

24. Énergies non renouvelables

24.7 – Terres rares & autres matériaux stratégiques en énergie

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

Département de génie mécanique

Victor Aveline, ing., M.ing.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- Liste, découverte et utilisations
- Occurrence naturelle et production
- Enjeux politico-énergétiques associés
- Impacts environnementaux
- Recyclabilité
- Autres matériaux stratégiques en énergie
- Conclusion

Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs***
- Liste, découverte et utilisations
- Occurrence naturelle et production
- Enjeux politico-énergétiques associés
- Impacts environnementaux
- Recyclabilité
- Autres matériaux stratégiques en énergie
- Conclusion

Introduction et objectifs

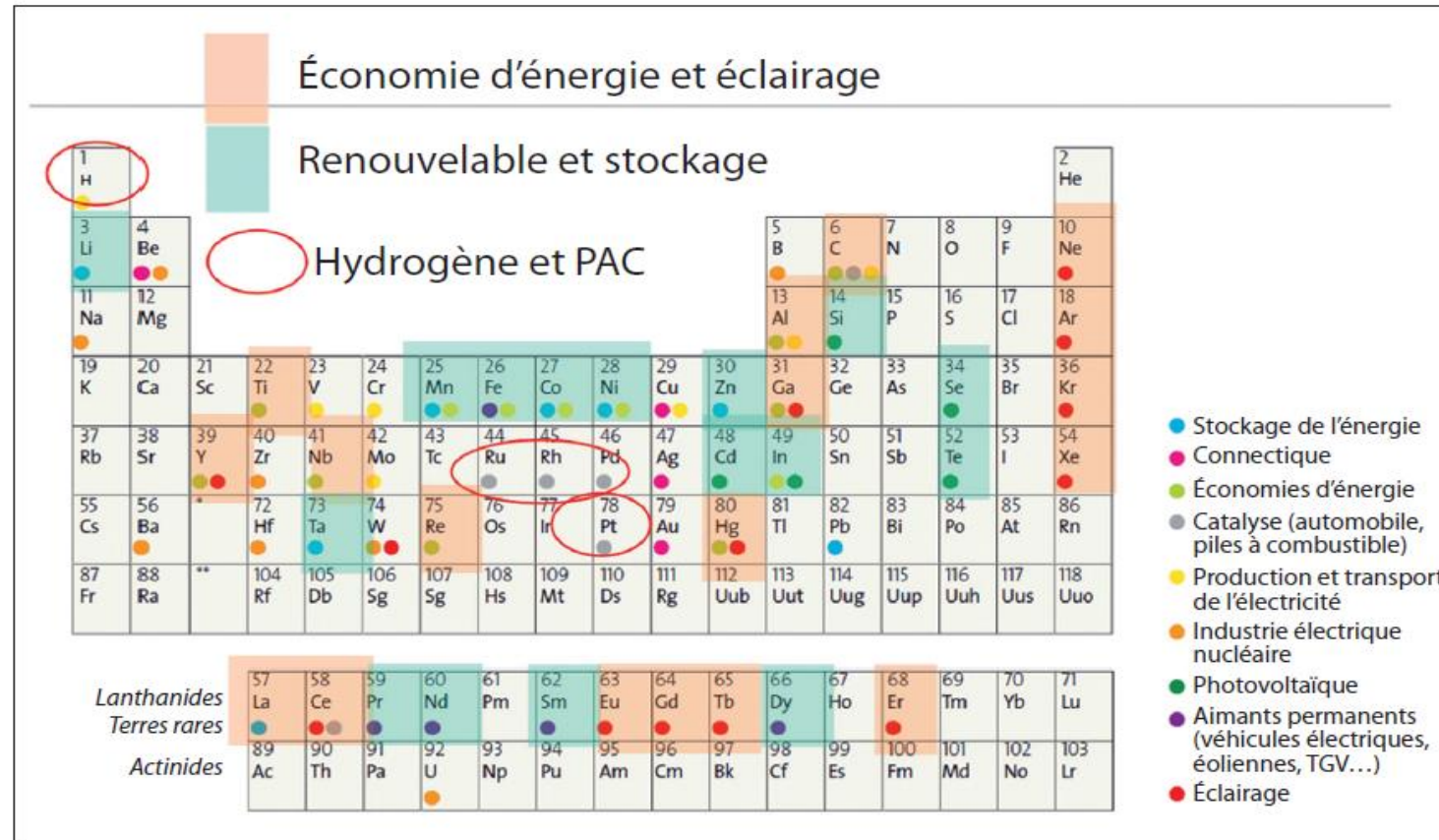
- Le lithium et l'uranium (indirectement) ont déjà fait l'objet de présentations spécifiques;
- Les terres rares qui jouent un rôle dans les applications énergétiques seront d'abord présentées ici;
- Puis, d'autres substances critiques seront mentionnées en fin de présentation.
- Pour plus de détails, consultez le document synthèse produit par [Bruno Goffé](#)

