaux résultats

L'étude des préférences des consommateurs est bien représentée dans notre corpus, avec 48 articles. Cependant, parmi ces articles, 39 (soit 81% de ce sous-corpus) questionnent exclusivement le rapport à la voiture électrique, surtout via l'étude des déterminants d'achat d'un véhicule électrique. Dans le champ des *consumer studies*, il y a donc une surreprésentation importante des études sur l'adoption du véhicule électrique, au détriment d'autres choix à investiguer.

Une revue de la littérature systématique (Secinaro et al., 2022) identifie trois déterminants principaux pour les consommateurs dans 254 articles publiés entre 1983 et 2021 : le prix à l'achat (y compris les subventions publiques) ; la conscience environnementale (si des appréhensions environnementales de la part de certains consommateurs sont mentionnées, l'approvisionnement en métaux n'en fait pas partie) ; la perception et la personnalité du consommateur — qui vont le sensibiliser ou pas à l'innovation technologique. Certains constructeurs tirent parti de cette pluralité de facteurs — par exemple pour développer des stratégies de communication qui occultent la véritable empreinte écologique des modèles qu'ils produisent (Palmie et al., 2024). L'adoption plus large des véhicules électriques dépend donc de l'interaction entre plusieurs facteurs : innovation technologique, positionnement des consommateurs et soutien réglementaire. De ce fait, la démarche d'éco-conception des produits doit in fine composer avec le comportement des consommateurs et avec la capacité limitée des produits éco-

conçus à perturber les marchés établis en remplaçant d'autres produits moins écologiquement performants (Dijk et al., 2016). Selon cette étude déjà ancienne, 61 % des acheteurs potentiels de véhicules électriques privilégient les coûts d'achat initiaux et seuls 14 % considèrent les facteurs environnementaux comme prioritaires.

Il est intéressant à ce titre de voir comment la recherche sur les préférences des consommateurs quant aux véhicules électriques est structurée. Secinaro et al. conclut des principales variables bibliométriques sur 254 articles que :

- Analyse co-citation : tous les auteurs appartiennent à un réseau bien structuré autour de 4 thématiques : les préférences des consommateurs, les performances des véhicules, les effets de seuil (*break-even points*) entre EV et véhicules thermiques et des modèles prédictifs, et la satisfaction liée à l'autonomie de la batterie.
- Analyse par mots-clés : **le comportement des consommateurs est devenu un thème majeur à partir de 2014.**
- Analyse méthodologique : 60% des articles utilisent des méthodes quantitatives, 14% mixtes, 13% qualitatives.
- Analyse géographique : **le débat est principalement nourri par les US (137 articles) et la Chine (100 articles), soit 93% du corpus. Il y a donc une sous-représentation de la recherche européenne avec des études de cas portant sur les consommateurs européens.**

La revue de la littérature de Secinaro et al. s'arrêtant en 2021, nous nous sommes demandé si les articles les plus récents de notre corpus venaient confirmer ces résultats sur les facteurs déterminants d'achat d'un EV, en se limitant au contexte européen.

Article	Pays / Population	Contexte et Résultats
(Decrinis et al., 2023)	Allemagne (N = 170)	L'article teste le cadrage du message (<i>message framing</i>) pour encourager l'adoption de véhicules électriques par les salariés d'une entreprise allemande automobile (Porsche) dans une perspective de <i>corporate sustainability</i> . Trois types de messages sont proposés : émotionnel, normatif, et bénéfice (<i>gain</i>). Le message qui a le plus d'impact et de plus long-terme est celui du gain (économies d'énergies et donc coût). L'article suggère que les messages environnementaux normatifs ne devraient être mis en avant que quand l'action promue est contradictoire avec des gains économiques. Limites : 80% des répondants sont des hommes, dans une entreprise probablement avec une faible attitude pro-environnementale.
(Wicki et al., 2022)	Suisse (N = 2 107)	Une liste de 10 obstacles potentiels à l'achat d'un EV est proposée (cf. Figure 2.20). Les 3 barrières principales sont le prix à l'achat, l'incertitude quant au bénéfice environnemental que représentent les EV, et le manque de bornes de recharge.
(Sobiech-Grabka et al., 2022)	Pologne (N = 198)	La Pologne est une étude de cas intéressante : 2ème taux de motorisation en Europe (747 véhicules pour 1000 habitants) mais antépénultième en termes d'immatriculation d'EV. Elle est donc considérée comme un pays retardataire (« EV readiness straggler ») dans l'adoption des véhicules électriques. Le baromètre Nouvelle Mobilité indique toutefois que la part de population disposée à acheter un EV est passée de 12% en 2017 à 33% en 2021. Résultats : Variables socio-démographiques : les femmes, âge 35-44, vivant dans une ville de plus de 500 000 habitants sont plus disposées à acheter un EV.

		Expérience : Il n'y a pas de corrélation entre une expérience de conduite préalable d'un véhicule électrique partagé et la disposition à acheter un EV. Obstacles : Pour 77% des répondants, le prix à l'achat est l'obstacle le plus important. Le 2ème obstacle (26%) est la faible autonomie des batteries. Quant aux croyances des consommateurs, la plus importante est qu'il est inutile d'acheter un véhicule électrique si l'on considère le mix électrique « sale » en Pologne.
(Franziska Anna Schroter et al., 2022)	Allemagne (N = 168)	La préférence pour les véhicules électriques s'exprime dans des réponses explicites, mais pas dans des attitudes implicites (cf. <i>affective priming paradigm</i>). Ce résultat peut s'expliquer par une pression sociale de préférer le véhicule électrique dans un contexte de changement climatique (<i>individual greenwashing effect</i>).

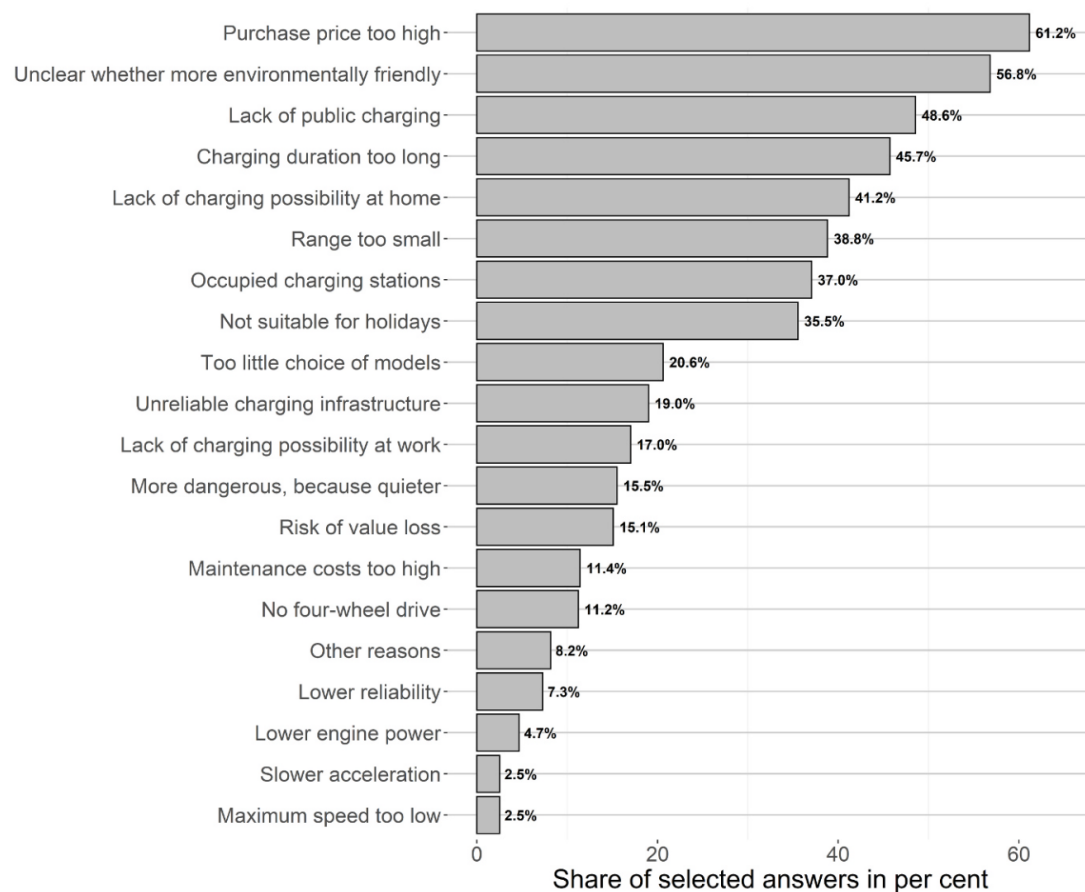


Figure 2.20 Classement des obstacles à l'achat d'un véhicule électrique. Tirée de (Wicki et al., 2022). Sous licence CC BY-NC.

La littérature plus récente (2021-2024) confirme donc l'importance du prix à l'achat, et met également en lumière l'incertitude des consommateurs quant au gain environnemental que représentent les

véhicules électriques par rapport aux véhicules thermiques. Si le coût à l'achat d'un EV reste donc bien l'obstacle le plus important, confirmant en cela les résultats de (Secinaro et al., 2022), on voit également apparaître l'importance de facteurs techniques (infrastructures et temps de chargement) ainsi qu'une nouvelle interrogation dans plusieurs études sur la désirabilité environnementale de l'EV.

On peut nuancer et préciser les résultats de Secinaro et al. et de Wicki et al. sur la question de l'impact et des préoccupations environnementales d'acheteurs potentiels d'EV (Secinaro et al., 2022; Wicki et al., 2022) grâce à l'étude de (Gehlmann et al., 2024) qui s'intéresse aux préférences des consommateurs quant à l'impact environnemental des batteries de véhicules électriques. Plus précisément, l'article interroge les déterminants de la disposition à payer davantage (*Willingness to Pay*: WtP) pour des batteries de véhicules électriques plus durables ou responsables — tout en admettant que pour l'instant ces batteries n'existent pas. Si la plupart des batteries de véhicules électriques récents ne contiennent pas d'ETR, les résultats paraissent facilement transposables pour les moteurs de véhicules électriques (qui, eux, contiennent des ETR) et pour l'approvisionnement en ETR.

Quatre modalités de « batteries responsables » sont proposées dans le questionnaire (Norvège, N = 480) :

1. « Batteries durables » sans plus de précisions
2. Protection de la nature pendant la phase d'extraction en limitant les pollutions des eaux et des sols
3. Meilleures conditions de travail pour les ouvriers
4. Limitation des émissions de GES avec utilisation exclusive d'énergies renouvelables pour la fabrication de la batterie

Les résultats montrent qu'un tiers des participants est disposé à payer davantage, quelle que soit la dimension sur laquelle la batterie serait plus responsable. Les résultats de cette étude doivent cependant être nuancés, dans la mesure où la Norvège est à la fois un pays très riche (ce qui influence nécessairement la WtP) et le pays disposant du plus fort taux d'équipement en véhicules électriques au monde (20,9% en 2024).

2.3.3.2 La théorie des fondations morales : un cadre pertinent pour mieux comprendre les comportements des consommateurs

Silfver et al. proposent une étude des fondations morales déterminant les choix futurs de modes de vie soutenables dans la population finlandaise (N=1020, enquête via questionnaire) (Silfver et al., 2023). L'article s'appuie sur la théorie des fondations morales (*Moral Foundations Theory*: MFT) de Jonathan Haidt (Haidt, 2013; Haidt & Graham, 2007), qui identifie 6 couples de fondations morales, c'est-à-dire des concepts mobilisés par les individus au moment de justifier leur action.

1. Care/harm (prendre soin / faire du mal)
2. Fairness/cheating (justice / injustice)
3. Loyalty/betrayal (loyauté / trahison)
4. Authority/subversion (autorité / transgression)
5. Sanctity/degradation (pureté / souillure)
6. Liberté/oppression (liberté / oppression)

Les deux premiers couples d'opposition sont considérés comme des fondamentaux centrés sur le respect de l'individu, et correspondent à des valeurs politiques libérales (dans le contexte américain). Les trois suivants sont considérés comme des fondamentaux tournés vers le respect du collectif, et correspondent généralement à des valeurs plus conservatrices.

La théorie des fondations morales : individu vs collectif

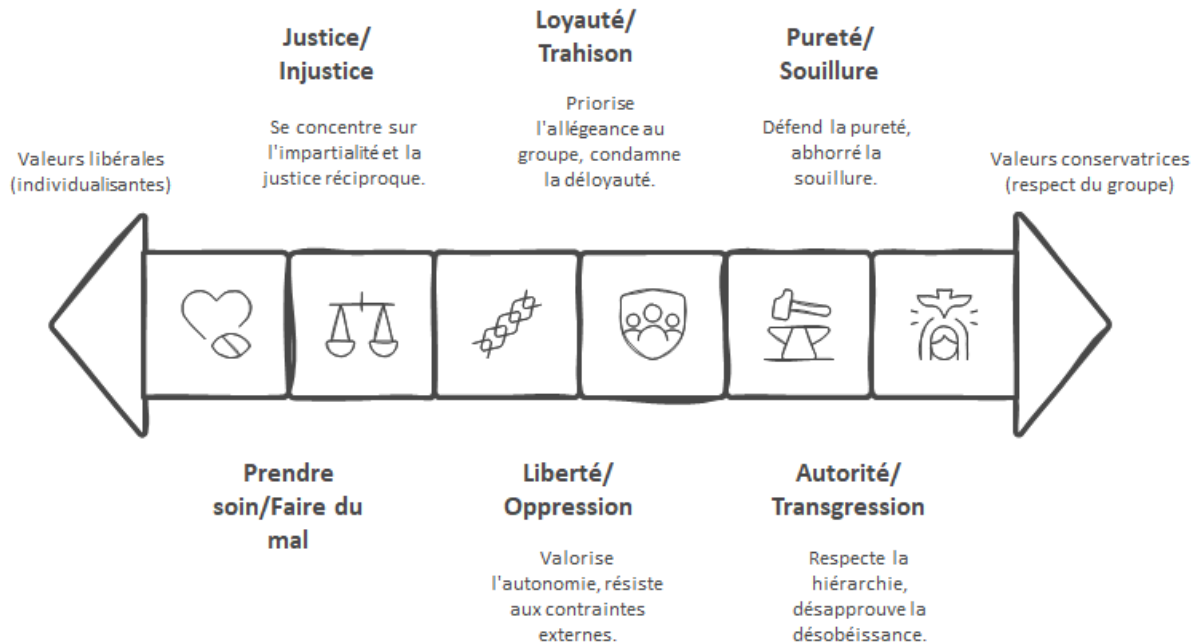


Figure 2.21 La théorie des fondations morales

Les hypothèses de recherche sont les suivantes :

RH1 : les fondations morales libérales (*individualizing*) sont positivement corrélées à des choix pro-environnementaux comme le régime végétarien et le recyclage.

RH2 : les fondations morales conservatrices (*binding*) sont positivement corrélées au choix d'une alimentation locale et naturelle.

Les résultats indiquent que l'achat d'un véhicule électrique est plus désirable pour les participants aux valeurs conservatrices (*binding*) tandis que les participants aux valeurs libérales (*individualizing*) sont plus enclins à préférer le vélo ou la marche, le partage de véhicule et la co-propriété. **Ce résultat est particulièrement intéressant car il remet en cause l'hypothèse de recherche (implicite ou explicite) d'une majorité d'articles qui considèrent que l'achat ou l'intention d'achat d'un véhicule électrique fait nécessairement partie d'un comportement pro-environnemental, sans prendre en compte des mobilités alternatives.** Dans ce contexte, la MFT permet de penser une diversité de modalités de comportements soutenables qui ne sont pas liées aux caractéristiques techniques ou économiques d'un produit mais aux fondations morales des consommateurs. Plus généralement, peu d'études sur les préférences des consommateurs prennent en compte la possibilité de ruptures radicales d'usages dans un contexte de post-croissance (ex. ne pas posséder de voiture individuelle, qu'elle soit thermique ou électrique).

En conclusion, les modes de consommation « durables » sont étudiés principalement à l'aune de trois types de questions de recherche : les déterminants d'achat de certains produits, notamment les véhicules électriques ; la disposition à payer davantage (*willingness to pay*) pour acheter des produits fabriqués de façon plus responsable ; les fondements moraux conduisant à des décisions de consommation alternatives.

Si ces questions sont pertinentes pour mieux comprendre les évolutions possibles de la demande en métaux et plus particulièrement en terres rares, elles ne rendent pas compte des résultats de travaux de sciences humaines et sociales plus génériques sur la sobriété ou l'acceptabilité sociale de modes de consommation alternatifs. Par exemple, Paulson et Büchs suggèrent que 60% de la population européenne se déclare en faveur d'une société post-croissance matérialisée par une diminution de la consommation individuelle (Paulson & Büchs, 2022). Dans le même esprit, Wiedmann et al. mettent l'accent sur l'ampleur de l'impact environnemental de la consommation des foyers les plus aisés dans les pays riches, qui n'est pas ou peu compensé par l'innovation technologique (Wiedmann et al., 2020).

Cette tension suggère un effet silo dans les pratiques de recherche, avec d'un côté des études, peu nombreuses et parfois peu robustes, portant spécifiquement et explicitement sur la consommation de terres rares, et de l'autre des études venant de nombreux champs disciplinaires, proposant des méthodologies variées et des résultats pertinents, mais qui n'annoncent pas explicitement l'impact de leurs conclusions sur la demande en terres rares. Un des enjeux des futurs travaux de recherche pourrait être de combler cette lacune.

ZOOM. Comment réduire l'utilisation d'ETR dans le secteur de la mobilité?

En clair, nous avons vu que les voitures électriques utilisent des ETR principalement pour les moteurs (aimants permanents NdFeB), et les batteries NiMH — mais celles-ci tendent à être remplacées par des batteries Li-ion. Il y a également des utilisations auxiliaires (écrans, haut-parleurs, etc.).

Pour réduire la quantité d'ETR dans le secteur de la mobilité, deux leviers principaux sont possibles :

- 1) **L'éco-conception** des voitures, qui peut passer par :
 - a. **des changements de technologie** (ex. des batteries NiMH vers des batteries Li-ion). Cependant, cela risque de simplement décaler les problématiques écotoxicologiques et de souveraineté vers d'autres matériaux (ici, le lithium).
 - b. **de la substitution**
 - c. **une optimisation de l'efficacité matière** (quantité d'ETR utilisés pour assurer une même fonction)
 - d. **la diminution de la taille des voitures** (les petites voitures électriques types citadines n'utilisent pas d'ETR dans leur moteur).
- 2) **Une diminution de la quantité de voitures**, grâce :
 - a. **À l'augmentation du taux d'occupation**, c'est-à-dire le covoiturage. Le taux d'occupation d'un véhicule en France est en moyenne de 1,4 occupant en mobilité locale et 2,25 pour la longue distance (plus de 80km) en 2019²⁷.
 - b. **Au développement de l'économie de la fonctionnalité** : intensifier l'usage grâce à l'autopartage. Aujourd'hui, une voiture est utilisée en moyenne 1 heure par jour.
 - c. **Au transfert modal** vers les modes doux (transports en commun, vélo, marche). Rappelons ainsi que 42% des Français dont le lieu de travail se situe à moins de 1km de leur domicile s'y rendent en voiture en 2020²⁸.

Hypothèse prospective: en France en 2024, 39,3 millions de voitures particulières sont en circulation. Il est bien sûr essentiel de prendre en compte différents facteurs, comme les spécificités territoriales. Cependant en faisant l'hypothèse que si, en moyenne, le taux d'occupation était multiplié par 2 (pour passer de 1,67 à 3,34 personnes / voiture) et l'intensité d'usage était multipliée par 3 (pour passer à 3 heures d'utilisation par jour par voiture), grâce à l'économie de la fonctionnalité, alors, le nombre de voitures en circulation en France pourrait être, à usage constant (sans rupture technologique ni transfert modal supplémentaire), de 6,5 millions de véhicules. Cette situation présenterait de nombreux avantages, concernant la consommation d'ETR mais également des autres métaux critiques nécessaires à la fabrication des véhicules, ainsi que pour la consommation énergétique du pays.

²⁷ https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/DE_4p_covoiturage-v4-050722_SH_OK.pdf

²⁸ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5013868>

2.4 Mise en perspective et conclusions : réduire les terres rares, un angle mort de la recherche ?

2.4.1 L'invisibilité des problématiques de sobriété et de substituabilité dans la littérature scientifique

2.4.1.1 Les biais de la littérature relative à la réduction de l'utilisation des ETR en science des matériaux

Dans la communauté des sciences des matériaux, la réduction en ETR est principalement abordée sous le prisme de la substitution par d'autres éléments moins critiques ou par l'amélioration de l'efficacité des dispositifs qui les utilisent. Le corpus de publications a été trié selon sa pertinence vis-à-vis des thématiques de l'ESCo et selon les différents usages de dispositifs contenant des ETR. Cependant, les travaux concernent principalement des TRL — ou « niveaux de maturité technologique » — très bas.

On observe en effet un biais induit par la constitution du corpus, selon la dimension plus ou moins théorique ou applicative des publications réunies. Cela induit :

- une surreprésentation de publications académiques où l'usage est mentionné mais pas réellement étudié, souvent loin de la réalité du marché. En particulier, la littérature comporte une forte proportion d'études incrémentales ou itératives présentant peu de ruptures conceptuelles. De plus, de nombreux articles issus de la littérature académique mettent en avant de façon excessive et non chiffrée le bénéfice ou le préjudice de la présence d'ETR dans un matériau ou un dispositif d'usage, en fonction de l'angle choisi et des retombées attendues.
- une sur- ou sous-représentation de publications académiques par rapport à l'intensité des usages. Certains usages pourtant significatifs sont sous-représentés dans la littérature (ex: catalyse et polissage) alors que d'autres sont sur-représentés au regard de leur part de marché relativement faible (ex: LED).
- peu de publications évoquent un réel passage du constituant vers le matériau et le dispositif.

Les deux premiers biais sont détaillés ci-dessous.

2.4.1.1.1 Rare-Earth Washing

Dans certains cas, l'utilisation des ETR est systématiquement évoquée avec un vocabulaire positif, innovant et bénéfique pour l'usage. Nous proposons le terme « **Rare-Earth Washing** » pour désigner cette pratique des auteurs : peu importe l'utilisation qui est faite des ETR, celle-ci est toujours bénéfique sans qu'aucune évaluation scientifique, technique, économique ou sociétale ne soit fournie.

Cela peut concerner des usages connus des ETR ou même en proposer de nouveaux dont la pertinence peut sembler discutable (fertilisation des sols, complémentation alimentaire des cheptels bovins et ovins, etc.).

2.4 Mise en perspective et conclusions : réduire les terres rares, un angle mort de la recherche ?

Cette pratique est aussi un moyen de valoriser des ETR peu chers (La, Ce...), produits en excès par rapport à l'utilisation qui peut en être faite sur le marché (« *balance problem* ») et qui d'une certaine façon peuvent être considérés comme des rebuts de l'extraction et du raffinage des ETR à haute valeur ajoutée technologique (Nd, Tb, Eu...).

On remarque que la plupart des publications académiques suspectées comme réalisant du “*Rare-Earth Washing*” proviennent d’auteurs voire de journaux basés dans des pays extracteurs d’ETR.

