



Les innovations technologiques (substitution) vont-elles permettre de réduire significativement les besoins toujours croissants en matières premières critiques?

Séance du 13 avril 2022

Dr. Patrice Christmann – krysmine@gmail.com

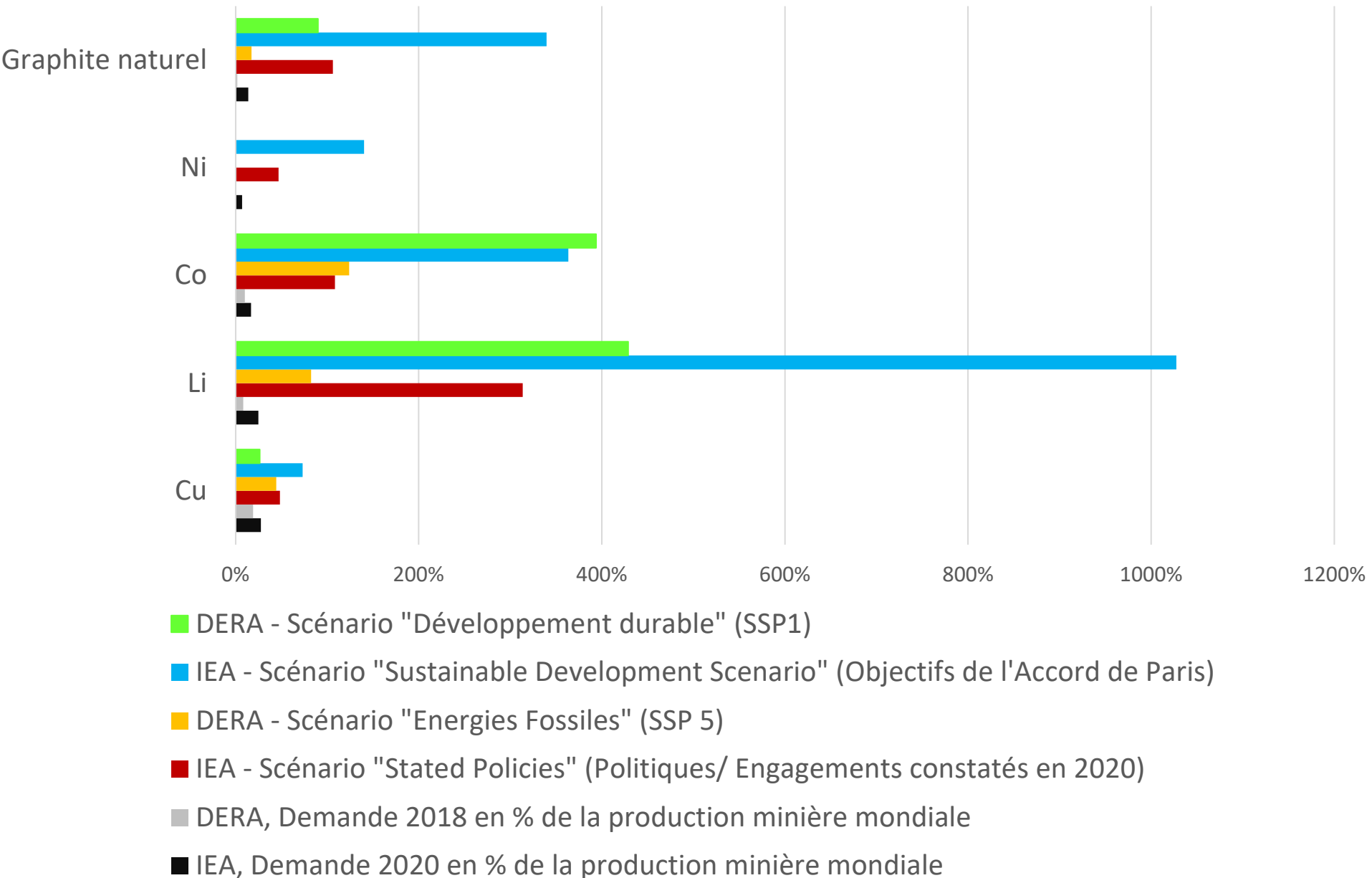
Avertissement

- Ce support a été préparé avec le plus grand soin, cependant aucune garantie explicite ou implicite n'est donnée relativement à son contenu, notamment en relation avec les dommages directs et/ou indirects que pourraient subir les participants à cette intervention suite à leur utilisation de ce support et des informations qu'il contient.
- Ce document et les informations qu'il contient sont strictement réservés aux participants à l'intervention mentionnée sur la page de garde. Ils ne peuvent en aucun cas servir de support pour une décision d'investissement. Une telle décision peut nécessiter le recours à un conseil professionnel et/ou à une expertise. Dans tous les cas de figure, elle relève de la seule décision et responsabilité de l'investisseur. Aucun recours ne sera accepté.
- Droits d'auteur: cette présentation et les éléments la constituant sont destinés à l'usage personnel des participants à l'intervention désigné par la page de garde. Toute diffusion à des tiers, sauf autorisation écrite de la part de l'auteur, par un moyen quelconque est interdite. Cette présentation contient des éléments provenant de sources tierces, citées. Toute reproduction et dissémination de ces données peut également nécessiter l'accord écrit préalable des détenteurs de droits d'auteur.
- Cet avertissement fait partie intégrante de cette présentation et ne peut en être séparé.
- Les opinions exprimées dans ce cours le sont à titre strictement personnel et ne sauraient ni représenter, ni engager de tierces parties.