Introduction et objectifs

Éléments chimiques mis en œuvre dans différentes technologies du domaine de l'énergie

Goffé, B., Les matériaux stratégiques pour l'énergie

Centre de recherche et d'enseignement des géosciences pour l'environnement (CEREGE), Université d'Aix-Marseille.



Il y en a 54 éléments qui entrent en jeu dans le domaine de l'énergie!

Introduction et objectifs

- La première partie présente les 11 terres rares pertinentes
 - Ce sont des substances métallurgiques, minérales ou autres, que l'on retrouve dans la nature en quantité limitée - avec possibilités limitées ou inexistantes de récupération et de réutilisation - et qui entre dans la mise en place de systèmes de production énergétique renouvelable (entre autres).
 - Contrairement à leur dénomination leur occurrence naturelle n'est pas rare.

Introduction et objectifs

- Pourquoi donc ce terme de terres rares ?
 - Parce que les quantités disponibles et exploitables économiquement et techniquement sont considérées comme faibles compte tenu de leur poids économique et de leur statut stratégique important.

Introduction et objectifs

- La seconde partie présente les autres matériaux stratégiques
 - Cette partie est en développement

Introduction et objectifs

- Objectifs de cette présentation
 - Expliquer ce que sont les terres rares;
 - Donner la répartition des gisements et de la production;
 - Faire comprendre que ces matériaux sont stratégiques pour l'énergie et les scénarios de production d'énergie renouvelable;
 - Présenter les impacts environnementaux associés;
 - effectuer une rapide étude des possibilités de recyclage;
 - Faire réfléchir sur l'existence des autres matériaux stratégiques en énergie.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Liste, découverte et utilisations***
- Occurrence naturelle et production
- Enjeux politico-énergétiques associés
- Impacts environnementaux
- Recyclabilité
- Autres matériaux stratégiques en énergie
- Conclusion

Question

- Combien d'éléments composent ce que l'on nomme les terres rares ?
- A. 14
- B. 15
- C. 16
- D. 17
- E. 18

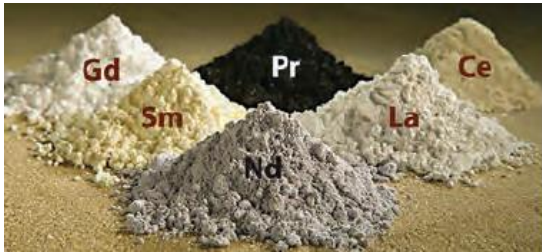


ENR2020

Liste, découverte et utilisations

- ***The Rare-Earth Elements (REE)***

Au nombre de 17 dont 15 lanthanides



Les terres rares sont des éléments plutôt :

- tendres ;
- ductiles ;
- malléables ;
- réactifs à des températures élevées ou lorsqu'ils se présentent sous la forme de petits fragments.

Non
spécifiquement
impliqué en
énergie

lanthanides

Éléments	Numéro atomique
Scandium (Sc)	21
Yttrium (Y)	39
Lanthane (La)	57
Cérium (Ce)	58
Praséodyme (Pr)	59
Néodyme (Nd)	60
Prométhium (Pm)	61
Samarium (Sm)	62
Europium (Eu)	63
Gadolinium (Gd)	64
Terbium (Tb)	65
Dysprosium (Dy)	66
Holmium (Ho)	67
Erbium (Er)	68
Thulium (Tm)	69
Ytterbium (Yb)	70
Lutécium (Lu)	71

Liste, découverte et utilisations

- **Découvertes**

C'est un Suédois, Carl Axel Arrhenius, qui découvre le premier une terre rare dans une carrière près de Stockholm (carrières de feldspath d'Ytterby), en 1787. C'est alors un minéral noir qu'il nomme Ytterbite.