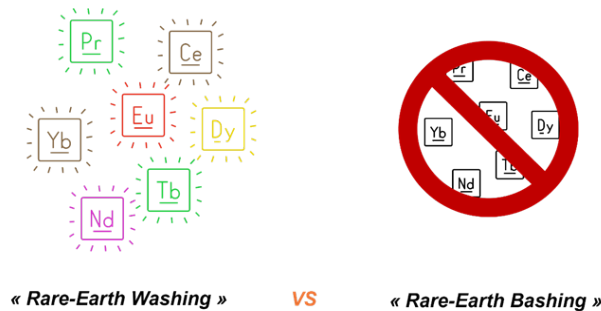


Figure 2.22 Les publications académiques en sciences des matériaux sur les ETR présentent des biais quant à la pertinence de leur usage.

2.4.1.1.2 Rare-Earth Bashing

Certains travaux au contraire posent l’absence d’ETR comme étant systématiquement bénéfique et comme étant un moyen de s’affranchir de contraintes géopolitiques et économiques qui, si elles bien réelles, ne sont pas particulièrement documentés dans ces travaux. Elles y sont déclinés sous forme de poncifs généraux, peu actualisés, et peu adaptés au sujet précis de l’article. Nous proposons le terme de « **Rare-Earth Bashing** » pour qualifier cette littérature : peu importe la qualité de la solution proposée, elle est forcément pertinente car elle ne contient pas d’ETR, sans là encore qu’une évaluation chiffrée du compromis sur la performance ne soit fournie.

Cette pratique est particulièrement mise en avant dans les titres des articles sous la dénomination « *Rare-Earth-free* » et semble être un moyen efficace d’accrocher éditeurs et lecteurs. Toutefois une partie significative de ces articles propose des alternatives sans ETR qui peuvent paraître incongrues, utilisant par exemple des métaux rares (iridium...) ou toxiques (antimoine...) et parfois dans des dispositifs désormais obsolètes (lampes fluo-compactes...). De plus, la dynamique temporelle des usages et des contraintes socio-économiques rajoute à la complexité de l’évaluation. Ainsi un article ancien et pertinent en son temps, peut sembler tomber dans le « *Rare-Earth Bashing* » à la lumière des usages et des contextes économiques, sociologiques et géopolitiques actuels.

L’analyse des articles axés sur les matériaux et dispositifs « *Rare-Earth-free* » est particulièrement complexe et nécessite un regard d’expert, usage par usage, afin de pouvoir discriminer les articles utiles pour ce rapport, de ceux pratiquant le « *Rare-Earth Bashing* ». A l’opposé du « *Rare-Earth Washing* », la littérature associée au « *Rare-Earth Bashing* » est principalement issue des pays importateurs d’ETR.

Malgré ce biais, 77 articles intitulés « *Rare-Earth free* » ont été conservés car jugés suffisamment étayés pour apporter de la pertinence à ce rapport.

Enfin, la terminologie utilisée pour désigner les ETR peut elle-même être signifiante. Le titre des articles peuvent souligner ou atténuer le fait qu’ils portent sur les « Terres Rares », dénomination percutante et accessible au lecteur. Dans le premier cas, on souligne leur présence, que cela soit pour exprimer un

2.4 Mise en perspective et conclusions : réduire les terres rares, un angle mort de la recherche ?

angle *bashing* ou *washing*, via les termes « *Rare-Earth* » ou « *Rare-Earth Elements* ». Dans le second cas au contraire, l'aspect Terres Rares peut être atténué ou rendu moins visible, via les termes « *lanthanides* », « *lanthanoids* » ou « *4f-elements* »...

2.4.1.1.3 Un déséquilibre entre quantité de publications et volumes d'usage

Les usages d'ETR sont extrêmement variés et concernent la plupart des domaines d'activités technologiques. Cependant, ils ne sont pas représentés dans la littérature scientifique proportionnellement à leur part d'utilisation des ETR. Ainsi, des domaines utilisant de forts tonnages sont sous-représentés (catalyse, polissage, verres...) soit car les recherches sont couvertes par la propriété intellectuelle (brevets) ou même le secret industriel; soit parce que l'usage est déjà peu onéreux et performant (polissage) et que les besoins d'optimisation sont marginaux.

À l'inverse, certains domaines semblent sur-représentés (phosphores pour LED, alliages...) probablement car une part de la recherche à bas TRL sur ces thématiques est incrémentale et peu complexe. Certains auteurs prolifiques se contentent alors de faire varier marginalement des compositions chimiques de matériaux et d'en évaluer les effets. Ceci facilite la publication académique de masse et à faible valeur ajoutée scientifique ou technologique. Dans certains domaines, l'activité de recherche fondamentale est dynamique et met très largement en avant un potentiel applicatif tout en semblant décorrélée des enjeux socio-économiques réalistes.

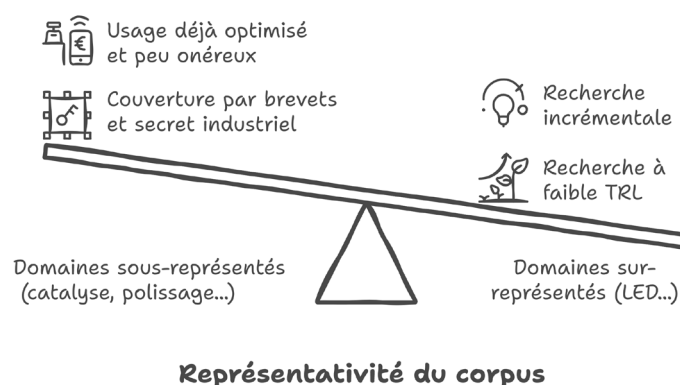


Figure 2.23 Représentativité du corpus identifié par l'ESCo et domaines de recherches

La grande majorité des publications réunies dans le cadre de cette expertise sur les usages des ETR ne compare pas les propriétés des composés/matériaux/dispositifs avec ou sans ETR. Elles ont donc été exclues du corpus (cf. l'annexe méthodologique en fin de rapport, décrivant les critères de constitution du corpus). Sur les près de 3000 publications finalement retenues pour l'Axe 1 en sciences dures, seules 430 s'adressent de près ou de loin aux thématiques de substituabilité, recyclabilité et sobriété de l'usage des ETR.

Ainsi, la substituabilité est globalement peu évoquée dans la littérature en physique, chimie et mécanique. Lorsqu'elle est envisagée, on en distingue deux formes : la substituabilité des ETR par d'autres métaux ou molécules (par exemple les aimants à base de ferrite remplacent les aimants à base d'ETR pour certains usages), et la substituabilité de la technologie utilisée pour l'usage (par exemple l'analyse de l'imagerie IRM se fait grâce à l'intelligence artificielle évitant ainsi l'injection d'agents de contraste à base

d'ETR). Cependant les TRL sont très différents et souvent bas. La sobriété n'est ainsi pas significativement étudiée en sciences des matériaux, sauf dans un cas : quand la réglementation impose la réduction ou la substitution. Ainsi, il est intéressant de noter que cette régulation peut jouer le rôle de moteur à la réduction/substitution de l'usage, comme dans le cadre des agents de contraste à base de gadolinium (cf. 2.1.4.2) où des recommandations émises en 2017 suite à la découverte d'intolérances chez certains patients stimulent une recherche à fort TRL vers une réduction de l'usage de GBCA et la modification de certaines pratiques cliniques.

Par ailleurs, il est important de noter que la quasi-totalité de la littérature prospective raisonne à usages croissants ou constants des différents produits considérés. Aucune hypothèse de réduction, de substitution ou de transformation de certains usages n'est considérée, de même que l'hypothèse de crises géopolitiques, sanitaires ou climatiques pouvant affecter les chaînes d'approvisionnement n'est jamais traduite en scénarios alternatifs. Dans un contexte mondial caractérisé par l'instabilité et l'incertitude, cette incapacité à imaginer des scénarios autrement que dans la continuité incrémentale de l'existant paraît surprenante. En outre, si les chemins de transition et de décarbonation doivent être mis en débat, la littérature propose peu de méthodes opérationnelles pour permettre une analyse comparative.

2.4.1.2 Les manques spécifiques à la littérature analysée en sciences humaines et sociales

Du côté des sciences humaines et sociales, le sujet des terres rares est sous-étudié. Très peu d'articles les mentionnent explicitement, quelles que soient les disciplines étudiées, ce qui nécessite un travail de **transposition** du cas d'autres métaux ou matériaux au cas de l'utilisation responsable des terres rares (cf. Annexe, méthodologie).

Par ailleurs, la recherche en SHS est souvent territorialisée. On note une sous-représentation de la recherche européenne proposant des études de cas portant sur les consommateurs européens, comparativement aux études en provenance des États-Unis et de la Chine. Là encore, un travail de transposition est nécessaire pour le lecteur européen. L'étude bibliométrique de Secinaro et al. estime ainsi par exemple que 93% des 254 articles considérés sur les décisions d'achat de véhicules électriques sont écrits par des chercheurs américains ou chinois.

Troisièmement, certaines données sont manquantes. Il existe en particulier très peu de données disponibles sur les impacts environnementaux liés à l'extraction et à la transformation des terres rares en Chine, ce qui rend les ACV (analyses de cycle de vie) nécessairement incomplètes. Dans le même ordre d'idée, les bénéfices économiques et environnementaux des dispositifs contenant des ETR (par exemple, l'utilisation d'aimants permanents au Néodyme dans les éoliennes) sont généralement analysés au niveau des dispositifs sans singulariser la contribution spécifique des ETR à la performance globale.

Quatrièmement, l'analyse des préférences des consommateurs, levier essentiel pour modéliser l'évolution de la demande en métaux dont les terres rares, manifeste un fort déséquilibre. Il y a une surreprésentation de la littérature sur la décision d'achat de véhicules électriques et une sous-représentation d'études portant sur d'autres préférences de consommation (par exemple, covoiturage, partage de véhicule, autonomie de la batterie, achat de SUV, etc.) qui auraient pourtant un impact fort sur la demande.

Enfin, la littérature juridique (français comme anglo-saxonne) s'est elle aussi encore très peu saisie de la question des terres rares en tant que telle. La réglementation européenne relative aux matières premières critiques dont font parties les ETR est très récente, ce qui implique un nombre encore limité d'analyses juridiques puisque le cadre applicable à ces métaux est en pleine construction. De même, la notion de chaîne de valeur est relativement peu étudiée par la littérature juridique. Le fait que cette dernière se soit relativement peu emparée des questions en lien avec le périmètre de l'expertise — et particulièrement

des questions en lien avec la réduction des usages — témoigne, en fait, de l'invisibilité de ces dernières dans le droit français et européen. Les terres rares ne sont pas appréhendées par le droit français et par le droit européen en tant qu'objet individualisé, ce qui complexifie largement la mise en oeuvre des objectifs européens entérinés par le Règlement sur les matières premières critiques. Pour autant, le droit relatif à l'économie circulaire ainsi qu'aux matières premières critiques est actuellement en pleine évolution du fait de développements politiques et juridiques rapides, ce qui sera probablement source d'un renouvellement tout aussi rapide de l'intérêt de la littérature sur ces questions à court terme.

En conclusion, l'analyse des corpus académiques sur les ETR, qu'ils relèvent des sciences des matériaux ou des sciences humaines et sociales, révèle des déséquilibres structurels et des insuffisances qui limitent leur pertinence pour le chapitre consacré à la « Réduction » de l'utilisation des terres rares de l'ESCo. Ces biais, tant thématiques que géographiques ou méthodologiques, appellent une lecture critique et une approche interdisciplinaire pour en tirer des enseignements robustes. La littérature souffre en effet de plusieurs lacunes majeures : la non-représentation d'usages pourtant très consommateurs d'ETR (polissage, catalyse...) qui relèvent probablement du secret industriel (notamment pour les usages en lien avec la défense) et/ou de la propriété intellectuelle ; son incapacité à considérer les enjeux et les hypothèses de sobriété et de substituabilité - dans une logique de sobriété ; des études incrémentales ou itératives présentant peu de ruptures conceptuelles ; la sous-représentation des études européennes sur les préférences des consommateurs, au profit de travaux américains ou chinois, souvent centrés sur des cas d'usage spécifiques (véhicules électriques) au détriment d'une analyse globale des leviers de sobriété (covoiturage, partage de véhicules, etc.) ; ou encore la sous-représentation des leviers de l'économie circulaire autres que le recyclage, dans la littérature, comme c'est le cas pour la notion d'économie de la fonctionnalité.

2.4.2 Les potentialités d'une approche plus transversale et interdisciplinaire de la sobriété

La littérature analysée manque de vision systémique, intégrée, sur la question de la sobriété, qui pourrait associer des réflexions à l'interface des sciences des matériaux et des sciences humaines et sociales. La sobriété est en effet un thème très peu abordé en tant que tel par la littérature scientifique, et, lorsqu'il l'est directement ou indirectement, c'est généralement de manière disciplinaire. Une approche pluri ou interdisciplinaire pourrait pourtant apporter un éclairage déterminant sur cette notion de sobriété et ses différentes acceptions. En particulier, il n'existe pas de littérature questionnant le « juste » besoin technologique au regard des usages dans un souci de réduction de la consommation d'ETR. Par exemple, la question suivante pourrait se poser : quel(s) aimant(s) devraient être utilisés pour quel(s) usage(s) ? De nombreux usages nécessitent de petits aimants (dans l'électronique par exemple). Leur substitution par des aimants sans ETR entraînerait une augmentation de la taille et/ou du poids des dispositifs, ce qui ne correspond pas aux dynamiques de marché ni aux pratiques de consommation actuelles (par ex. écouteurs intra-auriculaires), ces dernières n'étant pas indépendantes de la structuration des marchés par les acteurs économiques. En revanche, si l'on considère le cas des véhicules électriques, le besoin d'un aimant avec ETR (NdFeB) peut se questionner alors que des performances équivalentes peuvent être atteintes avec des aimants SrFeO ou AlNiCoFe plus volumineux. En considérant un aimant NdFeB de 1 kg, ce qui est commun pour les moteurs de véhicules électriques, il faudrait par exemple 3,7 kg d'aimant SrFeO pour atteindre les mêmes performances. À l'échelle d'un véhicule électrique, ce surpoids apparaît limité au regard du poids du véhicule et une telle substitution permettrait de réduire significativement le besoin en ETR pour la mobilité électrique. Ainsi, certains modèles de voitures électriques ne contiennent pas d'aimants à base d'ETR (par exemple la Renault ZOE, les nouveaux modèles Tesla...).

2.4 Mise en perspective et conclusions : réduire les terres rares, un angle mort de la recherche ?

D'après la littérature, aucun obstacle technique majeur ne s'oppose aujourd'hui à la suppression complète des aimants à terres rares dans les machines de traction automobile. De même, une réflexion sur une hiérarchisation des usages pourrait être envisagée en intégrant des critères physiques, économiques et sociaux et en s'appuyant sur la construction d'indicateurs dédiés. La perspective choisie dans cette ESCo, qui consiste à mener la réflexion sur les ETR à partir des possibilités de réduction en partant des usages, amène ainsi à une question plus générale, qui dépasse le cadre de cette expertise : quels usages prioritaires et quels choix de société associés ? Ces considérations ne sont pas encore étudiées dans la littérature et dépassent le simple cadre de la recherche pour s'inscrire plutôt dans un débat démocratique. Le droit, par ailleurs, pourrait jouer un rôle déterminant concernant la place devant être accordée à la sobriété dans la société et agir comme un levier pour le développement d'une vision plus unifiée et transversale de la notion, qui ne peut être effective que si elle touche l'ensemble des secteurs et des disciplines scientifiques.

RÉDUCTION DES ETR DANS LE SECTEUR DE LA MOBILITÉ : ÉCO-CONCEPTION ET SOBRIÉTÉ DES USAGES

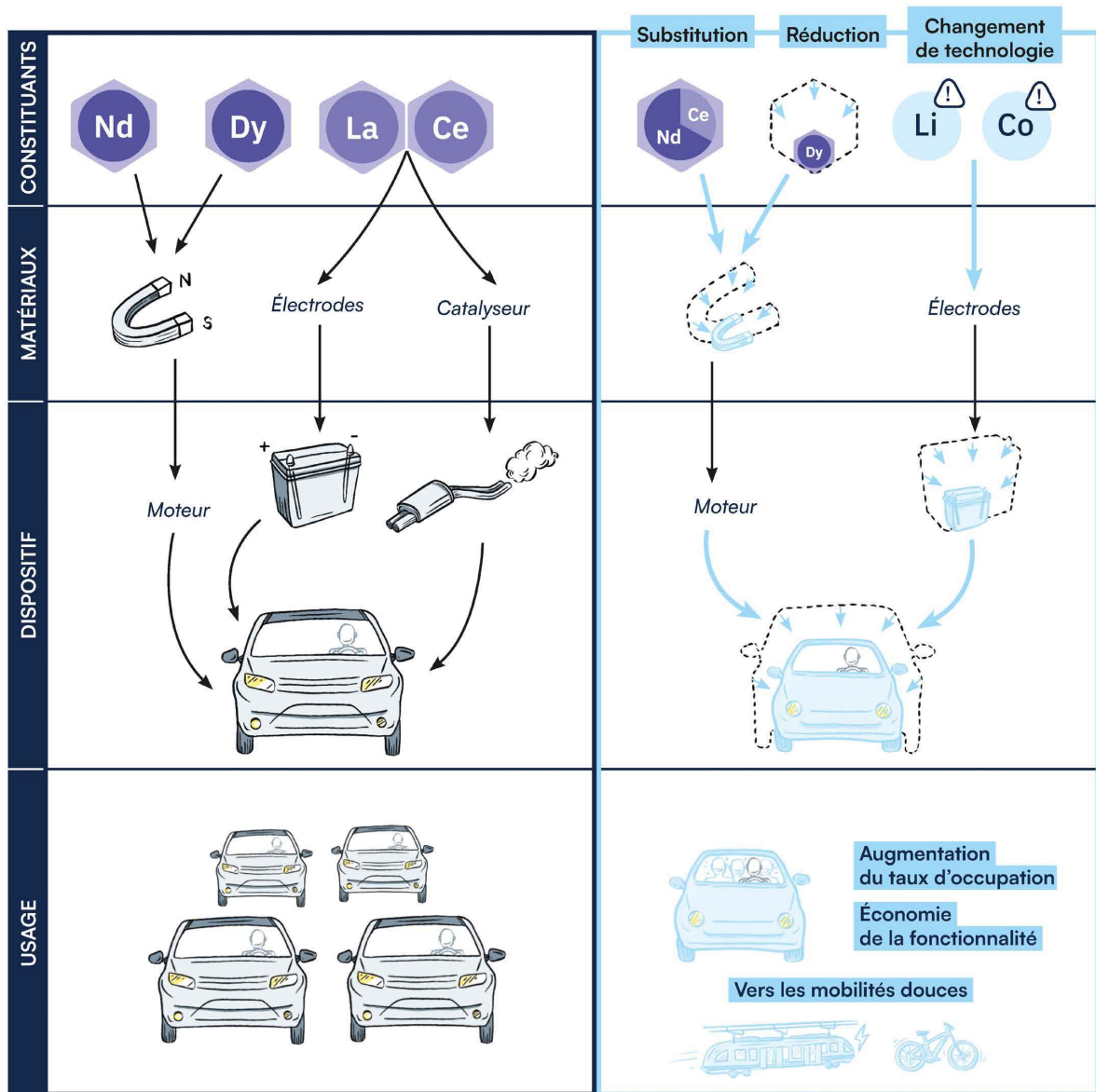


Figure 2.24 Conclusion du chapitre II « Réduire » à travers un focus sur le secteur de la mobilité. Les leviers sont en bleu clair.

2.5 Liste des références du chapitre 2

- Adachi, S. (2019). Review-Mn⁴⁺ -activated red and deep red-emitting phosphors. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 9(1), 1-35. (rayyan-13567882). <https://doi.org/10.1149/2.0022001jss>
- Adisorn, T., Tholen, L., & Gotz, T. (2021). Towards a digital product passport fit for contributing to a circular economy. *Energies*, 14(8), 1-16. (rayyan-16055751). <https://doi.org/10.3390/en14082289>
- Ahmad, F., Treanor, L., McGrath, T. A., Walker, D., McInnes, M. D. F., & Schieda, N. (2021). Safety of off-label use of ferumoxytol as a contrast agent for MRI : A systematic review and meta-analysis of adverse events. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 53(3), 840-858. (rayyan-13567230). <https://doi.org/10.1002/jmri.27405>
- Alamerew, Y. A., & Brissaud, D. (2020). Modelling reverse supply chain through system dynamics for realizing the transition towards the circular economy : A case study on electric vehicle batteries. *Journal of Cleaner Production*, 254. (rayyan-1251264666). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120025>
- Al-ani, M., Walker, A., Vakil, G., Gerada, D., Gerada, C., & Paciura, K. (2023). Modifications to PM-assisted synchronous reluctance machine to achieve rare-earth free heavy-duty traction. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 11(2), 2029-2038. (rayyan-13565826). <https://doi.org/10.1109/jestpe.2022.3203184>
- Ali, S. H., Giurco, D., Arndt, N., Nickless, E., Brown, G., Demetriades, A., Durrheim, R., Enriquez, M. A., Kinnaird, J., Littleboy, A., Meinert, L. D., Oberhänsli, R., Salem, J., Schodde, R., Schneider, G., Vidal, O., & Yakovleva, N. (2017). Mineral supply for sustainable development requires resource governance. *Nature*, 543(7645), 367-372. <https://doi.org/10.1038/nature21359>
- Ali, S. H., Kalantzakos, S., Eggert, R., Gauss, R., Karayannopoulos, C., Klinger, J., Pu, X., Vekasi, K., & Perrons, R. K. (2022). Closing the infrastructure gap for decarbonization : The case for an integrated mineral supply agreement. *Environmental Science & Technology*, 56(22), 15280-15289. (rayyan-8827843). <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05413>

- Allwood, J. M., Ashby, M. F., Gutowski, T. G., & Worrell, E. (2011). Material efficiency : A white paper. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(3), 362-381. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.11.002>
- Almanza, M., LoBue, M., & Lebouc, A. (2023). Réfrigération magnétique : Des principes fondamentaux aux applications. *Conversion De L'énergie Électrique*. <https://doi.org/10.51257/a-v2-re28>
- Alonso, E., Sherman, A. M., Wallington, T. J., Everson, M. P., Field, F. R., Roth, R., & Kirchain, R. E. (2012). Evaluating rare earth element availability : A case with revolutionary demand from clean technologies. *Environmental Science & Technology*, 46(6), 3406-3414. <https://doi.org/10.1021/es203518d>
- Al-Qarni, A., & El-Refaie, A. (2023). *Design and optimization of high-performance rare-earth free interior permanent magnet motors for electric vehicles enabled by iron nitride magnets*. 4082-4089. (rayyan-13565579). <https://doi.org/10.1109/ecce53617.2023.10362115>
- Amyar, A., Nakamori, S., Morales, M., Yoon, S., Rodriguez, J., Kim, J., Judd, R. M., Weinsaft, J. W., Nezafat, R., Greenspan, H., Madabhushi, A., Mousavi, P., Salcudean, S., Duncan, J., Syeda-Mahmood, T., & Taylor, R. (2023). Gadolinium-free cardiac MRI myocardial scar detection by 4D convolution factorization. *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention, Miccai 2023, Pt II*, 14221, 639-648. (rayyan-13565671). https://doi.org/10.1007/978-3-031-43895-0_60
- Andre, H., Maria Ljunggren Soderman, & Nordelof, A. (2019). Resource and environmental impacts of using second-hand laptop computers : A case study of commercial reuse. *Waste Management*, 88, 268-279. (rayyan-8828649). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.050>
- Anil, S., Indraj, S., Singh, R., Appari, S., & Roy, B. (2022). A review on ethanol steam reforming for hydrogen production over Ni/Al₂O₃ and Ni/CeO₂ based catalyst powders. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(13), 8177-8213. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.183>
- Arboleda, M. (2020). *Territories of Extraction under Late Capitalism*.
- Aridi, R., Aridi, M., Pannier, M.-L., & Lemenand, T. (2025). Eco-environmental, and social impacts of producing electricity with various renewable energy sources. *Energy*, 320, 135139. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135139>