Plusieurs publications proposent des scénarios porteurs de forts déséquilibres entre ce que l'industrie minérale mondiale pourra produire (offre) et ce qui devra être disponible pour répondre à la demande liée à une transition énergétique fondée sur l'éolien, le solaire et l'électromobilité

Banque Mondiale	Hund K., La Porta D., Fabregas T. P. , Laing T., Drexhage J. (2020). Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition - Report, 112 p. - The World Bank Group - http://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climat-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition.pdf
Agence Internationale pour l'Energie	International Energy Agency (IEA). (2021). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. World Energy Outlook Special Report, 287 p. https://iea.blob.core.windows.net/assets/24d5dfbb-a77a-4647-abcc-667867207f74/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf
Agence allemande pour les matières premières (DERA)	Marscheider-Weidemann F., Langkau S., Baur S.-J., Billaud M., Deubzer O., Eberling E., Erdmann L., Haendel M., Krail M., Loibl A., Maisel F., Marwede M., Neef C., Neuwirth M., Rostek L., Rückschloss J., Shirinzadeh S., Stijepic D., Tercero Espinoza L., Tippner M. (2021). Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. Report, 366 p. (in German: Raw materials for future technologies). DERA Rohstoffinformationen 50: Editor: Deutsche Rohstoffagentur (DERA) Berlin (Germany). UNE VERSION ANGLAISE EST PREVUE EN MAI
Recherche japonaise	Watari, T., Nansai, K. and Nakajima, K. (2020). Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements. Resources, Conservation and Recycling, [online] 155, p.104669. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344919305750

SCENARIOS DE DEMANDE A L'HORIZON 2040 PRESENTES PAR L'AIE ET PAR DERA, EXPRIMES EN % DE LA PRODUCTION MINIERE MONDIALE 2019