Comme les terres rares ont des propriétés chimiques très voisines, on les trouve en mélange dans un même minerai et il est difficile de les séparer.

Les techniques de séparation par cristallisation fractionnée sont développées par Paul-Émile Lecoq de Boisbaudran ou Georges Urbain au début du 19^{ème} siècle.

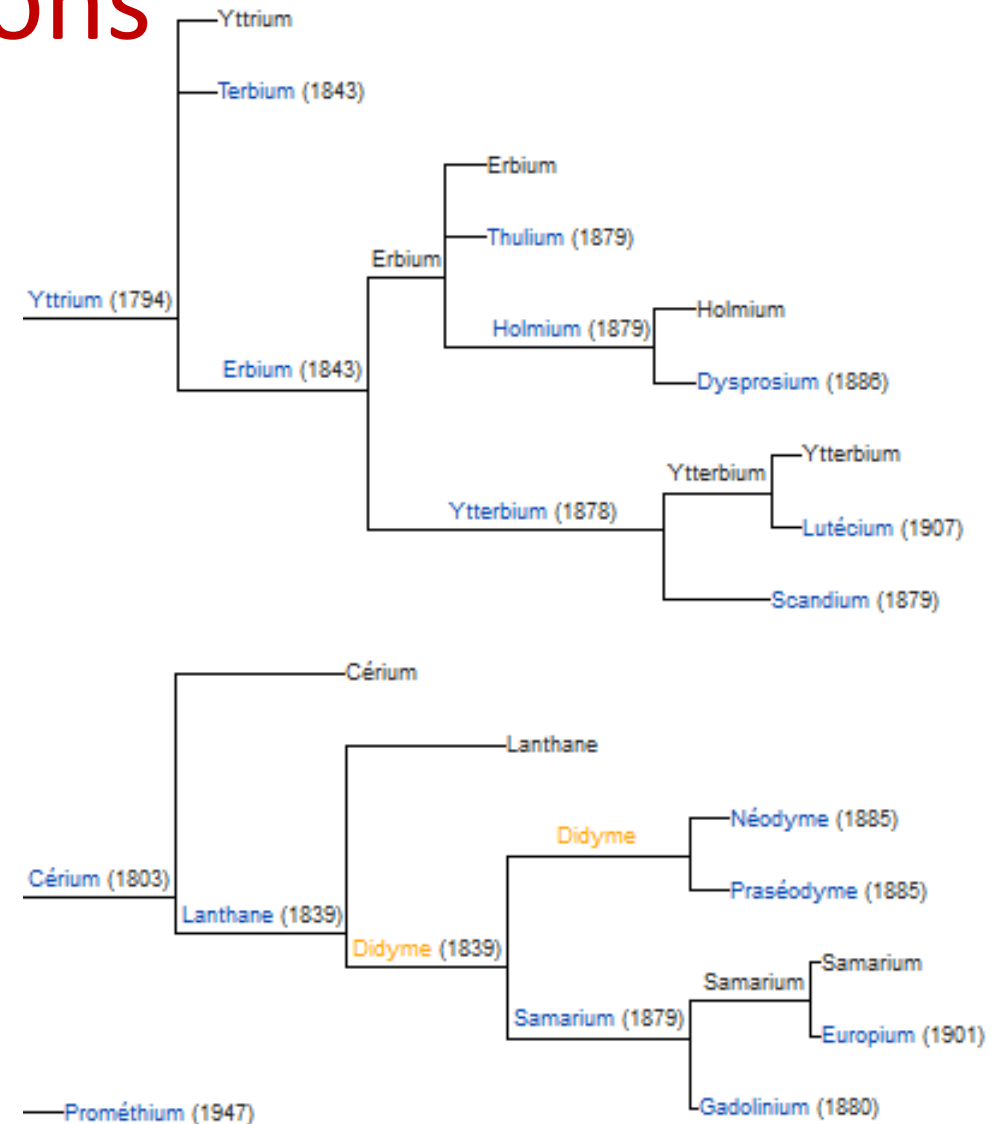
Mais il faudra attendre les années 1940 pour voir le développement de techniques d'extraction perfectionnées et la production de terres rares en grande quantité.

Liste, découverte et utilisations

- Diagrammes des découvertes

Les dates entre parenthèses sont les dates d'annonces des découvertes. Les branches représentent les séparations des éléments à partir d'un ancien (l'un des nouveaux éléments conservant le nom de l'ancien, sauf pour le didyme).