- Baars, J., Cerdas, F., & Heidrich, O. (2023). An integrated model to conduct multi-criteria technology assessments : The case of electric vehicle batteries. *Environmental Science & Technology*, 57(12), 5056-5067-5067. (rayyan-9601093). <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c04080>
- Badewa, O. A., Mohammadi, A., Lewis, D. D., Ionel, D. M., Essakiappan, S., Manjrekar, M., & IEEE. (2023). Optimization of an electric vehicle traction motor with a PM flux intensifying stator and a reluctance outer rotor. *2023 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo, Itec*, 1-6. (rayyan-13565847). <https://doi.org/10.1109/itec55900.2023.10186958>
- Bailey, G., Joyce, P. J., Schrijvers, D., Schulze, R., Sylvestre, A. M., Sprecher, B., Vahidi, E., Dewulf, W., & Van Acker, K. (2020). Review and new life cycle assessment for rare earth production from bastnäsite, ion adsorption clays and lateritic monazite. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104675. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104675>
- Bailey, G., Mancheri, N., & Karel Van Acker. (2017). Sustainability of permanent rare earth magnet motors in (H)EV industry. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3(3), 611-626-626. (rayyan-9598169). <https://doi.org/10.1007/s40831-017-0118-4>
- Bailey, G., Orefice, M., Sprecher, B., Onal, M. A. R., Herraiz, E., Dewulf, W., & Acker, K. V. (2021). Life cycle inventory of samarium-cobalt permanent magnets, compared to neodymium-iron-boron as used in electric vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 1-29. (rayyan-10656699). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125294>
- Balaram, V. (2019). Rare earth elements : A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 1-19. (rayyan-726051423). <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>
- Balaram, V. (2025). Rare earth elements, resources, applications, extraction technologies, chemical characterization, and global trade — a comprehensive review. In *Treatise on geochemistry* (p. 193-233). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99762-1.00041-3>
- Balavoine, C. (2024). Les minerais rares : Indépendance ou entrée en guerre froide ? : *La Pensée*, N° 417(1), 30-38. <https://doi.org/10.3917/lp.417.0030>

- Baldassarre, B. (2025). Circular economy for resource security in the European union (EU) : Case study, research framework, and future directions. *Ecological Economics*, 227, 108345. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108345>
- Bao, Y., Sherwood, J. A., & Sun, Z. (2018). Magnetic iron oxide nanoparticles as T 1 contrast agents for magnetic resonance imaging. *Journal of Materials Chemistry C*, 6(6), 1280-1290. (rayyan-13568899). <https://doi.org/10.1039/c7tc05854c>
- Barandiaran, J. M., Martin-Cid, A., Schönhöbel, A. M., Garitaonandia, J. S., Gjoka, M., Niarchos, D., Makridis, S., Pasko, A., Aubert, A., Mazaleyrat, F., & Hadjipanayis, G. (2019). Nitrogenation and sintering of (Nd-Zr)Fe₁₀Si₂ tetragonal compounds for permanent magnets applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 784, 996-1002. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.044>
- Basu, I., & Al-Samman, T. (2014). Triggering rare earth texture modification in magnesium alloys by addition of zinc and zirconium. *Acta Materialia*, 67, 116-133. (rayyan-13570883). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.12.015>
- Baudouin, V. (2024). Sobres perspectives—La sobriété à l'assaut du droit. *VertigO - La Revue Électronique En Sciences De L'environnement*, (Hors-Série 38), Article Hors-Série 38. <https://doi.org/10.4000/12eqw>
- Bauer, T. (2018). *Concevoir un produit pour plusieurs vies : Propositions pour la conception et l'évaluation environnementales de solutions en cascade* [Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes]. (rayyan-1251265521). <https://theses.hal.science/tel-01988566v1>
- Beccali, M., Bonomolo, M., Leccese, F., Lista, D., & Salvadori, G. (2018). On the impact of safety requirements, energy prices and investment costs in street lighting refurbishment design. *Energy*, 165, 739-759. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.011>
- Beckers, A. (2024). Global value chains in EU law. *Yearbook of European Law*, 42, 322-346. <https://doi.org/10.1093/yel/yead010>
- Benke, D., Fries, M., Specht, M., Wortmann, J., Pabst, M., Gottschall, T., Radulov, I., Skokov, K., Bevan, A. I., Prosperi, D., Oana Tudor, C., Afiuny, P., Zakotnik, M., & Gutfleisch, O. (2020). Magnetic refrigeration with recycled permanent magnets and free rare-earth magnetocaloric La-Fe-Si. *Energy Technology*, 8(7). (rayyan-13567728). <https://doi.org/10.1002/ente.201901025>

- Berger, K., Schoegg, J.-P., & Baumgartner, R. J. (2022). Digital battery passports to enable circular and sustainable value chains : Conceptualization and use cases. *Journal of Cleaner Production*, 353, 1-15. (rayyan-1279580782). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131492>
- Bhageerath Reddy, P., El-Refaie, A. M., Galioto, S., & Alexander, J. P. (2017). Design of synchronous reluctance motor utilizing dual-phase material for traction applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(3), 1948-1957. (rayyan-13569383). <https://doi.org/10.1109/tia.2017.2661719>
- Bharathi, M., Akuru, U. B., & Kiran Kumar, M. (2022). Comparative design and performance analysis of 10 kW rare-earth and non-rare earth flux reversal wind generators. *Energies*, 15(2), 1-17. (rayyan-13566250). <https://doi.org/10.3390/en15020636>
- Bhargava, R., Kumar, P., Sharma, S. K., Sharma, S., Mehra, N., & Mishra, A. (2013). Peeling and aspiration of elschin pearls! An effective alternative to Nd:YAG laser capsulotomy! *Indian Journal of Ophthalmology*, 61(9), 518-520. (rayyan-13570988). <https://doi.org/10.4103/0301-4738.119449>
- Bhatnagar, A., Härr, A., Levänen, J., & Niinimäki, K. (2024). Exploring the role of social life cycle assessment in transition to circular economy : A systematic review. *Resources, Conservation and Recycling*, 207, 107702. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107702>
- Bhattacharjee, H., Bhattacharjee, K., Bhattacharjee, P., Das, D., Gogoi, K., & Arati, D. (2014). Liquefied after cataract and its surgical treatment. *Indian Journal of Ophthalmology*, 62(5), 580-584. (rayyan-13570775). <https://doi.org/10.4103/0301-4738.129771>
- Bianchi, A., Oliviero L Gobbo, Dufort, S., Sancey, L., Lux, F., Tillement, O., Coll, J.-L., & Crémillieux, Y. (2017). Orotracheal manganese-enhanced MRI (MEMRI) : An effective approach for lung tumor detection. *NMR in Biomedicine*, 30(11), 1-10. (rayyan-13569549). <https://doi.org/10.1002/nbm.3790>
- Bin Sulaiman, E., Kosaka, T., & Matsui, N. (2012). Design study and experimental analysis of wound field flux switching motor for HEV applications. 1269-1275. (rayyan-13571129). <https://doi.org/10.1109/icelmach.2012.6350039>

- Bing, W., & Tu, Y. (2019). The management model construction about green supply chain of chinese rare earth industry based on big data. *Proceedings of Eighteenth Wuhan International Conference on E-Business*, 616-623. (rayyan-16055752).
- Binnemans, K., Jones, P. T., Mueller, T., & Yurramendi, L. (2018). Rare earths and the balance problem : How to deal with changing markets? *Journal of Sustainable Metallurgy*, 126-146. (rayyan-726050681). <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0162-8>
- Blake., L., & Malcolm, R. (2000). Risk assessment and environmental litigation. *Interdisciplinary Environmental Review Anthology*.
- Blanc, W., Vermillac, M., Petit, L., Lukowiak, A., Lu, Z., Mady, F., Benabdesselam, M., Chaussedent, S., Mehdi, A., & Ferrari, M. (2019). *Nanoparticles in optical waveguides : A toolbox to promote lasers, amplifiers and sensors*. 2019. (rayyan-13568257). <https://doi.org/10.1109/icton.2019.8840208>
- Boba, M., Butcher, C., Panahi, N., Worswick, M. J., Mishra, R. K., & Carter, J. T. (2017). Warm forming limits of rare earth-magnesium alloy ZEK100 sheet. *International Journal of Material Forming*, 10(2), 181-191. (rayyan-13569696). <https://doi.org/10.1007/s12289-015-1267-2>
- Bode, G., Baranski, M., & Muller, D. (2018). *Experimental application of second-life batteries in non-residential buildings*. (rayyan-8828735). ECOS 2018 - Proceedings of the 31st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems.
- Boehm-Sturm, P., Haeckel, A., Hauptmann, R., Mueller, S., Kuhl, C. K., & Schellenberger, E. A. (2018). Low-molecular-weight iron chelates may be an alternative to gadolinium-based contrast agents for T1-weighted contrast-enhanced MR imaging. *Radiology*, 286(2), 537-546. (rayyan-13568896). <https://doi.org/10.1148/radiol.2017170116>
- Bohnsack, R., Robert Van Den Hoed, & Hugo Oude Reimer. (2015). Deriving vehicle-to-grid business models from consumer preferences. *World Electric Vehicle Journal*, 7(4), 621-630. (rayyan-8829022). <https://doi.org/10.3390/wevj7040621>
- Bonner, B. P., Yurista, S. R., Coll-Font, J., Chen, S., Eder, R. A., Foster, A. N., Nguyen, K. D., Caravan, P., Gale, E. M., & Nguyen, C. (2023). Contrast-enhanced cardiac magnetic resonance imaging with a manganese-based alternative to gadolinium for tissue characterization of acute myocardial

- infarction. *Journal of the American Heart Association*, 12(8), 1-10. (rayyan-13565572).
<https://doi.org/10.1161/jaha.122.026923>
- Bonnet, C. S., & Tóth, É. (2024). Chapter 343—Lanthanide-based responsive MRI contrast agents. In J.-C. G. Bünzli & S. M. Kauzlarich (Éds.), *Handbook on the physics and chemistry of rare earths* (Vol. 66, p. 1-49). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.hpcr.2024.06.002>
- Bonou, A., Skelton, K., & Olsen, S. I. (2016). Ecodesign framework for developing wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, 126, 643-653. (rayyan-8828970).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.093>
- Bortolozzi, J. P., Gutierrez, L. B., & Ulla, M. A. (2014). Efficient structured catalysts for ethylene production through the ODE reaction : Ni and Ni-Ce on ceramic foams. *Catalysis Communications*, 43, 197-201. (rayyan-13570695). <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2013.10.011>
- Boschheidgen, M., Schimmoeller, L., Kasproski, L., Abrar, D., Arsov, C., Albers, P., Antoch, G., Wittsack, H. J., & Ullrich, T. (2021). Arterial spin labelling as a gadolinium-free alternative in the detection of prostate cancer. *Magnetic Resonance Imaging*, 80, 33-38. (rayyan-13566791).
<https://doi.org/10.1016/j.mri.2021.04.010>
- Bottrill, M., Kwok, L., & Long, N. J. (2006). Lanthanides in magnetic resonance imaging. *Chemical Society Reviews*, 35(6), 557-571. (rayyan-13571685). <https://doi.org/10.1039/b516376p>
- Bradford, A. (2020). *The Brussels effect: How the European union rules the world* (1^{re} éd.). Oxford University PressNew York. <https://doi.org/10.1093/oso/9780190088583.001.0001>
- Brody, R., Ohodnicki, P., Ghosh, M. K., & Grainger, B. (2023). *Improving constant power flux weakening in MnBi interior permanent magnet traction motors*. 3916-3923. (rayyan-13565685).
<https://doi.org/10.1109/ecce53617.2023.10362305>
- Brody, R., Ohodnicki, P., Ghosh, M., Macias, C., Sherman, A., Talaat, A., Cui, J., & Grainger, B. (2024). Trade study for rare-earth-free interior permanent magnet synchronous machine using MnBi permanent magnets. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1-14. (rayyan-13565460).
<https://doi.org/10.1109/tia.2024.3379487>

- Brown, D. N., Wu, Z., He, F., Miller, D. J., & Herchenroeder, J. W. (2014). Dysprosium-free melt-spun permanent magnets. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 26(6), 1-9. (rayyan-13570683). <https://doi.org/10.1088/0953-8984/26/6/064202>
- Brown, M., & Eggert, R. (2018). Simulating producer responses to selected chinese rare earth policies. *Resources Policy*, 55, 31-48. (rayyan-1279580266). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.10.013>
- Brussa, G., Grosso, M., & Rigamonti, L. (2023). Life cycle assessment of a floating offshore wind farm in Italy. *Sustainable Production and Consumption*, 39, 134-144. (rayyan-8827754). <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.05.006>
- Bundgaard, A. M., Huulgaard, R. D., & Remmen, A. (2024). Getting the priorities right in material efficiency : From the ecodesign directive to the ecodesign for sustainable products regulation. *2024 Electronics Goes Green 2024+ (EGG)*, 1-7. <https://doi.org/10.23919/EGG62010.2024.10631182>
- Bünzli, J.-C. G. (2009). Lanthanide luminescent bioprobes (LLBs). *Chemistry Letters*, 38(2), 104-109. <https://doi.org/10.1246/cl.2009.104>
- Bünzli, J.-C. G. (2010). Lanthanide luminescence for biomedical analyses and imaging. *Chemical Reviews*, 110(5), 2729-2755. <https://doi.org/10.1021/cr900362e>
- Bünzli, J.-C. G. (2022). Applications of rare earths. In S. T. Liddle, D. P. Mills, & L. S. Natrajan, *The lanthanides and actinides* (p. 633-685). WORLD SCIENTIFIC (EUROPE). https://doi.org/10.1142/9781800610163_0017
- Cai, Y., Wang, Y., Xu, H., Cao, C., Zhu, R., Tang, X., Zhang, T., & Pan, Y. (2019). Positive magnetic resonance angiography using ultrafine ferritin-based iron oxide nanoparticles. *Nanoscale*, 11(6), 2644-2654. (rayyan-13568365). <https://doi.org/10.1039/c8nr06812g>
- Cai, Z., Jiang, L., Cao, Y., Fu, S., Wang, S., Jiang, Y., Gu, H., Li, N., Fu, X., Tang, S., Zhu, J., Cao, W., Zhong, L., Cheng, Z., Xia, C., Lui, S., Song, B., Gong, Q., & Ai, H. (2024). Lipophilic group-modified manganese(II)-based contrast agents for vascular and hepatobiliary magnetic resonance imaging. *Journal of Medicinal Chemistry*, 67(6), 5011-5031. (rayyan-13565309). <https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.4c00120>

- Cao, W., Huang, F., Wang, T., Ye, R., Lei, R., Tian, Y., Zhang, J., & Xu, S. (2018). 2.0 μm emission of Ho^{3+} doped germanosilicate glass sensitized by non-rare-earth ion Bi : A new choice for 2.0 μm laser. *Optical Materials*, 75, 695-698. (rayyan-13568541). <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.11.033>
- Carraro, E., Degano, M., Morandin, M., & Bianchi, N. (2014). *PM synchronous machine comparison for light electric vehicles*. (rayyan-13570797). 2014 IEEE International Electric Vehicle Conference, IEVC 2014. <https://doi.org/10.1109/ievc.2014.7056200>
- Carreño, I. (2023). To address “greenwashing” and misleading environmental claims, the European commission publishes a proposal on “green claims” and their substantiation. *European Journal of Risk Regulation*, 14(3), 607-611. Cambridge Core. <https://doi.org/10.1017/err.2023.36>
- Caruana, G., Auger, C., Pessini, L. M., Calderon, W., A. De Barros, Salerno, A., Sastre-Garriga, J., Montalban, X., & Rovira, A. (2022). SWI as an alternative to contrast-enhanced imaging to detect acute MS lesions. *American Journal of Neuroradiology*, 1-7. (rayyan-13566646). <https://doi.org/10.3174/ajnr.a7474>
- Castello, P., Stott, F. H., & F Gesmundo. (1999). Yttrium-promoted selective oxidation of aluminium in the oxidation at 1100°C of an eutectic Ni—Al—Cr₃C₂ alloy. *Corrosion Science*, 41(5), 901-918. (rayyan-13572054). [https://doi.org/10.1016/s0010-938x\(98\)00162-0](https://doi.org/10.1016/s0010-938x(98)00162-0)
- Castle, E., Sheridan, R., Zhou, W., Grasso, S., Walton, A., & Reece, M. J. (2017). High coercivity, anisotropic, heavy rare earth-free Nd-Fe-B by flash spark plasma sintering. *Scientific Reports*, 7, 1-12. (rayyan-13569419). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11660-9>
- Cavoski, A., Ahuja, J., Harper, G., & Peck, D. (2023). Securing technology critical materials for Britain—The legal and regulatory conundrum. *Environmental Law Review*, 25(4), 311-325. (rayyan-1279579670). <https://doi.org/10.1177/14614529231211746>
- Cesaria, M. & Baldassare Di Bartolo. (2019). Nanophosphors-based white light sources. *Nanomaterials*, 9(7), 1-28. (rayyan-13568258). <https://doi.org/10.3390/nano9071048>
- Cesaria, M., Baldassare Di Bartolo, DiBartolo, B., Silvestri, L., Cesaria, M., & Collins, J. (2018). Nanophosphors : From rare earth activated multicolor-tuning to new efficient white light sources.

- Quantum Nano-Photonics*, 26-77. (rayyan-13568987). https://doi.org/10.1007/978-94-024-1544-5_3
- Cézard, F., & Mourad, M. (2019). *Panorama sur la notion de sobriété — définitions, mises en oeuvre, enjeux (rapport final)* (p. 52). ADEME.
- Chang, E. (2021). *High-speed hybrid reluctance motor with anisotropic materials* (Rapport de Projet N° ELT093). General Motors. https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-06/elt093_chang_2021_o_5-27_1047pm_LR_TM.pdf
- Chattopadhyay, R., Islam, M. S., Boldea, I., Husain, I., & IEEE. (2021). FEA characterization of Bi-axial excitation machine for automotive traction applications. *2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 1-7. (rayyan-13566940). <https://doi.org/10.1109/iemdc47953.2021.9449514>
- Chazot, A., Barrat, J.-A., Gaha, M., Jomaah, R., Ognard, J., & Ben Salem, D. (2020). Brain MRIs make up the bulk of the gadolinium footprint in medical imaging. *Journal of Neuroradiology*, 47(4), 259-265. <https://doi.org/10.1016/j.neurad.2020.03.004>
- Chen, B., Gong, Y., Zhang, Z., Zhang, T., Pan, S., Guo, Y., & Xu, F. (2024). Enhanced magnetostriction of (001) oriented Fe 81 Ga 19 by non-rare-earth element doping. *Scripta Materialia*, 246, 1-6. (rayyan-13565178). <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2024.116084>
- Chen, B., Li, D., & Wang, F. (2020). InP quantum dots : Synthesis and lighting applications. *Small*, 16(32), 2002454. <https://doi.org/10.1002/sml.202002454>
- Chen, R. (2023). China's circular economy policies : Review and reflection. *Circular Press*, (4), 25.
- Chen, W., Huang, Y. L., Luo, J. M., Hou, Y. H., Ge, X. J., Guan, Y. W., Liu, Z. W., Zhong, Z. C., & Wang, G. P. (2019). Microstructure and improved properties of sintered Nd-Fe-B magnets by grain boundary diffusion of non-rare earth. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 476, 134-141. (rayyan-13568231). <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.12.048>
- Chen, Y., Cai, T., Zhu, X., Fan, D., & Wang, Q. (2020). Analysis and design of a new type of less-rare-earth hybrid-magnet motor with different rotor topologies. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 30(4), 1-6. (rayyan-13567374). <https://doi.org/10.1109/tasc.2020.2965879>

- Chen, Y., Ding, Y., Li, X., & Zhu, X. (2018). Design and analysis of less-rare-earth double-stator modulated machine considering multioperation conditions. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28(3), 1-5. (rayyan-13568675). <https://doi.org/10.1109/tasc.2017.2786689>
- Cheng, W., Ganesh, T., Martinez, F., Lam, J., Yoon, H., Macgregor, Jr. R. B., Scholl, T. J., Hai-Ling Margaret Cheng, & Zhang, X. (2014). Binding of a dimeric manganese porphyrin to serum albumin : Towards a gadolinium-free blood-pool T 1 MRI contrast agent. *Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 19(2), 229-235. (rayyan-13570662). <https://doi.org/10.1007/s00775-013-1073-6>
- Chiba, A., Kiyota, K., Hoshi, N., Takemoto, M., & Ogasawara, S. (2015). Development of a rare-earth-free SR motor with high torque density for hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(1), 175-182. (rayyan-13570198). <https://doi.org/10.1109/tec.2014.2343962>
- Chino, S., Ogasawara, S., Miura, T., Chiba, A., Takemoto, M., & Hoshi, N. (2011). *Fundamental characteristics of a ferrite permanent magnet axial gap motor with segmented rotor structure for the hybrid electric vehicle.* 2805-2811. (rayyan-13571244). <https://doi.org/10.1109/ecce.2011.6064146>
- Cho, J., Park, J. H., Kim, J. K., & Schubert, E. F. (2017). White light-emitting diodes : History, progress, and future. *Laser & Photonics Reviews*, 11(2), 1600147. <https://doi.org/10.1002/lpor.201600147>
- Christmann, P. (2021). Mineral resource governance in the 21st century and a sustainable european union. *Mineral Economics*, 34(2), 187-208. (rayyan-1279579937). <https://doi.org/10.1007/s13563-021-00265-4>
- Christmann, P., & Lefebvre, G. (2022). Trends in global mineral and metal criticality : The need for technological foresight. *Mineral Economics*, 35(3), 641-652. (rayyan-8827997). <https://doi.org/10.1007/s13563-022-00323-5>
- Cimprich, A., Bach, V., Helbig, C., Thorenz, A., Schrijvers, D., Sonnemann, G., Young, S. B., Sonderegger, T., & Berger, M. (2019). Raw material criticality assessment as a complement to environmental life cycle assessment : Examining methods for product-level supply risk assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 23(5), 1226-1236-1236. (rayyan-9601087). <https://doi.org/10.1111/jiec.12865>