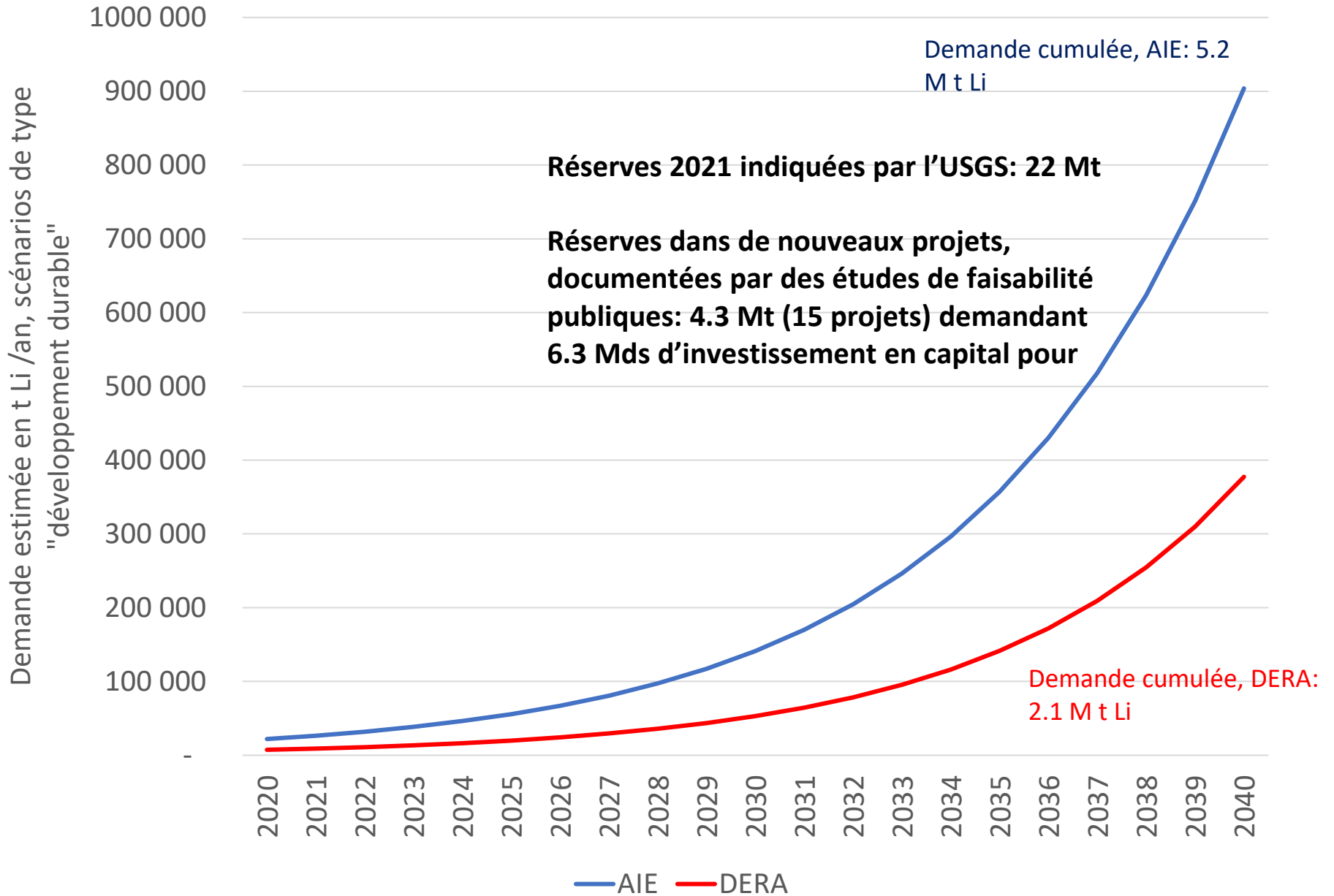
Que peut-on dire de la capacité de l'industrie minière mondiale à répondre à de tels scénarios?

- Les seules données factuelles disponibles pour tenter une analyse sont celles disponibles dans les rapports publics des entreprises faisant appel à l'actionnariat **public**, cotées sur une bourse ayant mis en place des obligations de rapportage des données/ informations relatives aux projets publics (codes NI 43-101 au Canada et JORC en Australie, notamment avec plus de 1900 sociétés minières et/ou métallurgiques cotées, dont env. 60% au Canada).
- Ces données représente une mesure significative de la dynamique de l'exploration minière mondiale
- L'absence de données, ou le manque de fiabilité des données disponibles relatives aux entreprises à capitaux privés et/ou à capitaux d'Etat, sont des limites à l'analyse.