Source : Wikipédia, adapté de *Episodes from the History of the Rare Earth Elements*, Springer Netherlands, coll. « Chemists and Chemistry », 1^{er} janvier 1996 (ISBN 9789401066143 et 9789400902879, DOI 10.1007/978-94-009-0287-9), xxi.



Question

- Parmi les technologies suivantes lesquelles utilisent des terres rares ?
 - A. Une batterie de voitures électriques
 - B. Une LED
 - C. Un panneau photovoltaïque
 - D. Une éolienne
 - E. Un écran d'ordinateur ou une télévision



ENR2020

Liste, découverte et utilisations

- **Essentiels pour les nouvelles technologies**

Des propriétés électroniques, magnétiques, optiques ou encore catalytiques

Utilisations indispensables et récurrentes dans :

- **Aimants permanent** (Néodyme, Samarium, Praséodyme, Dysprosium)
- Composants de la couche de **cristaux liquides des écrans LCD** (Europium, Yttrium, Gadolinium, Cérium, Thulium, Lanthane, Terbium)
- **LED**

Liste, découverte et utilisations

- Essentiels pour les nouvelles technologies

- **Batteries de voitures électriques et hybrides** : composant de type NiMH (lanthane) ;
- **LED**, éclairages fluorescents, pigments ;
- Les puces de smartphone, les écrans d'ordinateurs portables, les télévisions ;
- Les **panneaux photovoltaïques, les éoliennes** ;
- Pot catalytique de voiture, cracking de pétrole ;
- L'oxyde d'yttrium Y_2O_3 est utilisé dans les alliages métalliques pour renforcer leur résistance à la corrosion à haute température ;
- Appareils de radiographies médicales...



Liste, découverte et utilisations

- Essentiels pour les nouvelles technologies

DALLE TACTILE + VITRE

In Indium	Sn Etain	Si Silicium	Al Aluminium	K Potassium
--------------	-------------	----------------	-----------------	----------------

ÉCRAN

Eu Europium	Tb Terbium	Y Yttrium	
Gd Gadolinium	Ce Cérium	Tm Thulium	
La Lanthane	B Bore	Ba Baryum	
S Soufre	Mg Magnésium	Mo Molybdène	Hg Mercure

BATTERIE

Li Lithium	Co Cobalt	C Carbone	F Fluor
Mn Manganèse	V Vanadium	P Phosphore	Al Aluminium

BOÎTIER

Mg Magnésium	C Carbone	Sb Antimoine	Br Brome	Ni Nickel	Zn Zinc
-----------------	--------------	-----------------	-------------	--------------	------------

CARTE ET COMPOSANTS

Ni Nickel	Pb Plomb	Sn Etain	Bi Bismuth
Au Or	Ag Argent	W Tungstène	Pt Platine
Rh Rhodium	Be Béryllium	Cu Cuivre	P Phosphore
As Arsenic	Ga Gallium	Ge Germanium	Si Silicium
Zr Zirconium	Ru Ruthénium	Nd Néodyme	Fe Fer
B Bore	Sm Samarium	Co Cobalt	Pr Praséodyme
Cl Chlore	Dy Dysprosium	Ta Tantale	
	Nb Niobium	Pd Palladium	