- Cimprich, A., Karim, K. S., & Young, S. B. (2018). Extending the geopolitical supply risk method : Material « substitutability » indicators applied to electric vehicles and dental X-ray equipment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(10), 2024-2042-2042. (rayyan-9601118). <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1418-4>
- Cisternas, L. A., Ordonez, J. I., Jeldres, R. I., & Serna-Guerrero, R. (2022). Toward the implementation of circular economy strategies : An overview of the current situation in mineral processing. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 43(6), 775-797. (rayyan-1279579855). <https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1946690>
- Coey, J. M. D. (2012). Permanent magnets : Plugging the gap. *Scripta Materialia*, 67(6), 524-529. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.04.036>
- Coey, J. M. D., & Parkin, S. S. P. (Éds.). (2021). *Handbook of magnetism and magnetic materials*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-63210-6>
- Coey, J. M. D., & Sun, H. (1990). Improved magnetic properties by treatment of iron-based rare earth intermetallic compounds in ammonia. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 87(3), L251-L254. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(90\)90756-G](https://doi.org/10.1016/0304-8853(90)90756-G)
- Dahdah, E., J. Abou Rached, Aouad, S., Gennequin, C., Tidahy, H. L., Estephane, J., Aboukais, A., & E. Abi Aad. (2017). CO2 reforming of methane over nix Mg_{6-x} Al₂ catalysts : Effect of lanthanum doping on catalytic activity and stability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(17), 12808-12817. (rayyan-13569284). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.197>
- Dai, J.-W., Zhang, X.-B., Fei, Y., Wang, Z.-Z., & Sui, H.-M. (2018). Effect of solution treatment on microstructure and corrosion properties of Mg-4Gd-1Y-1Zn-0.5Ca-1Zr alloy. *Acta Metallurgica Sinica- English Letters*, 31(8), 865-872. (rayyan-13568695). <https://doi.org/10.1007/s40195-018-0709-5>
- Daniel Belchi Lorente. (2016). *Proposition d'un modèle produit agile pour l'écoconception : Application aux batteries Li-ion*. Université Grenoble Alpes. (rayyan-9601128).
- Dargusch, M. S., Balasubramani, N., Yang, N., Johnston, S., Ali, Y., Wang, G., Venezuela, J., Carluccio, J., Lau, C., Allavena, R., Liang, D., Mardon, K., & Ye, Q. (2022). In vivo performance of a rare earth free Mg-Zn-Ca alloy manufactured using twin roll casting for potential applications in the

- cranial and maxillofacial fixation devices. *Bioactive Materials*, 12, 85-96. (rayyan-13566506).
<https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.10.026>
- Davis, K. A., & Lazar, B. (2021). Manganese-based contrast agents as a replacement for gadolinium. *Radiologic Technology*, 93(1), 36-45. (rayyan-13572429).
- De Decker, V. (2023). *The CRM act in a global perspective*. Egmont paper 121.
- de Almeida, A. T., Fong, J., Falkner, H., & Bertoldi, P. (2017). Policy options to promote energy efficient electric motors and drives in the EU. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 1275-1286.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.112>
- de Koning, A., Kleijn, R., Huppel, G., Sprecher, B., van Engelen, G., & Tukker, A. (2018). Metal supply constraints for a low-carbon economy? *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 202-208.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.040>
- Deng, J., Tian, J., Zhou, Y., Chang, Y., Liang, W., & Ma, J. (2022). Plastic deformation and fracture mechanisms of rolled Mg-8Gd-4Y-Zn and AZ31 magnesium alloys. *Materials & Design*, 223, 1-20. (rayyan-13566610). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111179>
- Dijk, M., Wells, P., & Kemp, R. (2016). Will the momentum of the electric car last ? Testing an hypothesis on disruptive innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 105, 77-88. (rayyan-8829010). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.01.013>
- Dirba, I., Schwöbel, C. A., Diop, L. V. B., Duerrschabel, M., Molina-Luna, L., Hofmann, K., Komissinskiy, P., Kleebe, H.-J., & Gutfleisch, O. (2017). Synthesis, morphology, thermal stability and magnetic properties of α'' -Fe₁₆N₂ nanoparticles obtained by hydrogen reduction of γ -Fe₂O₃ and subsequent nitrogenation. *Acta Materialia*, 123, 214-222.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.10.061>
- Domenech, T., & Bahn-Walkowiak, B. (2019). Transition Towards a Resource Efficient Circular Economy in Europe : Policy Lessons From the EU and the Member States. *Ecological Economics, Resource Efficiency: Concepts, Challenges, Scenarios and Policy Options*, 155, 7-19.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.11.001>
- Du, Z., Yan, C., Zhao, H., Zhang, Y., Yang, C., Yi, S., Lu, Y., & Swierczek, K. (2017). Effective Ca-doping in Y_{1-x}Ca_xBaCo₂O_{5+ δ} cathode materials for intermediate temperature solid oxide fuel cells.

- Journal of Materials Chemistry A*, 5(48), 25641-25651. (rayyan-13569395).
<https://doi.org/10.1039/c7ta08954f>
- Duan, C., Zhu, Y., Jang, J., Rodriguez, J., Neisius, U., Fahmy, A. S., & Nezafat, R. (2019). Non-contrast myocardial infarct scar assessment using a hybrid native T1 and magnetization transfer imaging sequence at 1.5T. *Magnetic Resonance in Medicine*, 81(5), 3192-3201. (rayyan-13568268).
<https://doi.org/10.1002/mrm.27636>
- Duan, Z., Xuan, H., Su, J., Chen, J., Yi, X., Liu, Y., & Han, P. (2022). Effects of Al nanopowder intergranular addition on the magnetic properties and temperature stability of sintered Nd-Fe-B magnet. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 35(2), 547-553. (rayyan-13566368).
<https://doi.org/10.1007/s10948-021-06090-8>
- Dupas, A. (2016). *Modélisation et optimisation d'une machine synchrone à commutation de flux et à double excitation à bobinage global* [Université Paris-Sclay]. theses.fr/2016SACLNO37
- Dyca, B., Carsjens, G., Endl, A., & Gugerell, K. (2024). Beyond the surface : An analysis of the institutional regime in the extractive industries in Sweden and Spain. *Ecological Economics*, 226, 108321.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108321>
- Ebin, B., Petranikova, M., & Ekberg, C. (2018). Physical separation, mechanical enrichment and recycling-oriented characterization of spent NiMH batteries. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 1-10. (rayyan-726050810). <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0751-4>
- Ehrmann, C., & Vesa, S. (2026). Legal coherence in the European green deal : The relationship between the critical raw materials act and the EU biodiversity law. *Journal of Energy & Natural Resources Law*, 1-28. <https://doi.org/10.1080/02646811.2025.2598237>
- Eklund, P., Sjökvist, S., Eriksson, S., & Leijon, M. (2014). A complete design of a rare earth metal-free permanent magnet generator. *Machines*, 2(2), 120-133. (rayyan-13570650).
<https://doi.org/10.3390/machines2020120>
- Ener, S., Anagnostopoulou, E., Dirba, I., Lacroix, L.-M., Ott, F., Blon, T., Piquemal, J.-Y., Skokov, K. P., Gutfleisch, O., & Viau, G. (2018). Consolidation of cobalt nanorods : A new route for rare-earth free nanostructured permanent magnets. *Acta Materialia*, 145, 290-297.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.12.009>

- Enokido, Y., Miwa, M., Goto, S., & Fujikawa, Y. (2016). Effects of grain boundary phase on coercivity of dysprosium-free rare earth magnet. *Materials Transactions*, 57(11), 1960-1965. (rayyan-13569853). <https://doi.org/10.2320/matertrans.m2016160>
- Entsalo, H., Kalimo, H., Kautto, P., & Turunen, T. (2023). Analysing regulatory instruments in sustainability transitions : A combined 'intervention points' and 'roles of law' approach to the European union's ecodesign framework. *Sustainable Production and Consumption*, 42, 125-137. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.09.013>
- Erdmann, S., Kluener, T., & Soezen, H. I. (2023). Magnetic properties of rare-earth-lean ThMn₁₂ -type (Nd,X)Fe₁₁ Ti (X: Y and Ce) compounds: a DFT study. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 572, 1-11. (rayyan-13565813). <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.170645>
- Escobar, J., Barrera, M. C., Santes, V. F., & Fouconnier, B. (2023). Guaiacol HDO on La-modified Pt/Al₂O₃: Influence of rare-earth loading. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 101(10), 5772-5784. (rayyan-13565673). <https://doi.org/10.1002/cjce.24830>
- Essig, M., Dinkel, J., & Gutierrez, J. E. (2012). Use of contrast media in neuroimaging. *Magnetic Resonance Imaging Clinics of North America*, 20(4), 633-648. <https://doi.org/10.1016/j.mric.2012.08.001>
- Fallah, N., & Fitzpatrick, C. (2022). How will retired electric vehicle batteries perform in grid-based second-life applications? A comparative techno-economic evaluation of used batteries in different scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 361, 1-11. (rayyan-8827886). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132281>
- Fan, C., Li, G., Gu, J., Wang, Q., Li, S., & Li, B. (2023). Molten-salt electrochemical deoxidation synthesis of platinum-neodymium nanoalloy catalysts for oxygen reduction reaction. *Small*, 1-11. (rayyan-16292794). <https://doi.org/10.1002/smll.202300110>
- Fang, W., Xin, Y., & Zhang, Z. (2023). Eco-label knowledge versus environmental concern toward consumer's switching intentions for electric vehicles : A roadmap toward green innovation and environmental sustainability. *Energy & Environment*, 1-18. (rayyan-8827728). <https://doi.org/10.1177/0958305x231177735>

- Farmer, J. C., Haslam, J. J., Day, S. D., Lian, T., Rebak, R., Yang, N., & Aprigliano, L. (2006). *Corrosion resistance of iron-based amorphous metal coatings*. 2006. (rayyan-13571677). <https://doi.org/10.1115/pvp2006-icpvt-11-93835>
- Ferreira, V. M., Piechnik, S. K., Dall'Armellina, E., Karamitsos, T. D., Francis, J. M., Ntusi, N., Holloway, C., Choudhury, R. P., Kardos, A., Robson, M. D., Friedrich, M. G., & Neubauer, S. (2014). Native T1-mapping detects the location, extent and patterns of acute myocarditis without the need for gadolinium contrast agents. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, 16, 1-11. (rayyan-13570791). <https://doi.org/10.1186/1532-429x-16-36>
- Firestone, J., & Kirk, H. (2019). A strong relative preference for wind turbines in the United States among those who live near them. *Nature Energy*, 4(4), 311-.. (rayyan-8828544). <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0347-9>
- Fishman, T., & Graedel, T. E. (2019). Impact of the establishment of US offshore wind power on neodymium flows. *Nature Sustainability*, 1-7. (rayyan-22497150). <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0252-z>
- Flipo, F. (2021). L'impératif de la sobriété numérique. *Cahiers Droit, Sciences Et Techniques*, 13.
- Franz, M., & Wenzl, F. P. (2017). Critical review on life cycle inventories and environmental assessments of LED-lamps. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(21), 2017-2078. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1370989>
- Fresta, E., Fernández-Luna, V., Coto, P. B., & Costa, R. D. (2018). Merging biology and solid-state lighting: Recent advances in light-emitting diodes based on biological materials. *Advanced Functional Materials*, 28(24), 1707011. <https://doi.org/10.1002/adfm.201707011>
- Fritz, M. M. C., & Silva, M. E. (2018). Exploring supply chain sustainability research in latin america. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 48(8), 818-841. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-01-2017-0023>
- Fu, S., Yan, M., Zhang, B., Wei, Z., & Liu, Y. (2020). The effect of Tb4 O7 powders addition on the magnetic properties for Nd-Fe-B sintered magnets with low rare earth content. *Materials Letters*, 280, 1-4. (rayyan-13567978). <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128555>

- Gabay, A. M., & Hadjipanayis, G. C. (2017). Mechanochemical synthesis of magnetically hard anisotropic RFe₁₀ Si₂ powders with R representing combinations of Sm, Ce and Zr. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 422, 43-48. (rayyan-13569507). <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.08.064>
- Gabay, A. M., & Hadjipanayis, G. C. (2018). Recent developments in RFe₁₂ -type compounds for permanent magnets. *Scripta Materialia*, 154, 284-288. (rayyan-13569109). <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.10.033>
- Galazova, S., Sitokhova, T., & Dzokaeva, Z. (2023). Russia's new environmental policy in the context of « green » transformation. 63. (rayyan-1279579667). <https://doi.org/10.1051/bioconf/20236304006>
- Gale, E. M., Atanasova, I. P., Blasi, F., Ay, I., & Caravan, P. (2015). A manganese alternative to gadolinium for MRI contrast. *Journal of the American Chemical Society*, 137(49), 15548-15557. (rayyan-13570173). <https://doi.org/10.1021/jacs.5b10748>
- Gale, E. M., & Caravan, P. (2018). Gadolinium-free contrast agents for magnetic resonance imaging of the central nervous system. *ACS Chemical Neuroscience*, 9(3), 395-397. (rayyan-13568854). <https://doi.org/10.1021/acscchemneuro.8b00044>
- Galisteo-Lopez, J. F., & Lozano, G. (2021). Nanophotonics for current and future white light-emitting devices. *Journal of Applied Physics*, 130(20), 1-13. (rayyan-13567100). <https://doi.org/10.1063/5.0065825>
- Gan, C., Wu, J., Sun, Q., Kong, W., Li, H., & Hu, Y. (2018). A review on machine topologies and control techniques for low-noise switched reluctance motors in electric vehicle applications. *IEEE Access*, 6, 31430-31443. (rayyan-13568550). <https://doi.org/10.1109/access.2018.2837111>
- Gaurav, A., Lin, Y.-S., Tsai, C.-Y., Huang, J.-K., & Lin, C.-F. (2023). Polyvinyl butyral polymeric host material-based fluorescent thin films to achieve highly efficient red and green colour conversion for advanced next-generation displays. *Nanomaterials*, 13(6), 1-13. (rayyan-13565961). <https://doi.org/10.3390/nano13061009>

- Gaussens, B., Hoang, E., Lecrivain, M., Manfe, P., & Gabsi, M. (2012). A new hybrid-excited flux-switching machine with excitation coils in stator slots. *IEEE Explore*. 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS).
- Gehlmann, F., Haustein, S., & Klockner, C. A. (2024). Willingness to pay extra for electric cars with sustainably produced batteries. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 128, 1-15. (rayyan-8827665). <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104110>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy — a new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Gilles, L. (2018). *Revue critique des contrats pétroliers et gaziers sénégalais*.
- Girard, S., Ouerdane, Y., Vivona, M., Tortech, B., Robin, T., Boukenter, A., Marcandella, C., Cadier, B., Meunier, J.-P., Taylor, E., & Cardimona, D. (2010). Radiation effects on rare-earth doped optical fibers. *Nanophotonics and Macrophotonics for Space Environments IV*, 7817, 1-10. (rayyan-13571504). <https://doi.org/10.1117/12.862706>
- Goe, M., & Gaustad, G. (2014). Identifying critical materials for photovoltaics in the US : A multi-metric approach. *Applied Energy*, 123, 387-396. (rayyan-8829168). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.025>
- Golinska-Dawson, P., Sakao, T., Sundin, E., & Werner-Lewandowska, K. (2025). How can OEMs scale up remanufacturing in product-as-a-service (PaaS)? — Challenges and enablers from a theoretical and industrial perspective. *International Journal of Production Research*, 63(10), 3854-3883. <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2423798>
- Golmakaniyoon, S., & Mahmudi, R. (2011). Microstructure and creep behavior of the rare-earth doped Mg-6Zn-3Cu cast alloy. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 1-10. (rayyan-16292823). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.10.095>
- Gomaa, H. M., Saudi, H. A., Zahran, H. Y., & Yahia, I. S. (2024). Differences between CeO₂ -doped sodium borate glass and Cu₂ O₃ -doped sodium borate glass in terms of structural defects

- concentration and plasmon frequency. *Optical and Quantum Electronics*, 56(2), 1-10. (rayyan-13565169). <https://doi.org/10.1007/s11082-023-05819-0>
- Gonzalez-Torres, M., Bertoldi, P., Castellazzi, L., & Perez-Lombard, L. (2023). Review of EU product energy efficiency policies : What have we achieved in 40 years? *Journal of Cleaner Production*, 421, 138442. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138442>
- Goto, S., Kura, H., Watanabe, E., Hayashi, Y., Yanagihara, H., Shimada, Y., Mizuguchi, M., Takanashi, K., & Kita, E. (2017). Synthesis of single-phase L10-FeNi magnet powder by nitrogen insertion and topotactic extraction. *Scientific Reports*, 7(1), 13216. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13562-2>
- Gotta, J., Tal Ben Shalom, Aslanoglou, S., Cifuentes-Rius, A., Voelcker, N. H., Elnathan, R., Shoseyov, O., & Richter, S. (2018). Stable white light-emitting biocomposite films. *Advanced Functional Materials*, 28(24), 1-9. (rayyan-13569120). <https://doi.org/10.1002/adfm.201706967>
- Graedel, T. E., Harper, E. M., Nassar, N. T., & Reck, B. K. (2015). On the materials basis of modern society. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(20), 6295-6300. <https://doi.org/10.1073/pnas.1312752110>
- Granvik, P., Hanski, J., Lähdesmäki, S., Jokilaakso, A., & Huttunen-Saarivirta, E. (2025). Critical raw materials for green transition : Key parameters and feasibility index for sufficiency. *Resources, Conservation and Recycling*, 218, 108197. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108197>
- Grobner, T. (2006). Gadolinium — a specific trigger for the development of nephrogenic fibrosing dermopathy and nephrogenic systemic fibrosis? *Nephrology, Dialysis, Transplantation*, 21(4), 1104-1108. <https://doi.org/10.1093/ndt/gfk062>
- Gulley, A. L. (2022). One hundred years of cobalt production in the democratic republic of the Congo. *Resources Policy*, 79, 1-10. (rayyan-1279579803). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103007>
- Guo, H., Li, D., Zheng, L., Gong, S., & Xu, H. (2014). Effect of co-doping of two reactive elements on alumina scale growth of β -NiAl at 1200°C. *Corrosion Science*, 88, 197-208. (rayyan-13570688). <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.07.036>

- Gupta, A., Caravan, P., Price, W. S., Platas-Iglesias, C., & Gale, E. M. (2020). Applications for transition-metal chemistry in contrast-enhanced magnetic resonance imaging. *Inorganic Chemistry*, 59(10), 6648-6678. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.0c00510>
- Habazaki, H., Yamasaki, M., Kawashima, A., & Hashimoto, K. (2000). Methanation of carbon dioxide on Ni/(Zr—Sm)O_x catalysts. *Applied Organometallic Chemistry*, 14(12), 803-808. (rayyan-13572004). [https://doi.org/10.1002/1099-0739\(200012\)14:12%3C803::aid-aoc89%3E3.O.co;2-j](https://doi.org/10.1002/1099-0739(200012)14:12%3C803::aid-aoc89%3E3.O.co;2-j)
- Hache, E., & Normand, E. (2024). Quelle stratégie européenne sur les matériaux critiques? *L'Économie Politique 2024/1 N° 101*, Pages 52 À 62 Éditions Alternatives Économiques ISSN 1293-6146), 1-9.
- Hackenhaar, I. C., Moraga, G., Thomassen, G., Sue Ellen Taelman, Dewulf, J., & Bachmann, T. M. (2024). A comprehensive framework covering life cycle sustainability assessment, resource circularity and criticality. *Sustainable Production and Consumption*, 45, 509-524-524. (rayyan-1251264272). <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.01.018>
- Hadjipanayis, G. C., Gabay, A. M., Schonhobel, A. M., Martin-Cid, A., Barandiaran, J. M., & Niarchos, D. (2020). ThMn₁₂-type alloys for permanent magnets. *Engineering*, 6(2), 141-147. (rayyan-13567985). <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.12.011>
- Haidt, J. (2013). *The righteous mind: Why good people are divided by politics and religion*. Knopf Doubleday Publishing Group.
- Haidt, J., & Graham, J. (2007). When morality opposes justice : Conservatives have moral intuitions that liberals may not recognize. *Social Justice Research*, 20(1), 98-116. <https://doi.org/10.1007/s11211-007-0034-z>
- Hailes, O. (2022). Lithium in international law : Trade, investment, and the pursuit of supply chain justice. *Journal of International Economic Law*, 25(1), 148-170. (rayyan-1279579783). <https://doi.org/10.1093/jiel/jgac002>
- Hai-Ling Margaret Cheng PhD, Inga E. Haedicke MSc, Weiran Cheng BSc, Joris Tchouala Nofiele BSc, & Xiao-an Zhang PhD. (2014). Gadolinium-free T1 contrast agents for MRI: Tunable pharmacokinetics of a new class of manganese porphyrins. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 40(6), 1474-1480. (rayyan-13570746). <https://doi.org/10.1002/jmri.24483>

- Haitz, R., Kish, F., Tsao, J., & Nelson, J. (2000). *Sandia report SAND-2000—1612 (2000)*.
- Hale, T. N., Ali, S. H., Christman, P., Bleischwitz, R., Svobodova, K., Primmer, E., Moutinho, V. L. P., & Kulczycka, J. (2025). Critical minerals policies need clearer interface with scientifically credible targets. *Global Sustainability*, 8, e25. <https://doi.org/10.1017/sus.2025.10014>
- Halkos, G. E., & Aslanidis, P.-S. C. (2024). Reviewing the integrated institutional waste-related framework for circular economy in the European union. *Waste Management Bulletin*, 2(3), 28-35. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.06.002>
- He, P., Shi, Y., Meng, T., Yuan, T., Li, Y., Li, X., Zhang, Y., Fan, L., & Yang, S. (2020). Recent advances in white light-emitting diodes of carbon quantum dots. *Nanoscale*, 12(8), 4826-4832. <https://doi.org/10.1039/C9NR10958G>
- Henningsson, M., Riad Abou Zahr, Dyer, A., Greil, G. F., Burkhardt, B., Tandon, A., & Hussain, T. (2018). Feasibility of 3D black-blood variable refocusing angle fast spin echo cardiovascular magnetic resonance for visualization of the whole heart and great vessels in congenital heart disease. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, 20, 1-12. (rayyan-13568819). <https://doi.org/10.1186/s12968-018-0508-1>
- Hensen, J., Archontiki, M., Loonen, R., & Kanellis, M. (2015). Using building simulation for moving innovations across the “valley of death”. *REHVA Journal*, 58-62.
- Hidalgo-Crespo, J., Riel, A., Golinska-Dawson, P., Peeters, J. R., Werner-Lewandowska, K., & Duflou, J. R. (2024). Facilitating circularity: Challenges and design guidelines of product-as-a-service (PaaS) business model offers for electrical and electronic equipment. *Procedia CIRP*, 34th CIRP Design Conference, 128, 567-572. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.03.037>
- Hilt, S., Tang, T., Walton, J. H., Budamagunta, M., Maezawa, I., Kalai, T., Hideg, K., Singh, V., Wulff, H., Gong, Q., Jin, L.-W., Louie, A., & Voss, J. C. (2017). A metal-free method for producing MRI contrast at amyloid- β . *Journal of Alzheimers Disease*, 55(4), 1667-1681. (rayyan-13569255). <https://doi.org/10.3233/jad-160279>
- Hioki, K. (2021). High performance hot-deformed Nd-Fe-B magnets (review). *Science and Technology of Advanced Materials*, 22(1), 72-84. (rayyan-13567059). <https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1868049>