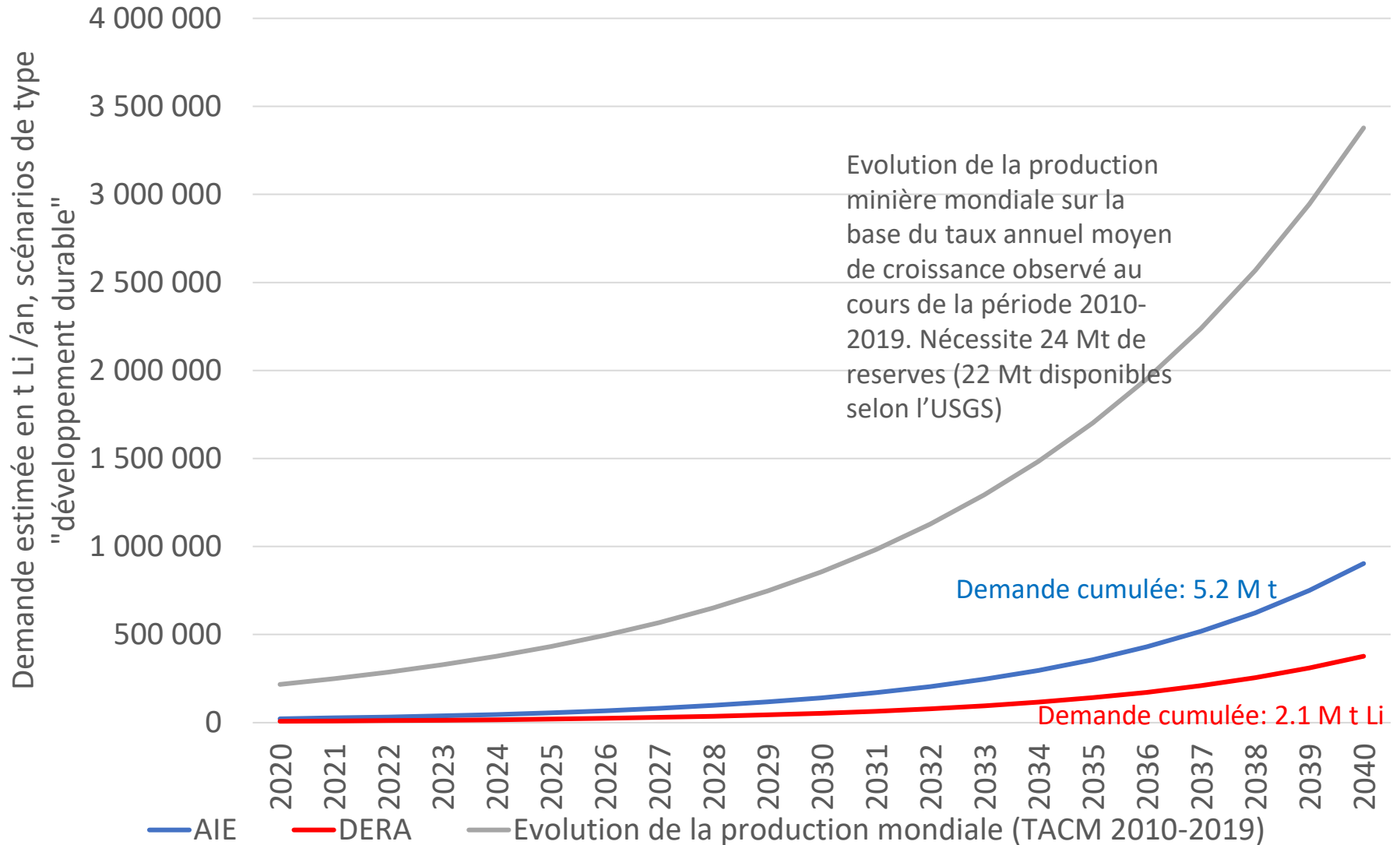
Le cas du lithium

- L'USGS indique, fin 2021, 22 Mt de Li dans les réserves mondiales. Mais ces données, provenant de gouvernements, ne sont pas traçables et peuvent faire l'objet de manipulations.
- Cette présentation est basée sur une compilation personnelle de données relatives à 77 gisements de lithium, représentant env. 51 Mt de Li métal équivalent dans leurs ressources (situation fin mars 2022).
- **Env. 30 Mt de ces ressources (59% du total, 53 projets) sont des ressources « indiquées » et/ou « mesurées », bien documentées**, conformément à l'un des standards nationaux reconnus de rapportage relatif aux projets miniers.
- Seulement 6,5 Mt de Li sont aujourd'hui documentés sous forme de réserves (23 projets).
- 15 projets ont fait l'objet d'études de faisabilité (4,3 Mt de réserves). Ils représentent un besoin de financement en capital de 6,3 milliards de \$ US (\$ nominaux).
- Des problèmes environnementaux (utilisation d'eau notamment) et/ou d'acceptabilité sociale peuvent retarder, voire compromettre les projets.

Scénarios de demande en Lithium pour une transition énergétique conforme à l'objectif de l'Accord de Paris – Comparaison avec les réserves documentées.



Scénarios de demande en Lithium pour une transition énergétique conforme à l'objectif de l'Accord de Paris – Comparaison avec les réserves documentées et avec l'évolution de la production mondiale sur la base du taux annuel moyen de croissance de la production observé de 2010 à 2019.



La substitution de matières premières critiques, un facteur majeur de résilience dans toutes les dimensions du développement durable.