RETOUR

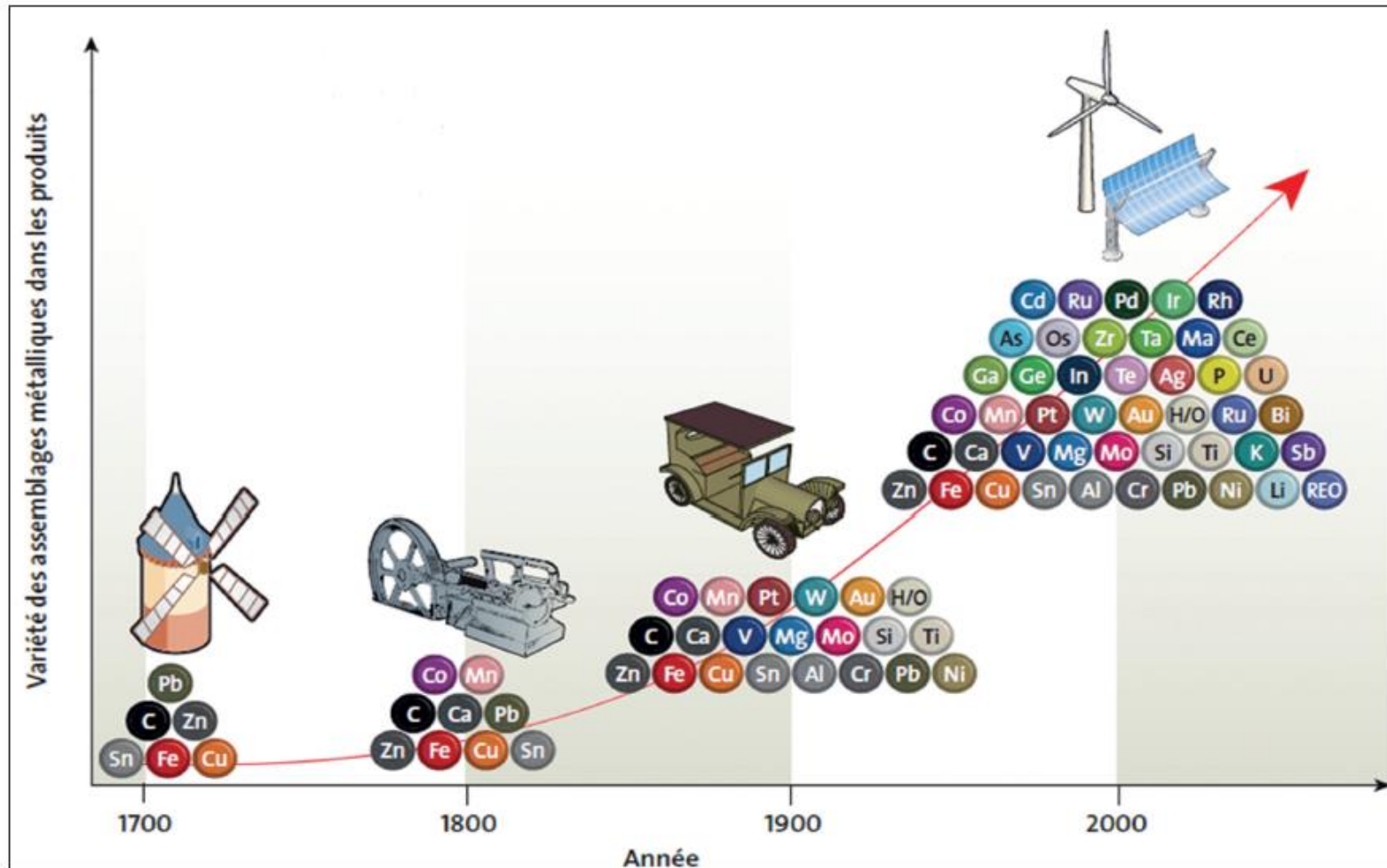
Précision sur les fonctions des éléments à voir sur le site de l'animation :

<https://www.systext.org/sites/all/animationreveal/mtxsmpl/#/7>



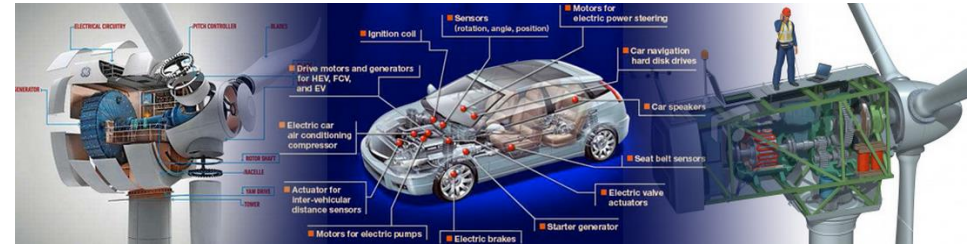
Liste, découverte et utilisations

- Essentiels pour les EnR



Liste, découverte et utilisations

- Essentiels pour les EnR



Les technologies vertes ont besoin de ces matières premières

- Dysprosium :

- Aimants électriques, 90% de gain en poids
- Prix multiplié par 7 entre 2003 et 2010 : 53 USD/lb

- Terbium :

- Ampoules électriques, 80% de gain en consommation
- Prix multiplié par 4 entre 2003 et 2008: 407 USD/lb au *peak*

Source: CI no. 1002,
janvier 2010 (The
New York Times)