- Hioki, K. (2023). Development of high-performance hot-deformed neodymium-iron-boron magnets without heavy rare-earth elements. *Materials*, 16(19). (rayyan-8827724). <https://doi.org/10.3390/ma16196581>
- Hirota, M., Sanada, M., Morimoto, S., & Inoue, Y. (2015). *Improvement of rotor structure on irreversible demagnetization in double-layered IPMSM with Dy-less magnet*. 1795-1802. (rayyan-13570331). <https://doi.org/10.1109/ecce.2015.7309913>
- Ho, C.-C., Kang, F., Chang, G.-M., You, S.-J., & Wang, Y.-F. (2019). Application of recycled lanthanum-doped TiO₂ immobilized on commercial air filter for visible-light photocatalytic degradation of acetone and NO. *Applied Surface Science*, 1-10. (rayyan-16292776). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.09.136>
- Hoang, E., Lecrivain, M., & Gabsi, M. (2007). A new structure of a switching flux synchronous polyphased machine with hybrid excitation. *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/EPE.2007.4417204>
- Holcombe, B., Sinclair, N., Wasalathanthri, R., Mainali, B., Guarr, E., Baker, A. A., Oluwadamilola Usman, S., Kim, E., Sen-Britain, S., Jin, H., McCall, S. K., & Akolkar, R. (2023). Sustainable and energy-efficient production of rare-earth metals via chloride-based molten salt electrolysis. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1-8. (rayyan-726049704). <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c07720>
- Hool, A., Helbig, C., & Wierink, G. (2023). Challenges and opportunities of the European critical raw materials act. *Mineral Economics*, 1-8. (rayyan-8827700). <https://doi.org/10.1007/s13563-023-00394-y>
- Horn, S., Salo, H., & Nissinen, A. (2023). Promoting ecodesign implementation: The role and development areas of national public policy. *Environmental Policy and Governance*, 33(5), 474-488. <https://doi.org/10.1002/eet.2044>
- Huang, D., Dang, P., Xiao, X., Bai, B., Lian, H., Zeng, Q., & Lin, J. (2020). (Ba,Sr)LaZnTaO₆:Mn⁴⁺ far red emitting phosphors for plant growth LEDs: Structure and photoluminescence properties. *New Journal of Chemistry*, 44(16), 6163-6172. (rayyan-13567282). <https://doi.org/10.1039/c9nj06446j>

- Huang, D., Zhou, Y., Xu, W., Wang, K., Liu, Z., & Hong, M. (2015). Photoluminescence properties and thermal stability of Eu²⁺ and Mn²⁺ co-doped BaSi₃O₄N₂ phosphors. *Journal of Alloys and Compounds*, 653, 148-155. (rayyan-13570476). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.011>
- Huber, S. T. W., & Steininger, K. W. (2022). Critical sustainability issues in the production of wind and solar electricity generation as well as storage facilities and possible solutions. *Journal of Cleaner Production*, 339, 1-11. (rayyan-1279579736). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130720>
- Hunter, A., & Young, R. (2015). *Exploring power storage profiles for vehicle to grid systems*. 16-19. (rayyan-8829026).
- Hur, W.-M., Jeong-Ju Yoo, & Jin Hur. (2015). Exploring the relationship between green consumption value, satisfaction, and loyalty to hybrid car in elderly consumers. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 25(4), 398-408. (rayyan-8829690). <https://doi.org/10.1002/hfm.20556>
- Husain, I., Ozpineci, B., Islam, M. S., Gurpinar, E., Su, G.-J., Yu, W., Chowdhury, S., Xue, L., Rahman, D., & Sahu, R. (2021). Electric drive technology trends, challenges, and opportunities for future electric vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 109(6), 1039-1059. (rayyan-13566926). <https://doi.org/10.1109/jproc.2020.3046112>
- Huster, S., Gloeser-Chahoud, S., Rosenberg, S., & Schultmann, F. (2022). A simulation model for assessing the potential of remanufacturing electric vehicle batteries as spare parts. *Journal of Cleaner Production*, 363. (rayyan-1251264633). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132225>
- Hwang, Y.-H., & Lee, J. (2018). HEV motor comparison of IPMSM with Nd sintered magnet and heavy rare-earth free injection magnet in the same size. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28(3), 1-5. (rayyan-13568862). <https://doi.org/10.1109/tasc.2018.2807377>
- Ida Mae De Waal. (2023). The legal transition towards a more circular electrical and electronic equipment chain-a case study of the Netherlands. *Sustainability*, 15(2). (rayyan-1251263512). <https://doi.org/10.3390/su15020935>
- Illich, I. (2021). *La convivialité*. Le Seuil.

- Ipus, J. J., Ucar, H., & McHenry, M. E. (2011). Near room temperature magnetocaloric response of an (FeNi)ZrB alloy. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(10), 2494-2497. (rayyan-13571360). <https://doi.org/10.1109/tmag.2011.2159781>
- Islam, M. S., Mikail, R., & Husain, I. (2020). Demagnetization performance enhancement of heavy rare earth free permanent magnet machines. 1780-1786. (rayyan-13567420). <https://doi.org/10.1109/ecce44975.2020.9236411>
- Islam, Md. Z., Choi, S., Elbuluk, M. E., Reddy Bonthu, S. S., Arafat, A., & Baek, J. (2021). Design of external rotor ferrite-assisted synchronous reluctance motor for high power density. *Applied Sciences-Basel*, 11(7). (rayyan-13566910). <https://doi.org/10.3390/app11073102>
- Issartel, C., Buscail, H., Chevalier, S., & Favergeon, J. (2017). Effect of yttrium as alloying element on a model alumina-forming alloy oxidation at 1100 a°C. *Oxidation of Metals*, 88(3), 409-420. (rayyan-13569394). <https://doi.org/10.1007/s11085-017-9750-4>
- Jalili, M. H., Yu, T., Hassani, C., Prosper, A. E., J. Paul Finn, & Bedayat, A. (2022). Contrast-enhanced MR angiography without gadolinium-based contrast material: Clinical applications using ferumoxytol. *Radiology: Cardiothoracic Imaging*, 4(4), 1-14. (rayyan-13566260). <https://doi.org/10.1148/ryct.210323>
- Jansen, M., Meisen, T., Plociennik, C., Berg, H., Pomp, A., & Windholz, W. (2023). Stop guessing in the dark : Identified requirements for digital product passport systems. *Systems*, 11(3), 1-13. (rayyan-16055749). <https://doi.org/10.3390/systems11030123>
- Jedliński, J., Glazkov, A., Konopka, M., Borchardt, G., Tscherkasova, E., Bronfin, M., & Nocuń, M. (1996). An XPS/SEM/EDX study of the early oxidation stages of the Fe₉₀Cr₅Al(+Y) alumina-forming alloys. *Applied Surface Science*, 103(2), 205-216. (rayyan-13572220). [https://doi.org/10.1016/0169-4332\(96\)00521-1](https://doi.org/10.1016/0169-4332(96)00521-1)
- Jensen, B. A., Tang, W., Liu, X., Nolte, A. I., Ouyang, G., Dennis, K. W., & Cui, J. (2019). Optimizing composition in MnBi permanent magnet alloys. *Acta Materialia*, 181, 595-602. (rayyan-13568356). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.10.003>

- Jensen, P. D., Purnell, P., & Velenturf, A. P. M. (2020). Highlighting the need to embed circular economy in low carbon infrastructure decommissioning : The case of offshore wind. *Sustainable Production and Consumption*, 1-15. (rayyan-1273125254). <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.07.012>
- Jeon, M., V Mackenzie Halbert, Stephen, Z. R., & Zhang, M. (2021). Iron oxide nanoparticles as T1 contrast agents for magnetic resonance imaging : Fundamentals, challenges, applications, and perspectives. *Advanced Materials*, 33(23), 1-41. (rayyan-13567075). <https://doi.org/10.1002/adma.201906539>
- Ji, F., Xu, R., Gao, Y., Tian, Q., Wang, L., Xiao, Z., & Yin, F. (2021). Effect of Ti and rare earth on microsegregation and large-sized precipitates of H13 steel. *Journal of Iron and Steel Research International*, 28(12), 1591-1604. (rayyan-13566919). <https://doi.org/10.1007/s42243-021-00705-z>
- Ji, Y., Li, Y., & Lu, Q. (2023). *Investigation of a novel hybrid less-rare-earth consequent-pole interior permanent magnet machine with asymmetric rotor*. 5354-5359. (rayyan-13565695). <https://doi.org/10.1109/icems59686.2023.10344715>
- Jia, Y., Wu, Y., Xu, Y., Zheng, R., Zhao, S., Skokov, K. P., Maccari, F., Aubert, A., Gutfleisch, O., Wang, J., Wang, H., Zou, J., & Jiang, C. (2023). Roadmap towards optimal magnetic properties in L10 -MnAl permanent magnets. *Acta Materialia*, 245, 1-16. (rayyan-13565983). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.118654>
- Jiang, K., Wang, Y., Lin, C., Zheng, L., Du, J., Zhuang, Y., Xie, R., Li, Z., & Lin, H. (2022). Enabling robust and hour-level organic long persistent luminescence from carbon dots by covalent fixation. *Light: Science & Applications*, 11(1), 1-11. (rayyan-13566375). <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00767-y>
- Jin, Z.-Z., Zha, M., Wang, S.-Q., Wang, S.-C., Wang, C., Jia, H.-L., & Wang, H.-Y. (2022). Alloying design and microstructural control strategies towards developing Mg alloys with enhanced ductility. *Journal of Magnesium and Alloys*, 10(5), 1191-1206. (rayyan-13566215). <https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.04.002>
- Julsrud, T. E., Kallbekken, S., & Aasen, M. (2023). Can shared autonomous vehicles become a sustainable mode of mobility in the future ? Insights from a practice-based study of urban dwellers in Norway.

- Journal of Environmental Policy & Planning*, 25(6), 703-722. (rayyan-8827694).
<https://doi.org/10.1080/1523908x.2023.2251923>
- Jung, Y.-H., Park, M.-R., Kim, K.-O., Chin, J.-W., Hong, J.-P., & Lim, M.-S. (2021). Design of high-speed multilayer IPMSM using ferrite PM for EV traction considering mechanical and electrical characteristics. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57(1), 327-339. (rayyan-13566911).
<https://doi.org/10.1109/tia.2020.3033783>
- Jurkovic, S., Rahman, K., Bae, B., Patel, N., & Savagian, P. (2015). *Next generation chevy volt electric machines; design, optimization and control for performance and rare-earth mitigation*. 5219-5226. (rayyan-13570463). <https://doi.org/10.1109/ecce.2015.7310394>
- J.W. Stinson. (s. d.). *U.S. patent 4, 992, 704, 1991*.
- Kanal, E., & Tweedle, M. F. (2015). Residual or retained gadolinium : Practical implications for radiologists and our patients. *Radiology*, 275(3), 630-634. <https://doi.org/10.1148/radiol.2015150805>
- Kang, F., Sun, G., Boutinaud, P., Wu, H., Ma, F.-X., Lu, J., Gan, J., Bian, H., Gao, F., & Xiao, S. (2021). Recent advances and prospects of persistent luminescent materials as inner secondary self-luminous light source for photocatalytic applications. *Chemical Engineering Journal*, 403, 1-71. (rayyan-13567222). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126099>
- Kannstatter, T., & Meerschiff, S. (2015). Launching an E-carsharing system in the polycentric area of ruhr. *Green Energy and Technology*, 203, 187-208. (rayyan-8829030). https://doi.org/10.1007/978-3-319-13194-8_11
- Karmakar, A., & Li, J. (2022). Luminescent MOFs (LMOFs) : Recent advancement towards a greener WLED technology. *Chemical Communications*, 58(77), 10768-10788. (rayyan-13566521).
<https://doi.org/10.1039/d2cc03330e>
- Kasmaeeyazdi, S., Abdolmaleki, M., Ibrahim, E., Jiang, J., Marzan, I., & Irene Benito Rodriguez. (2021). Copernicus data to boost raw material source management : Illustrations from the RawMatCop programme. *Resources Policy*, 74. (rayyan-1251264379).
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102384>

- Keller, T., Barbagallo, D., Ghosh, T. K., Sheremetyeva, N., Hautier, G., & Baker, I. (2024). Suppression of anti-phase boundary defects in Mn-Al-Ti permanent magnets. *Acta Materialia*, 265, 1-13. (rayyan-13565453). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.119646>
- Kimiabeigi, M., Widmer, J. D., Sheridan, R. S., Walton, A., & Harris, R. (2016). *Design of high performance traction motors using cheaper grade of materials*. 2016. (rayyan-13569790). <https://doi.org/10.1049/cp.2016.0287>
- King, M. R. N., Timms, P. D., & Mountney, S. (2023). A proposed universal definition of a digital product passport ecosystem (DPPE) : Worldviews, discrete capabilities, stakeholder requirements and concerns. *Journal of Cleaner Production*, 384, 1-19. (rayyan-16055743). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135538>
- Kleijn, R., & van der Voet, E. (2010). Resource constraints in a hydrogen economy based on renewable energy sources : An exploration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2784-2795. (rayyan-8829553). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.066>
- Kollias, A. N., Vogel, M. A., Herminia M. De Kaspar, Lackerbauer, C. A., & Grueterich, M. (2010). Propionibacterium acnes in capsular bag distension syndrome. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, 36(1), 167-169. (rayyan-13571503). <https://doi.org/10.1016/j.jcrs.2009.06.047>
- Koppelaar, R. H. E. M., Pamidi, S., Hajosi, E., Herreras, L., Leroy, P., Jung, H.-Y., Concheso, A., Daniel, R., Francisco, F. B., Parrado, C., Dell'Ambrogio, S., Guggiari, F., Leone, D., & Fontana, A. (2023). A digital product passport for critical raw materials reuse and recycling. *Sustainability*, 15(2), 1-21. (rayyan-1284423988). <https://doi.org/10.3390/su15021405>
- Korkmaz, K., Alemrajabi, M., Rasmuson, A., & Forsberg, K. (2018). Recoveries of valuable metals from spent nickel metal hydride vehicle batteries via sulfation, selective roasting, and water leaching. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 1-13. (rayyan-726050679). <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0169-1>
- Kosaka, T., Hirose, T., & Matsui, N. (2010). *Brushless synchronous machines with wound-field excitation using SMC core designed for HEV drives*. 1794-1800. (rayyan-13571415). <https://doi.org/10.1109/ipeec.2010.5543569>

- Kosaka, T., Hirose, T., & Matsui, N. (2011). *Experimental studies on drive performances of less rare-earth PM hybrid excitation motor.* 161-168. (rayyan-13571240). <https://doi.org/10.1109/icpe.2011.5944570>
- Kronenberg, P., & Somani, B. (2018). Advances in lasers for the treatment of stones-a systematic review. *Current Urology Reports*, 19(6), 1-11. (rayyan-13568640). <https://doi.org/10.1007/s11934-018-0807-y>
- Ku, A., Setlur, A., & Loudis, J. (2015). Impact of light emitting diode adoption on rare earth element use in lighting : Implications for yttrium, europium, and terbium demand. *Electrochemical Society Interface*, 1-6. <https://doi.org/10.1149/2.F04154if>
- Kulkarni, S., Zhao, F., Nlebedim, I. C., Fredette, R., & Paranthaman, M. P. (2023). Comparative life cycle assessment of injection molded and big area additive manufactured NdFeB bonded permanent magnets. *Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME*, 1-9. (rayyan-16292714). <https://doi.org/10.1115/1.4056489>
- Kundu, S., Sk, B., Pallavi, P., Giri, A., & Patra, A. (2020). Molecular engineering approaches towards all-organic white light emitting materials. *Chemistry — a European Journal*, 26(25), 5557-5582. <https://doi.org/10.1002/chem.201904626>
- Lander, L., Tagnon, C., Nguyen-Tien, V., Kendrick, E., Elliott, R. J. R., Abbott, A. P., Edge, J. S., & Offer, G. J. (2023). Breaking it down : A techno-economic assessment of the impact of battery pack design on disassembly costs. *Applied Energy*, 331. (rayyan-1251264957). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120437>
- Langelier, B., Nasiri, A. M., Lee, S. Y., Gharghour, M. A., & Esmaeili, S. (2015). Improving microstructure and ductility in the Mg-Zn alloy system by combinational Ce-Ca microalloying. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 620, 76-84. (rayyan-13570332). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.09.116>
- Langlais, A. (2010). L'analyse du cycle de vie des nanomatériaux. In *La régulation des nanotechnologies, clair-obscur normatif* (LS. Lacour, p. p. 225-248). Larcier.

- Lanzilotti, C. O., Pinto, L. F. R., Facchini, F., & Digiesi, S. (2022). Embedding product-service system of cutting tools into the machining process: An eco-efficiency approach toward sustainable development. *Sustainability*, 14(3), 1-19. (rayyan-8827869). <https://doi.org/10.3390/su14031100>
- Larsson, K., Ekberg, C., & Ødegaard-Jensen, A. (2013). Dissolution and characterization of HEV NiMH batteries. *Waste Management*, 33(3), 689-698. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.06.001>
- Lee, C. U., Glockner, J. F., Hesley, G. K., Brinkman, N. J., & Tran, N. V. (2020). Two non-gadolinium-based, innovative approaches to preoperative lymphangiography. *Plastic and Reconstructive Surgery-Global OPEN*, 8(4), 1-4. (rayyan-13567988). <https://doi.org/10.1097/gox.0000000000002805>
- Lee, Y., & Dacass, T. (2022). Reducing the United States ? Risks of dependency on China in the rare earth market. *Resources Policy*, 77, 1-9. (rayyan-22356667). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102702>
- León Bravo, V., Jaramillo Villacrés, M., & Silva, M. E. (2022). Analysing competing logics towards sustainable supplier management. *Supply Chain Management: An International Journal*, 27(7), 49-63. <https://doi.org/10.1108/SCM-07-2020-0354>
- Levine, D., McDonald, R. J., & Kressel, H. Y. (2018). Gadolinium retention after contrast-enhanced MRI. *JAMA*, 320(18), 1853-1854. <https://doi.org/10.1001/jama.2018.13362>
- Levy, S., Rosen, C. M., & Iles, A. (2017). Mapping the product life cycle : Rare earth elements in electronics. *Case Studies in the Environment*, 1-9. (rayyan-1273125197). <https://doi.org/10.1525/cse.2017.000265>
- Lewis, L. H., Mubarak, A., Poirier, E., Bordeaux, N., Manchanda, P., Kashyap, A., Skomski, R., Goldstein, J., Pinkerton, F. E., Mishra, R. K., Kubic, Jr. R. C., & Barmak, K. (2014). Inspired by nature : Investigating tetrataenite for permanent magnet applications. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 26(6), 1-11. (rayyan-13570767). <https://doi.org/10.1088/0953-8984/26/6/064213>
- Lhuilier, G. (2016). Minerais de guerre. Une nouvelle théorie de la mondialisation du droit ? *Droit Et Société*, N° 92(1), 117-135. <https://doi.org/10.3917/drs.092.0117>
- Lhuilier, G. (2022). La proposition de directive europeenne sur le devoir de vigilance des entreprises en matiere de durabilite. *Rdai/Iblj*, (5).

- Lhuillier, G. (2024). *L'acceptabilité sociale « à la française » : Les cas du projet minier montagne d'or en guyane et du projet d'usine éolienne à saint-brieuc*.
- Lhuillier, G., Favreau, F., & Bastiege, M. (2022). The reform of the European extra-financial reporting law. *Int'l Bus. LJ*.
- Li, B., Chen, H., Ke, X., Wei, G., & Yang, Q. (2023). Improving the mechanical properties of Mg-5Al-2Ca-1Mn-0.5Zn alloy through rotary swaging. *Materials*, 16(12). (rayyan-13565686). <https://doi.org/10.3390/ma16124489>
- Li, D., Zhou, L., Xi, Y., Liu, L., Liu, Z., Si, J., & Zhu, K. (2017). Phase transformation behavior of alumina grown on FeAl alloys with reactive element dopants at 1273 K. *Journal of Alloys and Compounds*, 692, 427-433. (rayyan-13569627). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.09.092>
- Li, H., Ren, Q., & Zhang, L. (2023). Effects of cerium on non-metallic inclusions and rolling contact fatigue life of a high-carbon chromium bearing steel. *Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science*, 54(1), 167-178. (rayyan-13565603). <https://doi.org/10.1007/s11661-022-06856-2>
- Li, J., Peng, K., Wang, P., Zhang, N., Feng, K., Guan, D., Meng, J., Wei, W., & Yang, Q. (2020). Critical rare-earth elements mismatch global wind-power ambitions. *One Earth*, 3(1), 116-125-125. (rayyan-9601108). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.06.009>
- Li, R., Shang, R. X., Xiong, J. F., Liu, D., Kuang, H., Zuo, W. L., Zhao, T. Y., Sun, J. R., & Shen, B. G. (2017). Magnetic properties of (misch metal, Nd)-Fe-B melt-spun magnets. *AIP Advances*, 7(5), 056207. <https://doi.org/10.1063/1.4973846>
- Li, X., Lou, L., Song, W., Huang, G., Hou, F., Zhang, Q., Zhang, H.-T., Xiao, J., Wen, B., & Zhang, X. (2017). Novel bimorphological anisotropic bulk nanocomposite materials with high energy products. *Advanced Materials*, 29(16), 1-8. (rayyan-13569541). <https://doi.org/10.1002/adma.201606430>
- Li, X., Quan, L., Chen, Y., Zhu, X., Chen, Q., & IEEE. (2016). Electromagnetic performance analysis of a new hybrid excited stator-partitioned flux switching permanent magnet machine. *2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (Icems 2016)*. (rayyan-13572512).