Trois exemples d'innovations technologiques de rupture susceptibles de réduire la demande en certaines matières premières critiques à l'horizon 2035-2040 liée à la transition énergétique:

- Stockage de l'Energie: batteries pour l'électromobilité
- Réacteurs aéronautiques/ Turbines à Gaz
- Céramiques à Matrice Composite

1 - Stockage de l'énergie: batteries pour l'électromobilité

INNOVATION 1: BATTERIES LI - METAL

- Enjeu: développement de batteries sans anode en graphite, celle-ci étant substitué par la migration du lithium à travers un séparateur et sa déposition, sous forme d'anode temporaire, sur une feuille de substrat métallique.
- Impact sur la demande en matières premières critiques: ferait disparaître la demande en graphite naturel pour le développement de l'électromobilité, et ferait disparaître tous les enjeux de criticité liés à cette matière première minérale
- Entreprises porteuses du développement: SES (USA, partenariat avec IVANHOE Capital Acquisition et de nombreux acteurs industriels), QUANTUMSCAPE et SAMSUNG.
- Production industrielle espérée: 2023-2024 (SES)

1 - Stockage de l'énergie: batteries Li-ion

INNOVATION 2: BATTERIES A NANOTUBES DE CARBONE

- Enjeu: développement de batteries sans anode, dont la cathode est constituée de nanotubes de carbone, parfaitement alignés (100 milliards de nanotubes/cm²)
- Impact sur la demande en matières premières critiques: ferait disparaître la demande en graphite naturel pour le développement de l'électromobilité, ferait disparaître tous les enjeux de criticité liés à cette matière première minérale. Cette technologie devrait également permettre de réduire de manière importante les quantités de métaux (cobalt, nickel, manganèse) nécessaires à la cathode. La matière première pour la production des nanotubes est une huile végétale.
- Entreprise porteuse du développement: NAWA TECHNOLOGIES (France)
- Production industrielle espérée: > 2025

1 – Stockage de l'énergie

AUTRES DEVELOPPEMENTS

- L'étude des brevets publiée en 2020 par l'Office Européen des Brevets et l'Agence Internationale de l'Energie (Innovation in batteries and electricity storage - A global analysis based on patent data) décrit le riche paysage des brevets et l'activité foisonnante de recherche et d'innovation dans le domaine du stockage de l'énergie.
- 7000 familles de brevets internationaux ont été recensées en 2018, contre 1029 résultat d'une croissance annuelle des demandes de brevet de l'ordre de 14%/an au cours de la période 2005-2019.

2 - Réacteurs aéronautiques/ Turbines à Gaz

INNOVATION: CERAMIQUES A MATRICE COMPOSITE (CMC)

- Enjeu: remplacement des superalliages dans la partie haute pression des réacteurs par des céramiques à matrice composite, apportant de nombreux avantages: augmentation du rendement du réacteur (baisse de la consommation en kérosène, réduction du bruit et des émissions, allègement du réacteur et de l'ensemble de l'avion).
- Impact sur la demande en matières premières critiques: réduirait significativement la demande en plusieurs ressources minérales critiques (Co, Nb, Ni, Re, Ru, Ta) nécessaires à la production des superalliages.
- Entreprises porteuses du développement: CFM International (Safran + GE), Rolls-Royce. Un premier réacteur démonstrateur, développé par GE dans le cadre d'un programme de la Défense US a été testé. Les réacteurs LEAP construits par CFM sont les premiers à intégrer des éléments en CMC.
- Production industrielle espérée: > 2035.

2 - Réacteurs aéronautiques/ Turbines à Gaz

Impacts significatifs potentiels sur la demande en matières premières critiques (champs surlignés en vert) de la substitution des superalliages par les céramiques à matrice composite – Données: Marscheider-Weidemann et al. (2021), rapport DERA, Scénario SSSP1 (Développement Durable)

	Production mondiale 2018 (tonnes, valeurs arrondies)	Demande spécifique 2018 (tonnes)	Demande spécifique 2040 (tonnes)- Scénario "Développement durable" de DERA	Demande spécifique 2040, en % de la production mondiale de 2018
Ni, métal raffiné	2 189 000	164 000	301 000	14%
Cr, production minière	27 000 000	52 000	95 000	0.4%
Co, métal raffiné	126 000	37 000	68 000	54%
Nb, production minière	68 000	4 000	6 900	10%
Fe, production minière	1 520 000 000	4 000	8 100	0%
Mo, production minière	266 000	9 000	16 000	3%
Al, métal raffiné	63 800 000	5 000	8 900	0%
Ti, métal raffiné	2 610 900	5 000	8 500	0%
W, production minière	77 000	1 300	2 300	3%
Re, métal raffiné	47	15	28	60%
Ru, métal raffiné	33	12	22	67%
Ta, production minière	1 800	260	470	26%
B	Indisponible	60	110	
Zr, production minière	Indisponible	20	28	