L'industrie de la défense a elle aussi recourt aux terres rares dans la fabrication de capteurs de radars et sonars ou de systèmes d'armes et de ciblage.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Liste, découverte et utilisations
- ***Occurrence naturelle et production***
- Enjeux politico-énergétiques associés
- Impacts environnementaux
- Recyclabilité
- Autres matériaux stratégiques en énergie
- Conclusion

Occurrence naturelle et production

- Tous ne sont pas si rares, contrairement à leur dénomination
- Ils sont plus abondants que l'or et l'argent et le cérium est aussi répandu que le cuivre dans l'écorce terrestre
- On retrouve ces métaux sous formes de traces dans la plupart des environnements naturels

Occurrence naturelle et production

- Principaux gisements (dans l'ordre décroissant) en Chine, Russie, États-Unis, Inde et Australie
- Facteurs limitants la production :
 - les coûts (car même si ils ne sont pas rares, **la ressource est très dispersée**, ne favorisant pas la réduction des coûts par le facteur d'échelle)
 - les impacts environnementaux
 - la complexité des explorations et exploitations

Occurrence naturelle et production

- **Mountain Pass rare earth element mine, California**
 - La première mine de REE des USA et la plus grande;
 - Découverte en 1949, l'exploitation a démarré en 1960;
 - Fermé à causes des problèmes environnementaux associés;
 - Rouverte en 2013, elle est depuis la seule exploitation de REE active au USA.