- Li, Y., Yuran Huang, Zhao Wang, Fabio Carniato, Yijun Xie, Patterson, J. P., Thompson, M. P., Andolina, C. M., Ditri, T. B., Millstone, J. E., Figueroa, J. S., Rinehart, J. D., Miriam Scadeng, Mauro Botta, & Gianneschi, N. C. (2016). Polycatechol nanoparticle MRI contrast agents. *Small*, 12(5), 668-677. (rayyan-13570015). <https://doi.org/10.1002/sml.201502754>
- Li, Z. B., Shen, B. G., Zhang, M., Hu, F. X., & Sun, J. R. (2015). Substitution of Ce for Nd in preparing R₂Fe₁₄B nanocrystalline magnets. *Journal of Alloys and Compounds*, 628, 325-328. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.042>
- Li, Z., Zhang, Y., Yin, B., & Song, D. (2023). Effect of CeO₂ addition on microstructure, hardness, and tensile properties of selected laser-melted TC4 alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-10. (rayyan-13565593). <https://doi.org/10.1007/s11665-023-09032-8>
- Libaert, T. (2024). Libaert, T., « La reconnaissance d'un droit à la réparation au bénéfice des consommateurs européens », R.E.D.C., 2024/3, p. 383-390. *Rvue Européenne De Droit De La Consommation*, 2024/3, 383-390.
- Liu, C., Wang, J., Xu, Y., Fu, Y., Han, J., Cao, Z., Chen, X., Zhao, S., & Zhu, X. (2022). In vitro corrosion performance of As-extruded Mg-Gd-Dy-Zr alloys for potential orthopedic applications. *Metals*, 12(4), 1-12. (rayyan-13566505). <https://doi.org/10.3390/met12040604>
- Liu, X., Wang, X., Liang, L., Zhang, P., Jin, J., Zhang, Y., Ma, T., & Yan, M. (2014). Rapid coercivity increment of Nd-Fe-B sintered magnets by Dy₆₉ Ni₃₁ grain boundary restructuring. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 370, 76-80. (rayyan-13570856). <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.06.051>
- Lopez, K., Neji, R., Bustin, A., Rashid, I., Hajhosseiny, R., Malik, S. J., Teixeira, R. P. A. G., Razavi, R., Prieto, C., Roujol, S., & Botnar, R. M. (2021). Quantitative magnetization transfer imaging for non-contrast enhanced detection of myocardial fibrosis. *Magnetic Resonance in Medicine*, 85(4), 2069-2083. (rayyan-13567211). <https://doi.org/10.1002/mrm.28577>
- Luhar, A., Khan, S., J. Paul Finn, Ghahremani, S., Griggs, R., Zaritsky, J., Salusky, I., & Hall, T. R. (2016). Contrast-enhanced magnetic resonance venography in pediatric patients with chronic kidney disease: Initial experience with ferumoxytol. *Pediatric Radiology*, 46(9), 1332-1340. (rayyan-13569780). <https://doi.org/10.1007/s00247-016-3605-z>

- Luis A. Tercero Espinoza. (2021). Critical appraisal of recycling indicators used in European criticality exercises and circularity monitoring. *Resources Policy*, 73. (rayyan-1251264381). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102208>
- Lustig, W. P., Wang, F., Teat, S. J., Hu, Z., Gong, Q., & Li, J. (2016). Chromophore-based luminescent metal-organic frameworks as lighting phosphors. *Inorganic Chemistry*, 55(15), 7250-7256. (rayyan-13569776). <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.6b00897>
- Lv, B., Shi, L., Li, L., Liu, K., & Jing, J. (2022). Performance analysis of asymmetrical less-rare-earth permanent magnet motor for electric vehicle. *IET Electrical Systems in Transportation*, 12(1), 36-48. (rayyan-13566606). <https://doi.org/10.1049/els2.12036>
- Macwan, A., & Chen, D. L. (2016). Ultrasonic spot welding of a rare-earth containing ZEK100 magnesium alloy : Effect of welding energy. *Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science*, 47(4), 1686-1697. (rayyan-13570165). <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3355-4>
- Mancini, L., Benini, L., & Sala, S. (2015). Resource footprint of Europe : Complementarity of material flow analysis and life cycle assessment for policy support. *Environmental Science & Policy*, 54, 367-376. (rayyan-1251264782). <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.07.025>
- Mancini, S., Casale, M., Rossi, P., Faraudello, A., & Giovanna Antonella Dino. (2023). Operative instruments to support public authorities and industries for the supply of raw materials : A decision support tool to evaluate the sustainable exploitation of extractive waste facilities. *Resources Policy*, 81. (rayyan-1251264374). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103338>
- Mancusi, F., Fruggiero, F., & Panagou, S. (2022). A cloud-aided remanufacturing framework to assess the relative complexity. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 1025-1030-1030. (rayyan-1251264744). <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.513>
- Mao, Z.-Y., Wang, F., Chen, J.-J., & Wang, D.-J. (2015). Rare-earth free phosphors with ultra-broad band emission application for high color rendering index lighting source. *Journal of the American Ceramic Society*, 98(12), 3856-3862. (rayyan-13570535). <https://doi.org/10.1111/jace.13828>

- Marion, L., & Dronnier, E. (2023). « entreprise — préciser, étayer, démontrer : Les propositions exigeantes de la commission européenne pour lutter contre l'écoblanchiment (greenwashing) ». *La Semaine Juridique Entreprise et Affaires*, 2023/5(20-21 act 459).
- Martínez, C., Vidal-Moya, A., Yilmaz, B., Kelkar, C., & Corma, A. (2023). Minimizing rare earth content of FCC catalysts : Understanding the fundamentals on combined P-La stabilization. *Catalysis Today*, 418, 114123. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2023.114123>
- Marty, N., & Druelle-Korn, C. (2023). Histoire des entreprises et économie circulaire : Pour une nécessaire clarification: *Entreprises et histoire*, n° 110(1), 6-17. <https://doi.org/10.3917/eh.110.0006>
- Masai, H., Takahashi, Y., Fujiwara, T., Matsumoto, S., & Yoko, T. (2010). High photoluminescent property of low-melting Sn-doped phosphate glass. *Applied Physics Express*, 3(8), 1-4. (rayyan-13571427). <https://doi.org/10.1143/apex.3.082102>
- Matschewsky, J. (2019). Unintended circularity?—Assessing a product-service system for its potential contribution to a circular economy. *Sustainability*, 11(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/su11102725>
- Mazaleyrat, F. (2022). Getting rid of critical raw materials in hard magnets : Is it feasible? *IEEE Transactions on Magnetics*, 58(2), 1-10. (rayyan-13566395). <https://doi.org/10.1109/tmag.2021.3115031>
- Mazaleyrat, F., Pasko, A., Bartok, A., & LoBue, M. (2011). Giant coercivity of dense nanostructured spark plasma sintered barium hexaferrite. *Journal of Applied Physics*, 109(7), 07A708. <https://doi.org/10.1063/1.3556918>
- McCallum, R. W., Lewis, L. H., Skomski, R., Kramer, M. J., Anderson, I. E., & Clarke, D. (2014). Practical aspects of modern and future permanent magnets. *Annual Review of Materials Research*, Vol 44, 44, 451-477. (rayyan-13570800). <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113457>
- McGill, I., & Bünzli, J.-C. G. (2018). Rare earth elements. In Wiley-VCH (Éd.), *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry* (1^{re} éd.). Wiley. https://doi.org/10.1002/14356007.a22_607
- McMahon, M. T., Gilad, A. A., Bulte, J. W. M., & Zijl, P. C. M. van. (2017). *Chemical exchange saturation transfer imaging : Advances and applications*. Pan Stanford publishing.

- Mecozzi, A., & Wiesenfeld, J. M. (2001). The roles of semiconductor optical amplifiers in optical networks. *Optics & Photonics News*, 12(3), 36-42. (rayyan-13571943).
<https://doi.org/10.1364/opn.12.3.000036>
- Meksi, M., Kochkar, H., Berhault, G., & Guillard, C. (2015). Effect of cerium content and post-thermal treatment on doped anisotropic TiO₂ nanomaterials and kinetic study of the photodegradation of formic acid. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 409, 162-170. (rayyan-13570302).
<https://doi.org/10.1016/j.molcata.2015.08.024>
- Menendez-Velazquez, A., Morales, D., & Ana Belen Garcia-Delgado. (2022). Sunlike white light-emitting diodes based on rare-earth-free luminescent materials. *Materials*, 15(5), 1-12. (rayyan-13566645).
<https://doi.org/10.3390/ma15051680>
- Meng, T., Wang, Z., Yuan, T., Li, X., Li, Y., Zhang, Y., & Fan, L. (2021). Gram-scale synthesis of highly efficient rare-earth-element-free red/green/blue solid-state bandgap fluorescent carbon quantum rings for white light-emitting diodes. *Angewandte Chemie International Edition*, 60(30), 16343-16348. (rayyan-13567054). <https://doi.org/10.1002/anie.202103361>
- Ming Hwa Ting, & Seaman, J. (2013). Rare earths : Future elements of conflict in Asia? *Asian Studies Review*, 37(2), 234-252. (rayyan-1284422372). <https://doi.org/10.1080/10357823.2013.767313>
- Mirasol, R. V., Bokkers, R. P. H., Hernandez, D. A., Merino, J. G., Luby, M., Warach, S., & Latour, L. L. (2014). Assessing reperfusion with whole-brain arterial spin labeling a noninvasive alternative to gadolinium. *Stroke*, 45(2), 456-461. (rayyan-13570658).
<https://doi.org/10.1161/strokeaha.113.004001>
- Mirza, F. A., & Chen, D. L. (2014). Fatigue of rare-earth containing magnesium alloys : A review. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 37(8), 831-853. (rayyan-13570739).
<https://doi.org/10.1111/ffe.12198>
- Mirza, F. A., Chen, D. L., Li, D. J., & Zeng, X. Q. (2013a). Effect of rare earth elements on deformation behavior of an extruded Mg—10Gd—3Y—0.5Zr alloy during compression. *Materials & Design*, 46, 411-418. (rayyan-13570909). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.040>

- Mirza, F. A., Chen, D. L., Li, D. J., & Zeng, X. Q. (2013b). Effect of strain ratio on cyclic deformation behavior of a rare-earth containing extruded magnesium alloy. *Materials Science and Engineering A*, 588, 250-259. (rayyan-13570952). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.09.023>
- Mirza, F. A., Chen, D. L., Li, D. J., & Zeng, X. Q. (2013c). Low cycle fatigue of a rare-earth containing extruded magnesium alloy. *Materials Science and Engineering A*, 575, 65-73. (rayyan-13570972). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.03.041>
- Mirza, F. A., Chen, D. L., Li, D. J., & Zeng, X. Q. (2015). Cyclic deformation behavior of a rare-earth containing extruded magnesium alloy: Effect of heat treatment. *Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science*, 46(3), 1168-1187. (rayyan-13570188). <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2687-1>
- Mirza, F. A., Wang, K., Bhole, S. D., Friedman, J., Chen, D. L., Ni, D. R., Xiao, B. L., & Ma, Z. Y. (2016). Strain-controlled low cycle fatigue properties of a rare-earth containing ME20 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 661, 115-125. (rayyan-13570039). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.024>
- Misganaw Alemu Zeleke, & Kuo, D.-H. (2021). Synthesis of hydroxide-enriched cerium-doped oxy-sulfide catalyst for visible light-assisted reduction of Cr(vi). *New Journal of Chemistry*, 45(1), 288-297. (rayyan-13567261). <https://doi.org/10.1039/d0nj04628k>
- Mo, Q., Shi, Y., Cai, W., Zhao, S., Ying, Y., & Zang, Z. (2022). Opportunities and challenges of low-dimensional hybrid metal halides in white light-emitting diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55(33), 1-21. (rayyan-13566549). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac7264>
- Moghaddam, R. R., Nategh, S., Islam, J., & Boglietti, A. (2020). *Different traction motor topologies used in E-mobility: Part II: magnet-based solutions*. 138-143. (rayyan-13567442). <https://doi.org/10.1109/icem49940.2020.9270938>
- Mohd Mansoor Khan & Ramesh Kumar Sonkar. (2019). Analytical model for signal and gain modulation on thulium-doped fiber amplifiers in S and near-C bands including amplified spontaneous emission: Signal power analysis. *Optical Engineering*, 58(2). (rayyan-13568011). <https://doi.org/10.1117/1.oe.58.2.026103>

- Mojgan Lottfali Kazemi, Sui, R., Clark, P. D., & Marriott, R. A. (2019). Catalytic combustion of claus tail gas : Oxidation of sulfur species and CO using gold supported on lanthanide-modified TiO₂. *Applied Catalysis A: General*, 1-12. (rayyan-16292779). <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2019.117256>
- Mokdad, F., & Chen, D. L. (2015). Strain-controlled low cycle fatigue properties of a rare-earth containing ZEK100 magnesium alloy. *Materials & Design*, 67, 436-447. (rayyan-13570548). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.11.058>
- Monfared, B., Furberg, R., & Palm, B. (2014). Magnetic vs. vapor-compression household refrigerators : A preliminary comparative life cycle assessment. *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid*, 1-16. (rayyan-16292767). <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.02.013>
- Morrow, J. R., Tsitovich, P. B., McMahon, M., Gilad, A., Bulte, J., & VanZijl, P. (2017). Transition metal paraCEST probes as alternatives to lanthanides. *Chemical Exchange Saturation Transfer Imaging: Advances and Applications*, 257-282. (rayyan-13572509). <https://doi.org/10.1201/9781315364421-13>
- Muehe, A. M., Theruvath, A. J., Lai, L., Aghighi, M., Quon, A., Holdsworth, S. J., Wang, J., Luna-Fineman, S., Marina, N., Advani, R., Rosenberg, J., & Daldrup-Link, H. E. (2018). How to provide gadolinium-free PET/MR cancer staging of children and young adults in less than 1 h : The stanford approach. *Molecular Imaging & Biology*, 20(2), 324-335. (rayyan-13568874). <https://doi.org/10.1007/s11307-017-1105-7>
- Muench, C., Lukas Alexander Benz, & Hartmann, E. (2022). Exploring the circular economy paradigm : A natural resource-based view on supplier selection criteria. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 28(4). (rayyan-9601103). <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2022.100793>
- Mustafa R. Bashir Md, Lubna Bhatti Mbbs, Daniele Marin Md, & Rendon C. Nelson Md. (2015). Emerging applications for ferumoxytol as a contrast agent in MRI. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 41(4), 884-898. (rayyan-13570312). <https://doi.org/10.1002/jmri.24691>
- Nabyl, Z., Schuller, S., Podor, R., Lautru, J., Sauvage, E., Artico, A., Castano, C., Benavent, V., & Delaunay, M. (2024). French nuclear glass synthesis : Focus on liquid waste dissolution kinetics. *Journal of Nuclear Materials*, 601, 155329. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2024.155329>

- Nakajima, N., & Vanderburg, W. H. (2005). A failing grade for our efforts to make our civilization more environmentally sustainable. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 25(2), 129-144-144. (rayyan-1251265694). <https://doi.org/10.1177/0270467605274856>
- Nansai, K., Kondo, Y., Giurco, D., Sussman, D., Nakajima, K., Kagawa, S., Takayanagi, W., Shigetomi, Y., & Tohno, S. (2019). Nexus between economy-wide metal inputs and the deterioration of sustainable development goals. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 12-19. (rayyan-8828642). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.017>
- Nayak, A. B., Luhar, A., Hanudel, M., Gales, B., Hall, T. R., J. Paul Finn, Salusky, I. B., & Zaritsky, J. (2015). High-resolution, whole-body vascular imaging with ferumoxytol as an alternative to gadolinium agents in a pediatric chronic kidney disease cohort. *Pediatric Nephrology*, 30(3), 515-521. (rayyan-13570328). <https://doi.org/10.1007/s00467-014-2953-x>
- Neramballi, A., Milios, L., Sakao, T., & Matschewsky, J. (2024). Toward a policy landscape to support the product-as-a-service design process for a circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 28(5), 1045-1059. <https://doi.org/10.1111/jiec.13535>
- Ngom, A. (2022). Les terres rares d’afrique, un potentiel recours pour l’union européenne dans le respect du droit international: *Revue Internationale De Droit Économique*, t.XXXVII(1), 5-27. <https://doi.org/10.3917/ride.361.0005>
- Nguyen, K.-L., Yoshida, T., Kathuria-Prakash, N., Zaki, I. H., Varallyay, C. G., Semple, S. I., Saouaf, R., Rigsby, C. K., Stoumpos, S., Whitehead, K. K., Griffin, L. M., Saloner, D., Hope, M. D., Prince, M. R., Fogel, M. A., Schiebler, M. L., Roditi, G. H., Radjenovic, A., Newby, D. E., ... J. Paul Finn. (2019). Multicenter safety and practice for off-label diagnostic use of ferumoxytol in MRI. *Radiology*, 293(3), 554-564. (rayyan-13568251). <https://doi.org/10.1148/radiol.2019190477>
- Nkiawete, M. M., & Vander Wal, R. L. (2025). Rare earth elements : Sector allocations and supply chain considerations. *Journal of Rare Earths*, 43(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2024.01.020>
- Nordelof, A., Grunditz, E., Lundmark, S., Tillman, A.-M., Alatalo, M., & Thiringer, T. (2019). Life cycle assessment of permanent magnet electric traction motors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 1-12. (rayyan-9601148). <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.004>

- Nystrom, N. N., Liu, H., Martinez, F. M., Zhang, X., Scholl, T. J., & Ronald, J. A. (2022). Gadolinium-free magnetic resonance imaging of the liver via an Oatp1-targeted manganese(III) porphyrin. *Journal of Medicinal Chemistry*, 65(14), 9846-9857. (rayyan-13566391). <https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.2c00500>
- Ognard, J., Barrat, J.-A., Chazot, A., Alavi, Z., & Ben Salem, D. (2020). Gadolinium footprint : Cradle to cradle? *Journal of Neuroradiology*, 47(4), 247-249. <https://doi.org/10.1016/j.neurad.2020.03.006>
- Omodara, L., Turpeinen, E. M., Pitkaaho, S., & Keiski, R. L. (2020). Substitution potential of rare earth catalysts in ethanol steam reforming. *Sustainable Materials and Technologies*, 26, 1-13. (rayyan-13567899). <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00237>
- Opelt, K., Lin, C.-C., Schonfeldt, M., Gassmann, J., Yoon, S., & Gutfleisch, O. (2024). Diffusion behavior of heavy rare-earths for grain boundary engineering of sintered Nd-Fe-B-based permanent magnets produced by the 2-powder method. *Acta Materialia*, 270, 1-13. (rayyan-13565170). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.119871>
- Ortegon, K., Nies, L. F., & Sutherland, J. W. (2014). *The impact of maintenance and technology change on remanufacturing as a recovery alternative for used wind turbines*. 15, 182-188. (rayyan-8829180). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.042>
- O'Shea, A., Parakh, A., Rita Maria Lahoud, Hedgire, S., & Harisinghani, M. G. (2020). The evolution of iron oxide nanoparticles as MRI contrast agents. *MRS Advances*, 5(42), 2157-2168. (rayyan-13567979). <https://doi.org/10.1557/adv.2020.311>
- Ostovic, V. (2003). Memory motors. *IEEE Industry Applications Magazine*, 9(1), 52-61. <https://doi.org/10.1109/MIA.2003.1176459>
- Oti, S. E., & Awah, C. C. (2022). Influence of magnetic remanence and coercive force on the electromagnetic output of permanent magnet machine. *Progress in Electromagnetics Research M*, 109, 75-88. (rayyan-13566509). <https://doi.org/10.2528/pierm22012711>
- Ouyang, L., Huang, J., Wang, H., Liu, J., & Zhu, M. (2017). Progress of hydrogen storage alloys for Ni-MH rechargeable power batteries in electric vehicles : A review. *Materials Chemistry and Physics*, 200, 164-178. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.07.002>

- Ozawa, I., Kosaka, T., Matsui, N., & IEEE. (2009). Less rare-earth magnet-high power density hybrid excitation motor designed for hybrid electric vehicle drives. *Epe: 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Vols 1-9*, 4438-4447. (rayyan-13572578).
- Padekar, B. S., Raja, V. S., R. K. Singh Raman, Paul, L., Dieringa, H., Hort, N., & Kainer, K. (2011). Stress corrosion cracking of a new rare-earth containing magnesium alloy, Elektron21 compared with AZ91E. *Light Metals Technology V*, 690, 361-.. (rayyan-13571383).
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.690.361>
- Palmie, M., Miehe, L., Mair, J., & Wincent, J. (2024). Valuation entrepreneurship through product-design and blame-avoidance strategies: How tesla managed to change the public perception of sustainable innovations. *Journal of Product Innovation Management*, 41(3), 644-676. (rayyan-8827662). <https://doi.org/10.1111/jpim.12732>
- Pan, H., Ren, Y., Fu, H., Zhao, H., Wang, L., Meng, X., & Qin, G. (2016). Recent developments in rare-earth free wrought magnesium alloys having high strength: A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 663, 321-331. (rayyan-13570031). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.12.057>
- Panza, L., Bruno, G., & Lombardi, F. (2023). Integrating absolute sustainability and social sustainability in the digital product passport to promote industry 5.0. *Sustainability*, 15(16), 1-20. (rayyan-16055746). <https://doi.org/10.3390/su151612552>
- Papanek, V. J. (1972). *Design for the real world: Human ecology and social change* ([1 American ed.]). Pantheon Books.
- Pattison, M., Hansen, M., Bardsley, N., Elliott, C., Lee, K., Pattison, L., & Tsao, J. (2020). 2019 lighting R&D opportunities (DOE/EE--2008, 1618035, 8189; p. DOE/EE--2008, 1618035, 8189). <https://doi.org/10.2172/1618035>
- Paulson, L., & Büchs, M. (2022). Public acceptance of post-growth: Factors and implications for post-growth strategy. *Futures*, 143, 103020. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2022.103020>
- Pavel, C. C., Lacal-Arantequi, R., Marmier, A., Schueler, D., Tzimas, E., Buchert, M., Jenseit, W., & Blagoeva, D. (2017). Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines. *Resources Policy*, 52, 349-357. (rayyan-22497146).
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.04.010>

- Pavuluri, K., Yang, E., Ayyappan, V., Sonkar, K., Tan, Z., Tressler, C. M., Bo, S., Bibic, A., Glunde, K., & McMahon, M. T. (2022). Unlabeled aspirin as an activatable theranostic MRI agent for breast cancer. *Theranostics*, 12(4), 1937-1951. (rayyan-13566768). <https://doi.org/10.7150/thno.53147>
- Pearce, D. W., & Turner, R. K. (1989). *Economics of natural resources and the environment*. JHU Press.
- Peiro, L. T., Giron, A. C., & Durany, X. G. i. (2020). Examining the feasibility of the urban mining of hard disk drives. *Journal of Cleaner Production*, 248, 1-9. (rayyan-1284424007). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119216>
- Peng, P., She, J., Yang, Q., Long, S., Tang, A., Zhang, J., Dai, Q., & Pan, F. (2023). Bimodal grained Mg-0.5Gd-xMn alloys with high strength and low-cost fabricated by low-temperature extrusion. *Journal of Alloys and Compounds*, 935, 1-10. (rayyan-13565497). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168008>
- Petov, V., Babaevskaya, D., Taratkin, M., Chuvalov, L., Lusuardi, L., Misrai, V., Sukhanov, R., Scoffone, C. M. M., & Enikeev, D. (2022). Thulium fiber laser enucleation of the prostate : Prospective study of mid- and long-term outcomes in 1328 patients. *Journal of Endourology*, 36(9), 1231-1236. (rayyan-13566760). <https://doi.org/10.1089/end.2022.0029>
- Phadke, R. (2019). *Climate-smart mining : A conference report on the world bank's facility launch*. 6(4), 1373-1375. (rayyan-1279580125). <https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.10.004>
- Pham, N., Dahlin, B., Bobinski, M., Ozturk, A., & Fananapazir, G. (2019). Subclavian steal phenomenon diagnosed using TOF and ferumoxytol-enhanced neck MRA : A technical report. *Neurographics*, 9(4), 304-307. (rayyan-13568506). <https://doi.org/10.3174/ng.1800037>
- Pier Carlo Ricci. (2020). Assessment of crystalline materials for solid state lighting applications : Beyond the rare earth elements. *Crystals*, 10(7), 1-16. (rayyan-13567384). <https://doi.org/10.3390/cryst10070559>
- Pietron, D., Staab, P., & Hofmann, F. (2023). Digital circular ecosystems : A data governance approach. *Gaia-Ecological Perspectives for Science and Society*, 32, 40-46. (rayyan-16055744). <https://doi.org/10.14512/gaia.32.s1.7>
- Pini, M., Lolli, F., Balugani, E., Gamberini, R., Neri, P., Rimini, B., & Anna Maria Ferrari. (2019). Preparation for reuse activity of waste electrical and electronic equipment : Environmental performance, cost

- externality and job creation. *Journal of Cleaner Production*, 222, 77-89-89. (rayyan-1251264675).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.004>
- Prakht, V., Dmitrievskii, V., Kazakbaev, V., & Andriushchenko, E. (2021). Comparison of flux-switching and interior permanent magnet synchronous generators for direct-driven wind applications based on nelder-mead optimal designing. *Mathematics*, 9(7), 1-16. (rayyan-13566799).
<https://doi.org/10.3390/math9070732>
- Principi, P., & Fioretti, R. (2014). A comparative life cycle assessment of luminaires for general lighting for the office — compact fluorescent (CFL) vs light emitting diode (LED) — a case study. *Journal of Cleaner Production*, 83, 96-107. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.031>
- Psarommatis, F., May, G., & Tsai, W.-H. (2024). Digital product passport : A pathway to circularity and sustainability in modern manufacturing. *Sustainability*, 16(1), 1-24. (rayyan-16055742).
<https://doi.org/10.3390/su16010396>
- Radley, B. (2024). Conflict minerals inc. : War, profit and white saviourism in eastern Congo. *African Affairs*, 123(492), 419-421. <https://doi.org/10.1093/afraf/adae023>
- Radu, I., & Li, D. Y. (2007). The wear performance of yttrium-modified stellite 712 at elevated temperatures. *Tribology International*, 40(2), 254-265. (rayyan-13571674).
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.09.027>
- Raghuraman, B., Nategh, S., Sidiropoulos, N., Petersson, L., Boglietti, A., & IEEE. (2021). Sustainability aspects of electrical machines for E-mobility applications part I : A design with reduced rare-earth elements. *Iecon 2021 - 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 1-6. (rayyan-13567252). <https://doi.org/10.1109/iecon48115.2021.9589246>
- Rajaeifar, M. A., Ghadimi, P., Raugei, M., Wu, Y., & Heidrich, O. (2022). Challenges and recent developments in supply and value chains of electric vehicle batteries : A sustainability perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 180. (rayyan-1251265420).
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106144>
- Rakshita, M., & Haranath, D. (2024). Introduction to rare-earth free luminescent materials for light emitting diodes. In *Light-Emitting Diodes (LEDs) : Applications, Performance and Challenges* (p. 1-34). (rayyan-13565303).