3 – Aimants permanents de très haute performance

INNOVATION: NOUVEAUX MATERIAUX MAGNETIQUES

- Enjeu: apporter les nombreuses fonctionnalités des aimants en réduisant les risques géopolitiques et les impacts environnementaux liés à la production et à la transformation des terres rares en réduisant significativement la demande en terres rares critiques.
- Impact sur la demande en matières premières critiques: réduirait significativement la demande en dysprosium, néodyme, praséodyme et terbium
- Entreprises porteuses du développement:
 - Toyota (Japon), substitution de 50% du Nd et de la totalité de Dy par La et Ce, terres rares surabondantes
 - Denso Corp. (Japon): développement d'aimants Ni-Fe à structure de type tétrataénite, jusqu'ici connue uniquement dans certains météorites
 - Niron Magnetics (USA) travaille au développement d'aimants permanents en nitrure de fer
 - Hitachi a présenté des prototypes de petits moteurs électriques utilisant un matériau magnétique à base de fer liquide
- Production industrielle espérée: > 2030.

3 – Aimants permanents de très haute performance

Impacts significatifs potentiels sur la demande en matières premières critiques (champs surlignés en vert) de la substitution des terres rares utilisées pour la production des aimants Nd (Pr, Dy, Tb) – Fe – B actuels par des matériaux magnétiques innovants – Données extraites de Marscheider-Weidemann et al. (2021), rapport DERA, Scénario SSSP1 (Développement Durable)

	Production mondiale 2018 (tonnes, valeurs arrondies)	Demande spécifique 2018 (tonnes)	Demande spécifique 2040 (tonnes)- Scénario "Développement durable" de DERA	Demande spécifique 2040, en % de la production mondiale de 2018
Pr + Nd, métal raffiné	31 400	9 870	69 596	222%
Dy + Tb, métal raffiné	1 280	500	5 140	402%

Conclusions

Les exemples présentés ici sont des scénarios paraissant avec une probabilité élevée de matérialisation sous forme de productions industrielles au cours de la décennie 2030-2040.

Ils ont été choisis pour montrer l'importance du développement de substitutions technologiques en tant qu'élément fondamental de toute stratégie visant à contrecarrer les problèmes de sécurité des approvisionnements futurs en matières premières minérales dans un contexte international qui sera marqué par:

- Une concurrence internationale de plus en plus féroce pour l'accès aux ressources primaires
- Des risques géopolitiques de plus en plus graves dans un contexte de développement des antagonismes violents entre grands blocs économiques
- Une croissance des oppositions sociales aux nouveaux projets miniers de grande envergure, notamment à cause des impacts environnementaux de nombre d'entre eux.

Conclusions

L'accès aux capitaux nécessaires à l'accélération de l'innovation et à la transition entre laboratoire et production industrielle est essentiel à la réussite des projets de substitution, les politiques publiques ont un rôle déterminant à jouer pour accompagner de manière fiable, constante, les dynamiques citées.

La compréhension et la documentation des innovations susceptibles de modifier la demande en ressources minérales devrait former un chapitre spécifique d'études de criticité offrant une perspective plus dynamique que statique.