Bradley Van Gosen. 2018. U.S. Geological Survey.
Public domain

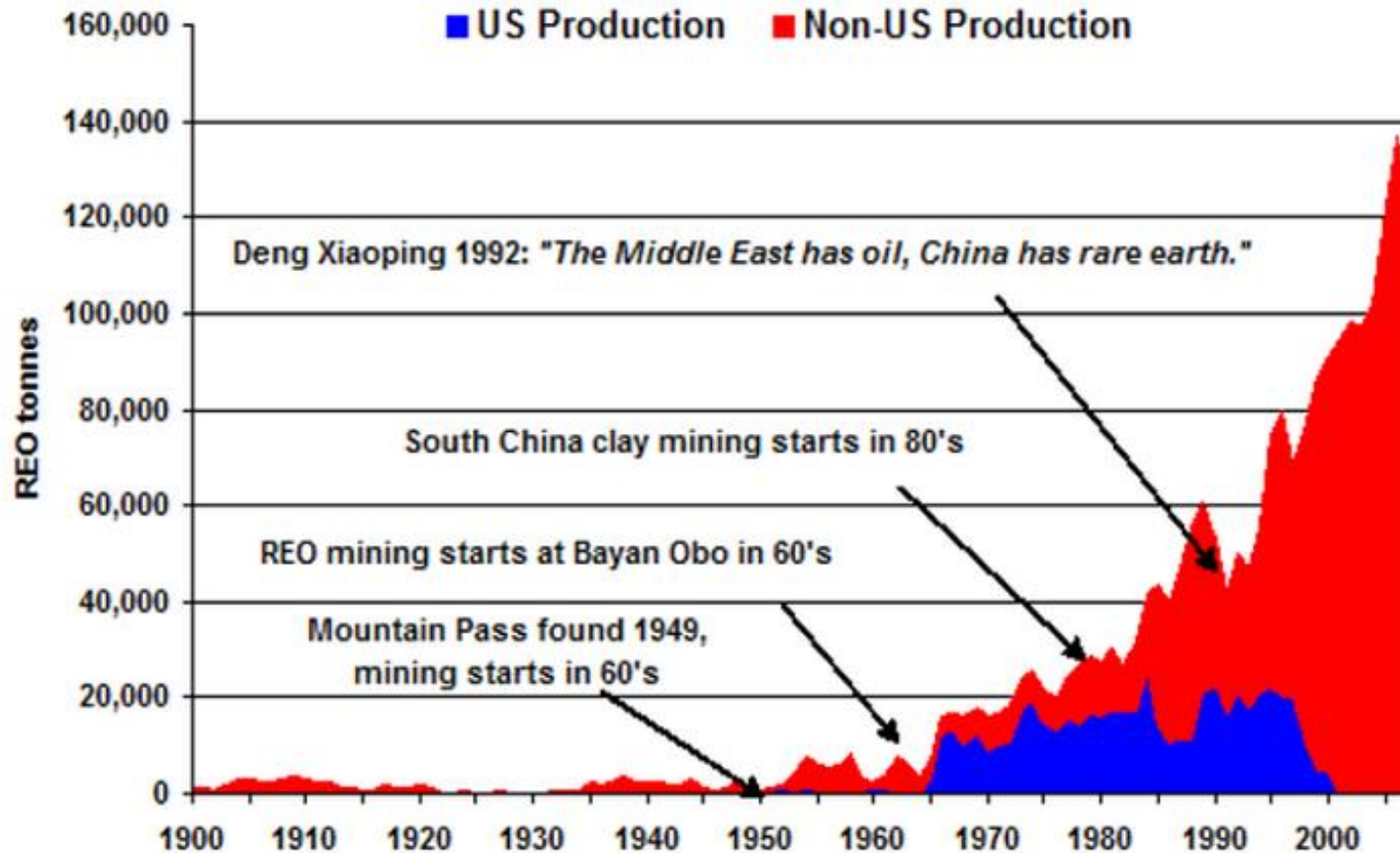
Occurrence naturelle et production

- **Gisements de production**

En raison de leurs usages multiples, souvent dans des domaines de haute technologie revêtant une dimension stratégique, les terres rares font l'objet d'une communication restreinte de la part des États, de sorte que les statistiques macroéconomiques à leur sujet demeurent très lacunaires.

Occurrence naturelle et production

- Évolution de la production dans le marché mondial



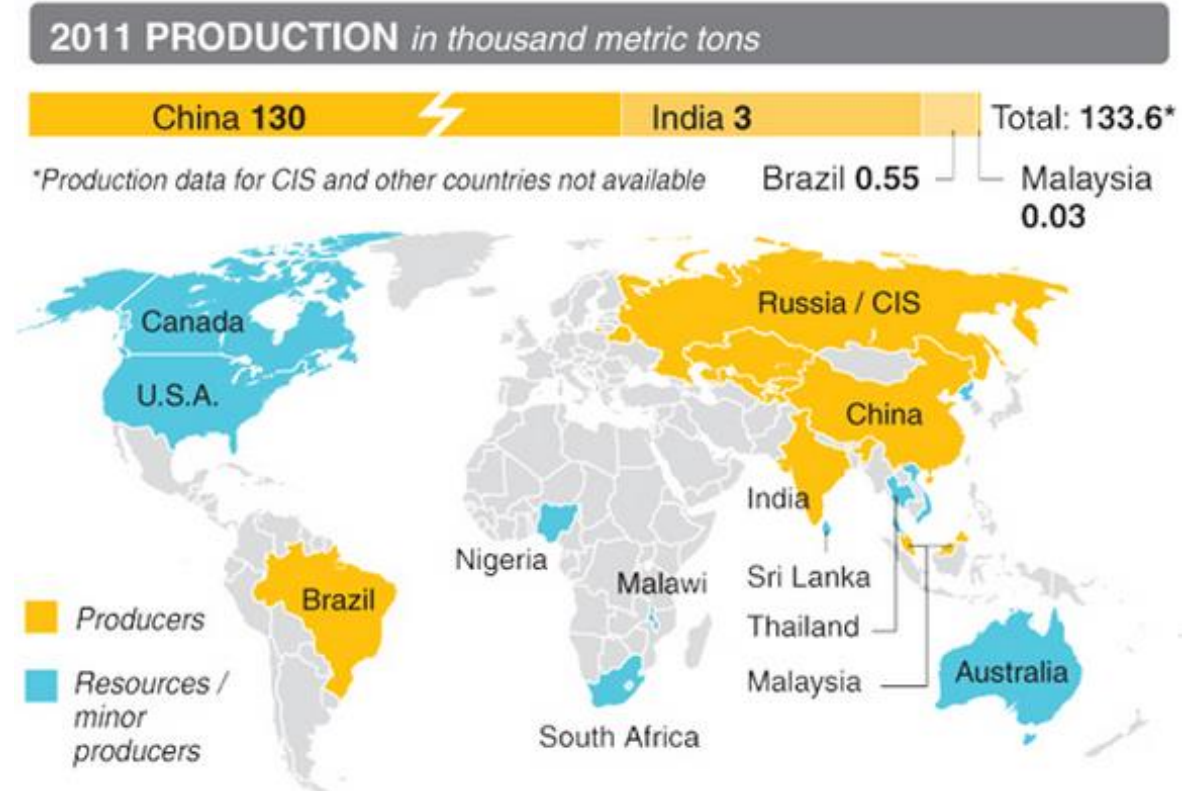
Source: USGS

Occurrence naturelle et production

- **La production mondiale actuelle**

- Selon un panorama établi par le BRGM (France), la production minière mondiale de terres rares avoisinait, en 2014, quelque 144.000 tonnes pour une consommation d'environ 120.000 tonnes et un marché qui pesait près de 3,2 milliards d'euros