- Ralph, N. (2021). A conceptual merging of circular economy, degrowth and conviviality design approaches applied to renewable energy technology. *Journal of Cleaner Production*, 319, 1-10. (rayyan-8828005). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128549>
- Ram Kumar, R. M., Fernandes, B. G., Zou, T., La Rocca, A., Vakil, G., Gerada, D., Walker, A., Gerada, C., Paciura, K., & McQueen, A. (2019). *High power high speed PM-assisted SynRel machines with ferrite and rare earth magnets for future electric commercial vehicles*. 2019, 1083-1088. (rayyan-13568205). <https://doi.org/10.1109/iecon.2019.8927523>
- Raminosoa, T., El-Refaie, A. M., Pan, D., Huh, K.-K., Alexander, J. P., Grace, K., Grubic, S., Galioto, S., Reddy, P. B., & Shen, X. (2015). Reduced rare-earth flux-switching machines for traction applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(4), 2959-2971. (rayyan-13570539). <https://doi.org/10.1109/tia.2015.2397173>
- Ratthanaphra, D., & Suwanmanee, U. (2019). Uncertainty analysis of environmental sustainability of biodiesel production using thai domestic rare earth oxide solid catalysts. *Sustainable Production and Consumption*, 1-13. (rayyan-726049907). <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.01.001>
- Reddy Bonthu, S. S., Arafat, A. K. M., & Choi, S. (2017). Comparisons of rare-earth and rare-earth-free external rotor permanent magnet assisted synchronous reluctance motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(12), 9729-9738. (rayyan-13569287). <https://doi.org/10.1109/tie.2017.2711580>
- Riba, J.-R., Lopez-Torres, C., Romeral, L., & Garcia, A. (2016). Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles : A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 367-379. (rayyan-13570027). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.121>
- Rimanoczy, I. (2020). *The sustainability mindset principles a guide to developing a mindset for a better world* (Routledge).
- Riofrancos, T. (2023). The security-sustainability nexus : Lithium onshoring in the global north. *Global Environmental Politics*, 23(1), 20-41. (rayyan-1279579689). https://doi.org/10.1162/glep_a_00668
- Rodrigo Ken Kawassaki, Romano, M., Mayara Klimuk Uchiyama, Roberta Mansini Cardoso, Baptista, M. S., Farsky, S. H. P., Khallil Taverna Chaim, Robson Raphael Guimaraes, & Araki, K. (2023). Novel

- gadolinium-free ultrasmall nanostructured positive contrast for magnetic resonance angiography and imaging. *Nano Letters*, 23(12), 5497-5505. (rayyan-13565839). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.3c00665>
- Runge, V. M., & Heverhagen, J. T. (2024). A new era in magnetic resonance contrast media. *Investigative Radiology*, 59(2), 105-107. (rayyan-13565152). <https://doi.org/10.1097/rli.0000000000001037>
- Sadowski, M., Perkins, L., & McGarvey, E. (2021). *Roadmap to net zero : Delivering science-based targets in the apparel sector*. <https://www.wri.org/research/roadmap-net-zero-delivering-science-based-targets-apparel-sector>
- Sakao, T., Golinska-Dawson, P., Vogt Duberg, J., Erik, S., Hidalgo-Crespo, J., Riel, A., Peeters, Jef, Green, Aaron, Mathieux, & Fabrice. (2023). *Product-as-a-service for critical raw materials : Challenges, enablers, and needed research*. (rayyan-1251265467).
- Sakurai, M., Wang, R., Liao, T., Zhang, C., Sun, H., Sun, Y., Wang, H., Zhao, X., Wang, S., Balasubramanian, B., Xu, X., Sellmyer, D. J., Antropov, V., Zhang, J., Wang, C.-Z., Ho, K.-M., & Chelikowsky, J. R. (2020). Discovering rare-earth-free magnetic materials through the development of a database. *Physical Review Materials*, 4(11), 1-17. (rayyan-13567443). <https://doi.org/10.1103/physrevmaterials.4.114408>
- Salazar, D., Martin-Cid, A., Madugundo, R., Barandiaran, J. M., & Hadjipanayis, G. C. (2018). Coercivity enhancement in heavy rare earth-free NdFeB magnets by grain boundary diffusion process. *Applied Physics Letters*, 113(15), 1-5. (rayyan-13568661). <https://doi.org/10.1063/1.5043389>
- Salim, H., Sahin, O., Elsayah, S., Turan, H., & Stewart, R. A. (2022). A critical review on tackling complex rare earth supply security problem. *Resources Policy*, 77. (rayyan-1251264376). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102697>
- Satya Kamal Chirauri, Rakshita, M., & Haranath, D. (2022). An insights into non-RE doped materials for opto-electronic display applications. In *Emerging materials: Design, characterization and applications* (p. 433-472). (rayyan-13566221). https://doi.org/10.1007/978-981-19-1312-9_12
- Schleich, J., Durand, A., & Brugger, H. (2021). How effective are EU minimum energy performance standards and energy labels for cold appliances? *Energy Policy*, 149, 112069. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112069>

- Schloer, H., Venghaus, S., Zapp, P., Marx, J., Schreiber, A., & J. -Fr. Hake. (2018). The energy-mineral-society nexus—A social LCA model. *Applied Energy*, 1-10. (rayyan-1284422380). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.048>
- Schmid, M. (2019). Mitigating supply risks through involvement in rare earth projects : Japan's strategies and what the US can learn. *Resources Policy*, 63, 101457. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101457>
- Schoenung, J. M., & Olivetti, E. A. (2023). Sustainable development of materials : Broadening stakeholder engagement. *MRS Bulletin*, 48(4), 362-367-367. (rayyan-1251263741). <https://doi.org/10.1557/s43577-023-00521-8>
- Schubert, T., Motosugi, U., Kinner, S., Colgan, T. J., Sharma, S. D., Hetzel, S., Wells, S., Campo, C. A., & Reeder, S. B. (2017). Crossover comparison of ferumoxytol and gadobenate dimeglumine for abdominal MR-angiography at 3.0 tesla : Effects of contrast bolus length and flip angle. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 45(6), 1617-1626. (rayyan-13569296). <https://doi.org/10.1002/jmri.25513>
- Secinaro, S., Calandra, D., Lanzalonga, F., & Ferraris, A. (2022). Electric vehicles? consumer behaviours : Mapping the field and providing a research agenda. *Journal of Business Research*, 150, 399-416. (rayyan-8827867). <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.06.011>
- Serrano-Ruiz, J. C., Sepúlveda-Escribano, A., & Rodríguez-Reinoso, F. (2007). Bimetallic PtSn/C catalysts promoted by ceria : Application in the nonoxidative dehydrogenation of isobutane. *Journal of Catalysis*, 246(1), 158-165. (rayyan-13571667). <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2006.12.004>
- Sharma, V., Pattanaik, S., Parmar, H., & Ramanujan, V. R. (2018). Magnetocaloric properties and magnetic cooling performance of low-cost Fe₇₅- x Cr x Al₂₅ alloys. *MRS Communications*, 8(3), 988-994. (rayyan-13568900). <https://doi.org/10.1557/mrc.2018.122>
- Shenton, M. E., Hamoda, H. M., Schneiderman, J. S., Bouix, S., Pasternak, O., Rath, Y., Vu, M.-A., Purohit, M. P., Helmer, K., Koerte, I., Lin, A. P., Westin, C.-F., Kikinis, R., Kubicki, M., Stern, R. A., & Zafonte, R. (2012). A review of magnetic resonance imaging and diffusion tensor imaging findings

- in mild traumatic brain injury. *Brain Imaging and Behavior*, 6(2), 137-192.
<https://doi.org/10.1007/s11682-012-9156-5>
- Shi, Q., & Allison, J. (2024). *An experimental study on twinning behavior in Mg alloys with different solute elements*. 69-71. (rayyan-13565157). https://doi.org/10.1007/978-3-031-50240-8_15
- Shi, Q., Anirudh Raju Natarajan, Anton Van Der Ven, & Allison, J. (2023). Partitioning of Ca to metastable precipitates in a Mg-rare earth alloy. *Materials Research Letters*, 11(3), 222-230. (rayyan-13572421). <https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2138724>
- Shi, Y. G., Wang, L., Zheng, W. G., Chen, Z. Y., & Shi, D. N. (2017). Effects of Co substitution for Fe on the structural and magnetostrictive properties of melt-spun Tb_{0.2}Nd_{0.8}Fe_{1.9} ribbons. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 433, 116-119. (rayyan-13569397).
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.03.013>
- Siddi, M., & Prandin, F. (2023). Governing the EU's energy crisis : The European commission's geopolitical turn and its pitfalls. *Politics and Governance*, 11(4), 286-296. (rayyan-1279579615).
<https://doi.org/10.17645/pag.v11i4.7315>
- Siderius, H.-P. (2013). The role of experience curves for setting MEPS for appliances. *Energy Policy*, 59, 762-772-772. (rayyan-9601138). <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.032>
- Silfver, M., Niva, M., Salmivaara, L., & Vainio, A. (2023). Moral foundations and future pro-environmental lifestyles choices in the finnish population. *Journal of Community & Applied Social Psychology*, 33(4), 985-1001. (rayyan-8827766). <https://doi.org/10.1002/casp.2687>
- Siraj Ul, H., Khan, I., & Hong, J. (2024). Finite temperature properties of rare earth free Fe₄CoSi permanent magnet. *Current Applied Physics*, 63, 66-71. (rayyan-13565191).
<https://doi.org/10.1016/j.cap.2024.03.010>
- Sirisathitkul, C. (2020). Recent developments of manganese-aluminium as rare-earth-free magnets. *Advances in Materials Research-an International Journal*, 9(4), 323-335. (rayyan-13567877).
<https://doi.org/10.12989/amr.2020.9.4.323>
- Siva Pratap Reddy Mallem, Im, K.-S., Lee, J.-H., Park, C., & Bathalavaram, P. (2019). Trichromophore-doped cassava-based biopolymer as low-cost and eco-friendly luminous material for bio hybrid

- white-light-emitting diodes by dual-FRET process. *Optical Materials*, 95, 1-8. (rayyan-13568532). <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109270>
- Sjokvist, S., Eklund, P., & Eriksson, S. (2016). Determining demagnetisation risk for two PM wind power generators with different PM material and identical stators. *IET Electric Power Applications*, 10(7), 593-597. (rayyan-13572510). <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2015.0518>
- Skomski, R., & Coey, J. M. D. (1993). Giant energy product in nanostructured two-phase magnets. *Physical Review B*, 48(21), 15812-15816. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.48.15812>
- Slotman, D. J., Bartels, L. W., Zijlstra, A., Verpalen, I. M., Jochen A. C. Van Osch, Nijholt, I. M., Heijman, E., Miranda Van 'T Veer-ten Kate, Erwin De Boer, Rolf D. Van Den Hoed, Froeling, M., & Boomsma, M. F. (2023). Diffusion-weighted MRI with deep learning for visualizing treatment results of MR-guided HIFU ablation of uterine fibroids. *European Radiology*, 33(6), 4178-4188. (rayyan-13565589). <https://doi.org/10.1007/s00330-022-09294-1>
- Soderžnik, M., Korent, M., Žagar Soderžnik, K., Katter, M., Üstüner, K., & Kobe, S. (2016). High-coercivity Nd-Fe-B magnets obtained with the electrophoretic deposition of submicron TbF₃ followed by the grain-boundary diffusion process. *Acta Materialia*, 115, 278-284. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.003>
- Soderžnik, M., Rožman, K. Ž., Kobe, S., & McGuinness, P. (2012). The grain-boundary diffusion process in Nd—Fe—B sintered magnets based on the electrophoretic deposition of DyF₃. *Intermetallics*, 23, 158-162. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.11.014>
- Somekawa, H., Yoshiaki Osawa, Alok Singh, & Toshiji Mukai. (2009). Rare-earth free wrought-processed magnesium alloy with dispersion of quasicrystal phase. *Scripta Materialia*, 61(7), 705-708. (rayyan-13571533). <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.06.008>
- Sone, K., Takemoto, M., Ogasawara, S., Takezaki, K., & Hino, W. (2014). Consideration of 10kW in-wheel type axial-gap motor using ferrite permanent magnets. 3525-3531. (rayyan-13570668). <https://doi.org/10.1109/ipeec.2014.6870003>
- Song, H., Wang, C., Sun, K., Geng, H., & Zuo, L. (2023). Material efficiency strategies across the industrial chain to secure indium availability for global carbon neutrality. *Resources Policy*, 85, 1-19. (rayyan-8827760). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103895>

- Soyer, P., Mourad Boudiaf, Vinciane Placé, Marc Sirol, Karine Pautrat, Alexandre Vignaud, Fabrice Staub, Djamel Tiah, Lounis Hamzi, Florent Duchat, Yann Fargeaudou, & Marc Pocard. (2011). Preoperative detection of hepatic metastases : Comparison of diffusion-weighted, T2-weighted fast spin echo and gadolinium-enhanced MR imaging using surgical and histopathologic findings as standard of reference. *European Journal of Radiology*, 80(2), 245-252. (rayyan-13571371). <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2010.06.027>
- Spiekman, L., & Piehler, D. (2011). Semiconductor optical amplifiers for metro and access networks. In *Optically amplified WDM networks* (p. 387-416). (rayyan-13571379). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-374965-9.10014-7>
- Starekova, J., Nagle, S. K., Schiebler, M. L., Reeder, S. B., & Meduri, V. N. (2023). Pulmonary MRA during pregnancy : Early experience with ferumoxytol. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 57(6), 1815-1818. (rayyan-13565968). <https://doi.org/10.1002/jmri.28504>
- Stoumpos, S., Tan, A., Pauline Hall Barrientos, Stevenson, K., Thomson, P. C., Kasthuri, R., Radjenovic, A., Kingsmore, D. B., Roditi, G., & Mark, P. B. (2020). Ferumoxytol MR angiography versus duplex US for vascular mapping before arteriovenous fistula surgery for hemodialysis. *Radiology*, 297(1), 214-222. (rayyan-13567563). <https://doi.org/10.1148/radiol.2020200069>
- Stromp, T. A., Leung, S. W., Andres, K. N., Jing, L., Fornwalt, B. K., Charnigo, R. J., Sorrell, V. L., & Vandsburger, M. H. (2015). Gadolinium free cardiovascular magnetic resonance with 2-point cine balanced steady state free precession. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, 17, 1-11. (rayyan-13570321). <https://doi.org/10.1186/s12968-015-0194-1>
- Su, B., Heshmati, A., Geng, Y., & Yu, X. (2013). A review of the circular economy in China : Moving from rhetoric to implementation. *Journal of Cleaner Production*, 42, 215-227. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.020>
- Suemasu, T., Vila, L., & Attane, J.-P. (2021). Present status of rare-earth free ferrimagnet Mn₄N and future prospects of Mn₄N-based compensated ferrimagnets. *Journal of the Physical Society of Japan*, 90(8). (rayyan-13567210). <https://doi.org/10.7566/jpsj.90.081010>
- Sun, C., Katarzyna Swirk Da Costa, Wierzbicki, D., Motak, M., Grzybek, T., & Patrick Da Costa. (2021). On the effect of yttrium promotion on Ni-layered double hydroxides-derived catalysts for

- hydrogenation of CO₂ to methane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(22), 12169-12179. (rayyan-13567197). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.202>
- Sun, W., He, Y., Qiao, X., Zhao, X., Chen, H., Gao, N., Starink, M. J., & Zheng, M. (2023). Exceptional thermal stability and enhanced hardness in a nanostructured Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy processed by high pressure torsion. *Journal of Magnesium and Alloys*, 11(12), 4589-4602. (rayyan-13565661). <https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.04.003>
- Tahanian, H., Aliahmadi, M., & Faiz, J. (2020). Ferrite permanent magnets in electrical machines: Opportunities and challenges of a non-rare-earth alternative. *IEEE Transactions on Magnetics*, 56(3). (rayyan-13567561). <https://doi.org/10.1109/tmag.2019.2957468>
- Takeno, M., Chiba, A., Hoshi, N., Ogasawara, S., Takemoto, M., & Azizur Rahman, M. (2012). Test results and torque improvement of the 50-kW switched reluctance motor designed for hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(4), 1327-1334. (rayyan-13571221). <https://doi.org/10.1109/tia.2012.2199952>
- Takeno, M., Chiba, A., Hoshi, N., Ogasawara, S., Takemoto, M., & IEEE. (2011). Power and efficiency measurements and design improvement of a 50kW witched reluctance motor for hybrid electric vehicles. *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (Ecce)*, 1495-1501. (rayyan-13572572). <https://doi.org/10.1109/ECCE.2011.6063958>
- Tang, W., Zhou, G., Shao, Y., Li, D., Peng, Y., & Wang, H. (2020). On the role of yttrium in microstructure evolution and texture modification during magnesium alloy extrusion. *Materials Characterization*, 162, 1-10. (rayyan-13567751). <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110189>
- Thejas, K. K., Abraham, M., Kunti, A. K., Tchernycheva, M., Ahmad, S., & Das, S. (2021). Review on deep red-emitting rare-earth free germanates and their efficiency as well as adaptability for various applications. *Applied Materials Today*, 24, 1-26. (rayyan-13567225). <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101094>
- Thieffry, P. (2009). « La nouvelle hiérarchie des modes de gestion des déchets : Une normativité peu propice à l'analyse du cycle de vie ? ». *Environnement*, (Étude 12).
- Thomsen, H. S. (2017). Are the increasing amounts of gadolinium in surface and tap water dangerous? *Acta Radiologica*, 58(3), 259-263. <https://doi.org/10.1177/0284185116666419>

- Turner, T., Fursov, K., & Nefedova, A. (2022). Early adopters of new transportation technologies : Attitudes of Russia's population towards car sharing, the electric car and autonomous driving. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 155, 403-417. (rayyan-8827860). <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.11.006>
- Tian, Z. (2024). China's due diligence legislation for environmental governance on transnational corporations : History and future. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 66(3), 7-25. <https://doi.org/10.1080/00139157.2024.2319570>
- Tolpygo, V. K. (1999). The morphology of thermally grown α -Al₂O₃ scales on Fe-Cr-Al alloys. *Oxidation of Metals*, 51(5), 449-477. (rayyan-13572031). <https://doi.org/10.1023/a:1018839227090>
- Tolpygo, V. K., & Grabke, H. J. (1994). Microstructural characterization and adherence of α -Al₂O₃ oxide scales on Fe-Cr-Al and Fe-Cr-Al-Y alloys. *Oxidation of Metals*, 41(5), 343-364. (rayyan-13572307). <https://doi.org/10.1007/bf01113370>
- Tomse, T., Samardzija, Z., Scherf, L., Kessler, R., Kobe, S., Zuzek Rozman, K., & Sturm, S. (2020). A spark-plasma-sintering approach to the manufacture of anisotropic Nd-Fe-B permanent magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 502, 1-11. (rayyan-13567294). <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166504>
- Toth, G. B., Varallyay, C. G., Horvath, A., Bashir, M. R., Choyke, P. L., Daldrop-Link, H. E., Dosa, E., Finn, J. P., Gahramanov, S., Harisinghani, M., Macdougall, I., Neuwelt, A., Vasanawala, S. S., Ambady, P., Barajas, R., Cetas, J. S., Ciporen, J., DeLoughery, T. J., Doolittle, N. D., ... Neuwelt, E. A. (2017). Current and potential imaging applications of ferumoxytol for magnetic resonance imaging. *Kidney International*, 92(1), 47-66. <https://doi.org/10.1016/j.kint.2016.12.037>
- Tozman, P., Sepehri-Amin, H., Ohkubo, T., & Hono, K. (2021). Intrinsic magnetic properties of (Sm,Gd)Fe₁₂ -based compounds with minimized addition of Ti. *Journal of Alloys and Compounds*, 855, 1-8. (rayyan-13567073). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157491>
- Tozman, P., Venkatesan, M., & Coey, J. (2015). Enhanced energy product in magnets intermediate between Nd-Fe-B and ferrite. (rayyan-13570314). 2015 IEEE International Magnetism Conference, INTERMAG 2015. <https://doi.org/10.1109/intmag.2015.7157187>

- Tröster, B., Papatheophilou, S., & Küblböck, K. (2024). *In search of critical raw materials : What will the EU critical raw materials act achieve? An analysis of legal and factual implications of the CRMA*. Austrian Foundation for Development Research. <https://doi.org/10.60637/2024-RR18>
- Turgut, Z., Shen, Y., Leontsev, S., Horwath, J. C., & Semiatin, S. L. (2016). Anisotropic α -Fe/Nd-Fe-B exchange-spring magnets produced by high-pressure crystallization. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(7), 1-4. (rayyan-13569766). <https://doi.org/10.1109/tmag.2016.2524547>
- Ul-Haq, S., Khan, I., & Jisang, H. (2023). Large energy product of rare earth free Fe₃MnC₂ alloy permanent magnet. *Scripta Materialia*, 237, 1-6. (rayyan-13565803). <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2023.115710>
- Utochnikova, V. V. (2021). Chapter 318—Lanthanide complexes as OLED emitters. In J.-C. G. Bünzli & V. K. Pecharsky (Éds.), *Handbook on the physics and chemistry of rare earths* (Vol. 59, p. 1-91). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.hpcr.2021.05.001>
- Varallyay, C. G., Toth, G. B., Fu, R., Netto, J. P., Firkins, J., Ambady, P., & Neuwelt, E. A. (2017). What does the boxed warning tell us? Safe practice of using ferumoxytol as an MRI contrast agent. *American Journal of Neuroradiology*, 38(7), 1297-1302. (rayyan-13569697). <https://doi.org/10.3174/ajnr.a5188>
- Vasilenko, D. Yu., Shitov, A. V., Popov, A. G., Gaviko, V. S., Bratushev, D. Yu., Podkorytov, K. I., & Golovnya, O. A. (2022). Magnetic hysteresis properties and microstructure of high-coercivity (Nd,Dy)—Fe—B magnets with Dy less than 10 wt % and low oxygen. *Physics of Metals and Metallography*, 123(2), 145-154. <https://doi.org/10.1134/S0031918X22020107>
- Vatamanescu, E.-M., Nicolescu, L., Gazzola, P., & Amelio, S. (2023). Integrating smart mobility and electric car sharing adoption in a common framework : Antecedents and mediators. *Journal of Cleaner Production*, 418, 1-12. (rayyan-8827752). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138254>
- Venkatesan, S., Meher Abhinav, E., Kavita, S., Pavan Kumar, N., Manivel Raja, M., Sivaprahasam, D., & Perumal, S. (2021). Enhanced refrigeration capacity of rare-earth-free Ni-Co-Mn-In-Si heusler alloys for magnetic refrigerants. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 10(9), 1-8. (rayyan-13566931). <https://doi.org/10.1149/2162-8777/ac2323>