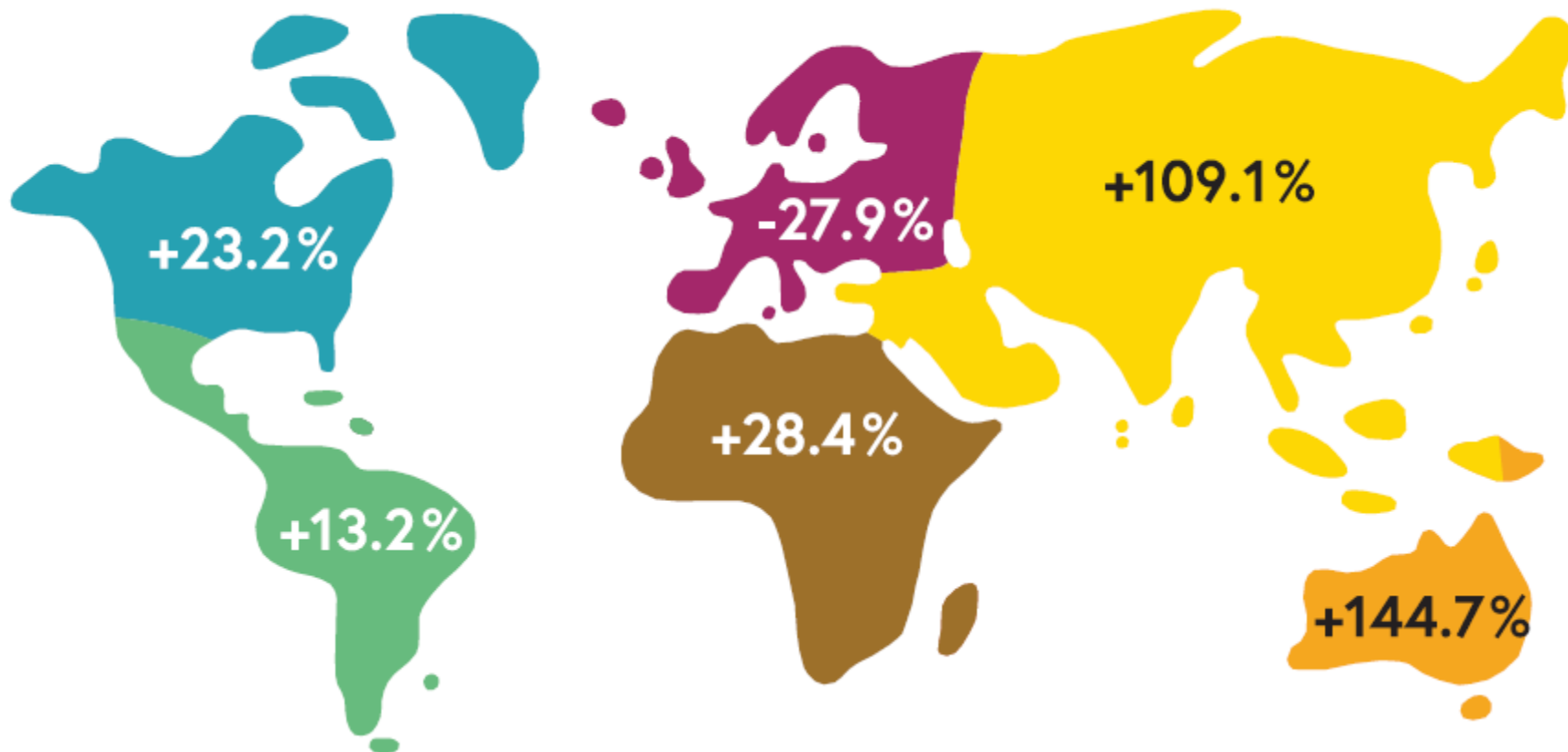
Les informations ainsi recueillies et traitées paraissent être des éléments déterminants pour éclairer les politiques publiques.

Cette présentation s'appuie sur un article à paraître en juin 2022 dans *Mineral Economics*:

Christmann P., Lefebvre G. (2022). Trends in global minerals and metals criticality: the need for technological foresight.

L'Union européenne est dans une situation de dépendance et de grande vulnérabilité stratégique. C'est encore pire pour la France.

Declining production rates since 2000 only in Europe – Δ 2000 / 2019



Source du graphique: World Mining Data, édition 2021 - Reichl C. and Schatz M. (2021). World Mining Data 2021 - Statistical handbook, 265 p. - Austrian Federal Ministry for Agriculture, Regions and Tourism. <https://www.world-mining-data.info>



UN
environment
programme



Une analyse approfondie, indépendante, basée sur le meilleur des connaissances scientifiques disponibles sur l'état de la gouvernance de l'industrie minière mondiale, les nombreuses initiatives existantes et les actions de progrès nécessaire pour renforcer une gouvernance indispensable pour répondre aux défis majeurs de ce 21^{ème} siècle

<https://www.resourcepanel.org/file/1484/download?token=902uRy2h>

Mineral Resource Governance in the 21st Century

GEARING EXTRACTIVE INDUSTRIES TOWARDS SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Merci pour votre attention et pour votre invitation