- Vipin Kumar Sharma, & Kumar, V. (2019). Development of rare-earth oxides based hybrid AMCs reinforced with SiC/Al₂O₃: Mechanical & metallurgical characterization. *Journal of Materials Research and Technology-Jmr&t*, 8(2), 1971-1981. (rayyan-13568067). <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.013>
- Viswanathan, S., Kovacs, Z., Green, K. N., S. James Ratnakar, & A. Dean Sherry. (2010). Alternatives to gadolinium-based metal chelates for magnetic resonance imaging. *Chemical Reviews*, 110(5), 2960-3018. (rayyan-13571410). <https://doi.org/10.1021/cr900284a>
- Vogel, C. (2022). *Conflict minerals inc: War, profit and white saviourism in eastern Congo*. Hurst & company IAI, International African institute.
- Voscort, J., Monhof, M., & Becker, J. (2018). *A product-service system configurator for repurposing used electric vehicle batteries*. (rayyan-8828673). 26th European Conference on Information Systems: Beyond Digitization - Facets of Socio-Technical Change, ECIS 2018.
- Walden, J., Steinbrecher, A., & Marinkovic, M. (2021). Digital product passports as enabler of the circular economy. *Chemie Ingenieur Technik*, 93(11), 1717-1727. (rayyan-16055750). <https://doi.org/10.1002/cite.202100121>
- Wallerstein, I. (2011). *The Modern World-System I: Capitalist Agriculture and the Origins of the European World-Economy in the Sixteenth Century*. University of California Press. <https://books.google.fr/books?id=JZqhKZ9uccOC>
- Walsh, Prof. F. C., Dr. Carlos Ponce De León, Dr. Len Berlouis, Dr. George Nikiforidis, Arenas-Martínez, L. F., Dr. David Hodgson, & Dr. David Hall. (2015). The development of Zn—Ce hybrid redox flow batteries for energy storage and their continuing challenges. *ChemPlusChem*. (rayyan-16292797). <https://doi.org/10.1002/cplu.201402103>
- Walter Leal Filho, Kotter, R., Pinar Goekcin Ozuyar, Ismaila Rimi Abubakar, Joao Henrique Paulino Pires Eustachio, & Matandirotya, N. R. (2023). Understanding rare earth elements as critical raw materials. *Sustainability*, 15(3), 1-18. (rayyan-8827814). <https://doi.org/10.3390/su15031919>
- Wan, Y. C., Jiang, S. N., Liu, C. M., Wang, B. Z., & Chen, Z. Y. (2015). Effect of Nd and Dy on the microstructure and mechanical property of the as extruded Mg-1Zn-0.6Zr alloy. *Materials*

- Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 625, 158-163. (rayyan-13570305). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.003>
- Wang, C., Song, J., Ao, Z., Yang, S., Li, Y., Li, X., Zhu, N., Chen, Q., & Li, Z. (2024). High-gain waveguide amplifiers in Ge₂₅ Sb₁₀ S₆₅ photonics heterogeneous integration with erbium-doped Al₂ O₃ thin films. *Laser & Photonics Reviews*, 18(3). (rayyan-13565198). <https://doi.org/10.1002/lpor.202300893>
- Wang, E., Xiao, C., He, J., Lu, C., Hussain, M., Tang, R., Zhou, Q., & Liu, Z. (2021). Grain boundary modification and properties enhancement of sintered Nd-Fe-B magnets by ZnO solid diffusion. *Applied Surface Science*, 565, 1-8. (rayyan-13567053). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150545>
- Wang, J., Jiang, Y., Mehedi, M. A., Liu, J., Wu, Y., & Ma, B. (2018). *Fe₁₆N₂: From a 40-year mystery of magnetic materials to one of promises for rare-earth-free magnets*. (rayyan-13568818). 2018 IEEE International Magnetic Conference, INTERMAG 2018. <https://doi.org/10.1109/intmag.2018.8508460>
- Wang, J.-P. (2020). Environment-friendly bulk Fe₁₆ N₂ permanent magnet : Review and prospective. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 497, 1-8. (rayyan-13567545). <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165962>
- Wang, M., Yu, H. L., Chen, Y., & Huang, M. X. (2021). Machine learning assisted screening of non-rare-earth elements for Mg alloys with low stacking fault energy. *Computational Materials Science*, 196, 1-10. (rayyan-13567082). <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.110544>
- Wang, N., Liu, Y., Zhang, H., Chen, X., & Li, Y. (2016). Fabrication, magnetostriction properties and applications of Tb-Dy-Fe alloys : A review. *China Foundry*, 13(2), 75-84. (rayyan-13569866). <https://doi.org/10.1007/s41230-016-5114-y>
- Wang, S., Heping Zhou, & Yuping Kang. (2003). The influence of rare earth elements on microstructures and properties of 6061 aluminum alloy vacuum-brazed joints. *Journal of Alloys and Compounds*, 352(1), 79-83. (rayyan-13571843). [https://doi.org/10.1016/s0925-8388\(02\)01117-9](https://doi.org/10.1016/s0925-8388(02)01117-9)

- Wang, S., Pan, H., Xie, D., Zhang, D., Li, J., Xie, H., Ren, Y., & Qin, G. (2023). Grain refinement and strength enhancement in Mg wrought alloys : A review. *Journal of Magnesium and Alloys*, 11(11), 4128-4145. (rayyan-13565672). <https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.11.002>
- Wang, X., Wu, Z., Li, B., Chen, W., Zhang, J., & Mao, J. (2024). Inclusions modification by rare earth in steel and the resulting properties : A review. *Journal of Rare Earths*, 42(3), 431-445. (rayyan-13565200). <https://doi.org/10.1016/j.jre.2023.04.015>
- Wang, Y., Li, L., Wang, Y., Patrick Da Costa, & Hu, C. (2019). Highly carbon-resistant Y doped NiO-ZrO₂ catalysts for dry reforming of methane. *Catalysts*, 9(12), 1-13. (rayyan-13568208). <https://doi.org/10.3390/catal9121055>
- Wani, M. M., Sriprasad, S., Bhat, T., & Madaan, S. (2020). Is thulium laser enucleation of prostate an alternative to holmium and TURP surgeries—A systematic review? *Turkish Journal of Urology*, 46(6), 419-426. (rayyan-13567674). <https://doi.org/10.5152/tud.2020.20202>
- Ward, K. M., Aletras, A. H., & Balaban, R. S. (2000). A new class of contrast agents for MRI based on proton chemical exchange dependent saturation transfer (CEST). *Journal of Magnetic Resonance*, 143(1), 79-87. <https://doi.org/10.1006/jmre.1999.1956>
- Wee, J.-H., & Lee, K.-Y. (2006). Overview of the effects of rare-earth elements used as additive materials in molten carbonate fuel cell systems. *Journal of Materials Science*, 41(12), 3585-3592. (rayyan-13571689). <https://doi.org/10.1007/s10853-005-5551-2>
- Wei, H., Bruns, O. T., Kaul, M. G., Hansen, E. C., Barch, M., Wisniowska, A., Chen, O., Chen, Y., Li, N., Okada, S., Cordero, J. M., Heine, M., Farrar, C. T., Montana, D. M., Adam, G., Ittrich, H., Jasanoff, A., Nielsen, P., & Bawendi, M. G. (2017). Exceedingly small iron oxide nanoparticles as positive MRI contrast agents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(9), 2325-2330. (rayyan-13569405). <https://doi.org/10.1073/pnas.1620145114>
- Werker, J., Wulf, C., Zapp, P., Schreiber, A., & Marx, J. (2019). Social LCA for rare earth NdFeB permanent magnets. *Sustainable Production and Consumption*, 19, 257-269-269. (rayyan-1251265414). <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.07.006>

- Wesolowski, J. R., & Kaiser, A. (2016). Alternatives to GBCA : Are we there yet? *Topics in Magnetic Resonance Imaging*, 25(4), 171-175. (rayyan-13569762).
<https://doi.org/10.1097/rmr.0000000000000096>
- Wicki, M., Bruckmann, G., & Bernauer, T. (2022). How to accelerate the uptake of electric cars ? Insights from a choice experiment. *Journal of Cleaner Production*, 355, 1-10. (rayyan-8827885).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131774>
- Wiedmann, T., Lenzen, M., Keyßer, L. T., & Steinberger, J. K. (2020). Scientists' warning on affluence. *Nature Communications*, 11(1), 3107. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16941-y>
- Wilburn, D. R. (2012). *Byproduct metals and rare-earth elements used in the production of light-emitting diodes—Overview of principal sources of supply and material requirements for selected markets*.
- Willbold, E., Gu, X., Albert, D., Kalla, K., Bobe, K., Brauneis, M., Janning, C., Nellesen, J., Czayka, W., Tillmann, W., Zheng, Y., & Witte, F. (2015). Effect of the addition of low rare earth elements (lanthanum, neodymium, cerium) on the biodegradation and biocompatibility of magnesium. *Acta Biomaterialia*, 11, 554-562. (rayyan-13570307). <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2014.09.041>
- Wilson, C. R., Hardy, L. A., Irby, P. B., Fried, N. M., Choi, B., Kollias, N., Zeng, H., Kang, H., Wong, B., Ilgner, J., Tearney, G., Gregory, K., Marcu, L., Skala, M., Campagnola, P., & Mandelis, A. (2016). Proximal fiber tip damage during holmium : YAG and thulium fiber laser ablation of kidney stones. *Photonic Therapeutics and Diagnostics Xii*, 9689, 1-6. (rayyan-13570019).
<https://doi.org/10.1117/12.2207895>
- Wilson, C. R., Kennedy, J. D., Irby, P. B., Fried, N. M., Kang, H., & Chan, K. (2017). Anti-reflection coated optical fibers for use in thulium fiber laser lithotripsy. *Therapeutics and Diagnostics in Urology: Lasers, Robotics, Minimally Invasive, and Advanced Biomedical Devices*, 10038, 1-6. (rayyan-13569275). <https://doi.org/10.1117/12.2247595>
- Wong, Y. J., Chang, H. W., Lee, Y. I., Chang, W. C., Chiu, C. H., & Mo, C. C. (2023). High-coercivity heavy-rare-earth-free NdFeB sintered magnets developed by doping Ce₈₅ Al₁₅ and grain boundary diffusion with Pr₇₀ Cu₁₅ Al₁₅. *AIP Advances*, 13(2), 1-6. (rayyan-13565677).
<https://doi.org/10.1063/9.0000446>

- Wu, Q., Ma, X., Yue, M., Cong, L., Ma, Z., Zhang, D., Li, Y., & Wang, Y. (2021). Tip interface exchange-coupling based on « Bi-anisotropic » nanocomposites with low rare-earth content. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(11), 13548-13555. (rayyan-13567272). <https://doi.org/10.1021/acsami.0c21669>
- Wu, T., Cao, S., Kou, M., Xie, Y., Ding, G., Guo, S., Zheng, B., Chen, R., Zhong, M., & Yan, A. (2023). Magnetic performance and microstructure of NdFeB sintered magnet by diffusing Tb₁₀Pr_{90-x}(Cu,Al,Ga)_x alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 934, 1-9. (rayyan-13565810). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167888>
- Wu, W., Zhu, X., Quan, L., Xiang, Z., Fan, D., Yang, S., & IEEE. (2016). Performance evaluation of a U-shaped less-rareearth hybrid permanent magnet assisted synchronous reluctance motor. *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (Vppc)*. (rayyan-13572516). <https://doi.org/10.1109/VPPC.2016.7791748>
- Xia, W., Sakurai, M., Balasubramanian, B., Liao, T., Wang, R., Zhang, C., Sun, H., Ho, K.-M., Chelikowsky, J. R., Sellmyer, D. J., & Wang, C.-Z. (2022). Accelerating the discovery of novel magnetic materials using machine learning-guided adaptive feedback. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(47), 1-7. (rayyan-13566203). <https://doi.org/10.1073/pnas.2204485119>
- Xinjie, F., Lixin, S., & Jiacheng, L. (2014). Radiation induced color centers in cerium-doped and cerium-free multicomponent silicate glasses. *Journal of Rare Earths*, 32(11), 1037-1042. (rayyan-13570855). [https://doi.org/10.1016/s1002-0721\(14\)60180-0](https://doi.org/10.1016/s1002-0721(14)60180-0)
- Xu, G., Yano, J., & Sakai, S. (2016). Scenario analysis for recovery of rare earth elements from end-of-life vehicles. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 1-14. (rayyan-726050814). <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0487-y>
- Xu, K., Liu, J.-C., Wang, W.-W., Zhou, L.-L., Ma, C., Guan, X., Wang, F. R., Li, J., Jia, C.-J., & Yan, C.-H. (2024). Catalytic properties of trivalent rare-earth oxides with intrinsic surface oxygen vacancy. *Nature Communications*, 15(1), 5751. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49981-9>
- Xu, X. D., Dong, Z. J., Sasaki, T. T., Tang, X., Sepehri-Amin, H., Ohkubo, T., & Hono, K. (2019). Influence of Ti addition on microstructure and magnetic properties of a heavy-rare-earth-free Nd-Fe-B

- sintered magnet. *Journal of Alloys and Compounds*, 806, 1267-1275. (rayyan-13568212). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.289>
- Yamasaki, M., Mitsuru Komori, Eiji Akiyama, Hiroki Habazaki, Asahi Kawashima, Katsuhiko Asami, & Koji Hashimoto. (1999). CO₂ methanation catalysts prepared from amorphous Ni—Zr—Sm and Ni—Zr—misch metal alloy precursors. *Materials Science and Engineering A*, 267(2), 220-226. (rayyan-13572015). [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(99\)00095-7](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(99)00095-7)
- Yan, K., Vu, K., & Madden, S. (2015). Internal gain in Er-doped As₂S₃ chalcogenide planar waveguides. *Optics Letters*, 40(5), 796-799. <https://doi.org/10.1364/OL.40.000796>
- Yanagisawa, T., Yoshida, Y., & Tajima, K. (2020). Study on asymmetric magnetic pole structure for ipm motor using neodymium bonded magnet. *Journal of the Magnetism Society of Japan*, 44(2), 45-51. (rayyan-13567898). <https://doi.org/10.3379/msjmag.2003r005>
- Yang, C., Zhang, Z., Hu, G., Cao, R., Liang, X., & Xiang, W. (2017). A novel deep red phosphor Ca₁₄Zn₆Ga₁₀O₃₅:Mn⁴⁺ as color converter for warm W-LEDs : Structure and luminescence properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 694, 1201-1208. (rayyan-13569257). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.162>
- Yang, S., Dong, C., Song, C., Liao, W., He, Z., Jiang, S., Sun, C., Wang, Y., & Xiong, Y. (2023). Femtosecond laser lithotripsy : A novel alternative for kidney stone treatment? Evaluating the safety and effectiveness in an ex vivo study. *Urolithiasis*, 51(1), 1-10. (rayyan-13565666). <https://doi.org/10.1007/s00240-023-01493-9>
- Yu, X., Lin, G., Zhang, Z., & Xie, J. (2020). Electronic structure characteristics of Fe-6.5 wt%Si alloy doped with rare earth elements and its effect on mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 843, 1-15. (rayyan-13567535). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155916>
- Yu, X. & Yangshan Sun. (2003). The oxidation improvement of Fe₃Al based alloy with cerium addition at temperature above 1000°C. *Materials Science and Engineering A*, 363(1), 30-39. (rayyan-13571845). [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(03\)00468-4](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(03)00468-4)
- Yu, Z., Xu, X., Shi, K., Du, B., Han, X., Xiao, T., Li, S., Liu, K., & Du, W. (2023). Development and characteristics of a low rare-earth containing magnesium alloy with high strength-ductility

- synergy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 11(5), 1629-1642. (rayyan-13565585).
<https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.01.005>
- Yuan, H., Massuyeau, F., Gautier, N., Kama, A. B., Faulques, E., Chen, F., Shen, Q., Zhang, L., Paris, M., & Gautier, R. (2020). Doped lead halide white phosphors for very high efficiency and ultra-high color rendering. *Angewandte Chemie International Edition*, 59(7), 2802-2807.
<https://doi.org/10.1002/anie.201910180>
- Yunyun, C., Tongle, C., Xiaoyong, Z., & Yu, D. (2022). Optimization of a new asymmetric-hybrid-PM machine with high torque density and low torque ripple considering the difference of magnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 58(2), 1-5. (rayyan-13566550).
<https://doi.org/10.1109/tmag.2021.3086859>
- Zeng, X., Li, J., Stevels, A. L. N., & Liu, L. (2013). Perspective of electronic waste management in China based on a legislation comparison between china and the EU. *Journal of Cleaner Production*, 51, 80-87-87. (rayyan-1251264707). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.030>
- Zerbst, U., Madia, M., Klinger, C., Bettge, D., & Murakami, Y. (2019). Defects as a root cause of fatigue failure of metallic components. II : Non-metallic inclusions. *Engineering Failure Analysis*, 98, 228-239. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.054>
- Zhang, D., Li, B., Du, C., Wen, K., Niu, T., Li, T., Li, Z., & Zhang, J. (2023). Development of low rare-earth containing magnesium alloy with high strength-ductility synergy by engineering nano-spaced lamellae. *Journal of Materials Research and Technology-Jmr&t*, 27, 7233-7243. (rayyan-13565587). <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.181>
- Zhang, D., Yang, Q., Guan, K., Li, B., Wang, N., Qin, P., Jiang, B., Sun, C., Qin, X., Tian, Z., Cao, Z., & Meng, J. (2019). A high-strength low-rare-earth-alloyed magnesium alloy via traditional hot-extrusion. *Journal of Alloys and Compounds*, 810, 1-13. (rayyan-13567996).
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.151967>
- Zhang, H., Zhang, H., Pan, A., Yang, B., He, L., & Wu, Y. (2021). Rare earth-free luminescent materials for WLEDs : Recent progress and perspectives. *Advanced Materials Technologies*, 6(1), 1-26. (rayyan-13567215). <https://doi.org/10.1002/admt.202000648>

- Zhang, H., Zhou, J., & Peng, Y. (2021). Amide proton transfer-weighted MR imaging of pediatric central nervous system diseases. *Magnetic Resonance Imaging Clinics of North America*, 29(4), 631-641. (rayyan-13572428). <https://doi.org/10.1016/j.mric.2021.06.012>
- Zhang, J., Ning, Y., Zhu, H., Rotile, N. J., Wei, H., Diyabalanage, H., Hansen, E. C., Zhou, I. Y., Barrett, S. C., Sojoodi, M., Tanabe, K. K., Humblet, V., Jasanoff, A., Caravan, P., & Bawendi, M. G. (2023). Fast detection of liver fibrosis with collagen-binding single-nanometer iron oxide nanoparticles via T1-weighted MRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 120(18), 1-8. (rayyan-13565664). <https://doi.org/10.1073/pnas.2220036120>
- Zhang, L., Huang, M., Zhang, D., & Wang, E. (2021). Effect of rare-earth elements on microstructure and mechanical properties of in-situ Fe-TiB₂ composites. *Materials Today Communications*, 29, 1-11. (rayyan-13566918). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102860>
- Zhang, Q., Burrage, M. K., Lukaschuk, E., Shanmuganathan, M., Popescu, I. A., Nikolaidou, C., Mills, R., Werys, K., Hann, E., Barutcu, A., Polat, S. D., Salerno, M., Jerosch-Herold, M., Kwong, R. Y., Watkins, H. C., Kramer, C. M., Neubauer, S., Ferreira, V. M., Piechnik, S. K., & Hypertrophic Cardiomyopathy Regis. (2021). Toward replacing late gadolinium enhancement with artificial intelligence virtual native enhancement for gadolinium-free cardiovascular magnetic resonance tissue characterization in hypertrophic cardiomyopathy. *Circulation*, 144(8), 589-599. (rayyan-13567275). <https://doi.org/10.1161/circulationaha.121.054432>
- Zhang, T., Yichun Luo, & Li, D. Y. (2000). Erosion behavior of aluminide coating modified with yttrium addition under different erosion conditions. *Surface and Coatings Technology*, 126(2), 102-109. (rayyan-13571949). [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(99\)00671-4](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(99)00671-4)
- Zhang, W., Balasubramanian, B., Kharel, P., Pahari, R., Valloppilly, S. R., Li, X., Yue, L., Skomski, R., & Sellmyer, D. J. (2019). High energy product of MnBi by field annealing and Sn alloying. *APL Materials*, 7(12). (rayyan-13568204). <https://doi.org/10.1063/1.5128659>
- Zhang, Y., Ding, B., Yin, L., Xin, J., Zhao, R., Zheng, S., & Yan, X. (2018). Monoclinic Lu_{2-x}Sm_xWO₆-based white light-emitting phosphors: From ground-excited-states calculation prediction to experiment realization. *Inorganic Chemistry*, 57(1), 507-518. (rayyan-13568980). <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.7b02787>

- Zhou, P., Kang, H., Cao, F., Fu, Y., Xiao, T., & Wang, T. (2014). In situ study on growth behavior of Cu₆Sn₅ during solidification with an applied DC in RE-doped Sn-Cu solder alloys. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 25(10), 4538-4546. (rayyan-13570764). <https://doi.org/10.1007/s10854-014-2201-y>
- Zhu, H., Chen, P., Yang, C.-F., & Wu, Y.-X. (2015). Neodymium-based catalyst for the coordination polymerization of butadiene: From fundamental research to industrial application. *Macromolecular Reaction Engineering*, 9(5), 453-461. <https://doi.org/10.1002/mren.201400063>
- Zhu, J., Lv, M., Liu, C., Tan, X., & Xu, H. (2023). Effect of neodymium and yttrium addition on microstructure and DC soft magnetic property of dual-phase FeCoNi(CuAl)_{0.8} high-entropy alloy. *Journal of Rare Earths*, 41(10), 1562-1567. (rayyan-13565598). <https://doi.org/10.1016/j.jre.2022.06.005>
- Zhu, X., Wang, X., Zhang, C., Wang, L., & Wu, W. (2017). Design and analysis of a spoke-type hybrid permanent magnet motor for electric vehicles. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(11), 1-4. (rayyan-13569303). <https://doi.org/10.1109/tmag.2017.2701146>
- Zhu, X., Wu, W., Quan, L., Xiang, Z., & Gu, W. (2019). Design and multi-objective stratified optimization of a less-rare-earth hybrid permanent magnets motor with high torque density and low cost. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 34(3), 1178-1189. (rayyan-13568054). <https://doi.org/10.1109/tec.2018.2886316>
- Zidan, D. Z., & Elghazaly, H. A. (2014). Can unenhanced multiparametric MRI substitute gadolinium-enhanced MRI in the characterization of vertebral marrow infiltrative lesions? *Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine*, 45(2), 443-453. (rayyan-13570665). <https://doi.org/10.1016/j.ejrnm.2014.02.014>
- Zielinski, M., Cassayre, L., Destrac, P., Coppey, N., Garin, G., & Biscans, B. (2020). Leaching mechanisms of industrial powders of spent nickel metal hydride batteries in a pilot-scale reactor. *ChemSusChem*, 1-13. (rayyan-726050929). <https://doi.org/10.1002/cssc.201902640>