- La demande globale en terres rares devraient encore aller croissante



CIS= Commonwealth of Independent States (Former Soviet Union states)

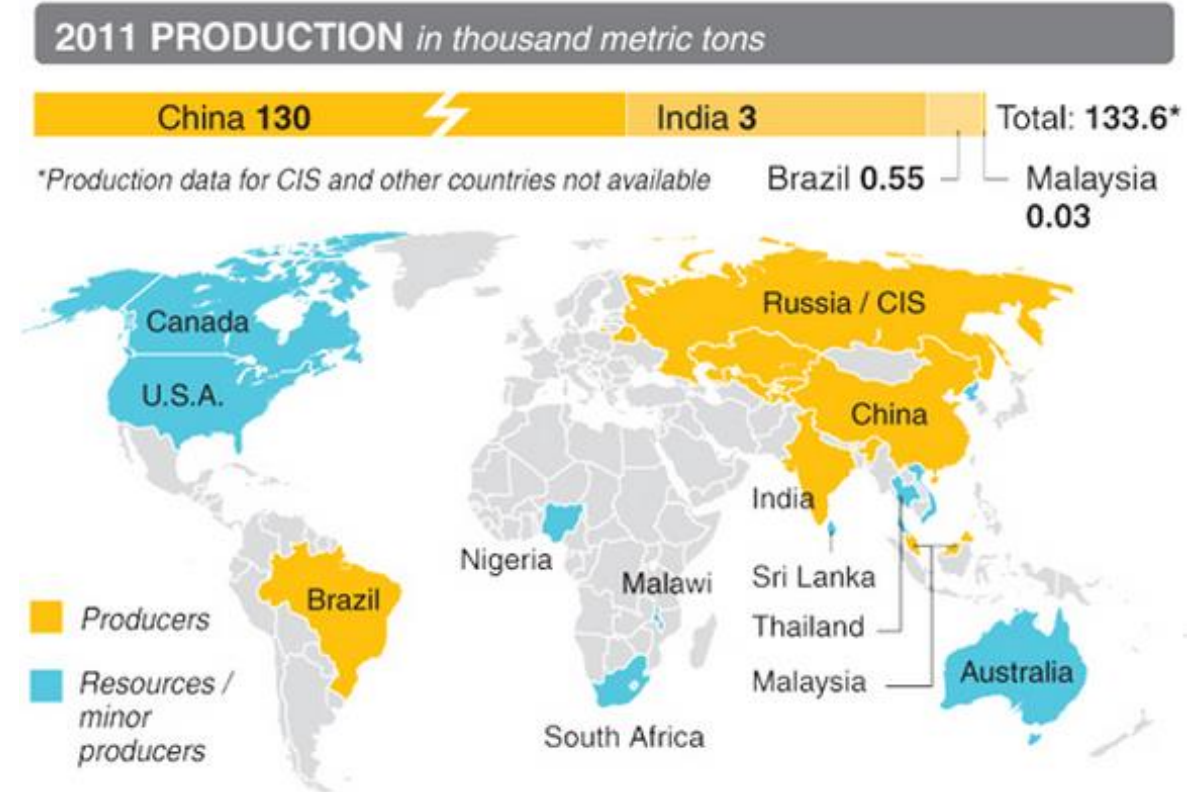
<http://blog.thomsonreuters.com/index.php/rare-earth-metals-graphic-of-the-day/> (page supprimée)

Occurrence naturelle et production

- **La production mondiale actuelle**

- Selon un panorama établi par le BRGM (France), la production minière mondiale de terres rares avoisinait, en 2014, quelque 144.000 tonnes pour une consommation d'environ 120.000 tonnes et un marché qui pesait près de 3,2 milliards d'euros

- La demande globale en terres rares devraient encore aller croissante



CIS= Commonwealth of Independent States (Former Soviet Union states)

<http://blog.thomsonreuters.com/index.php/rare-earth-metals-graphic-of-the-day/> (page supprimée)

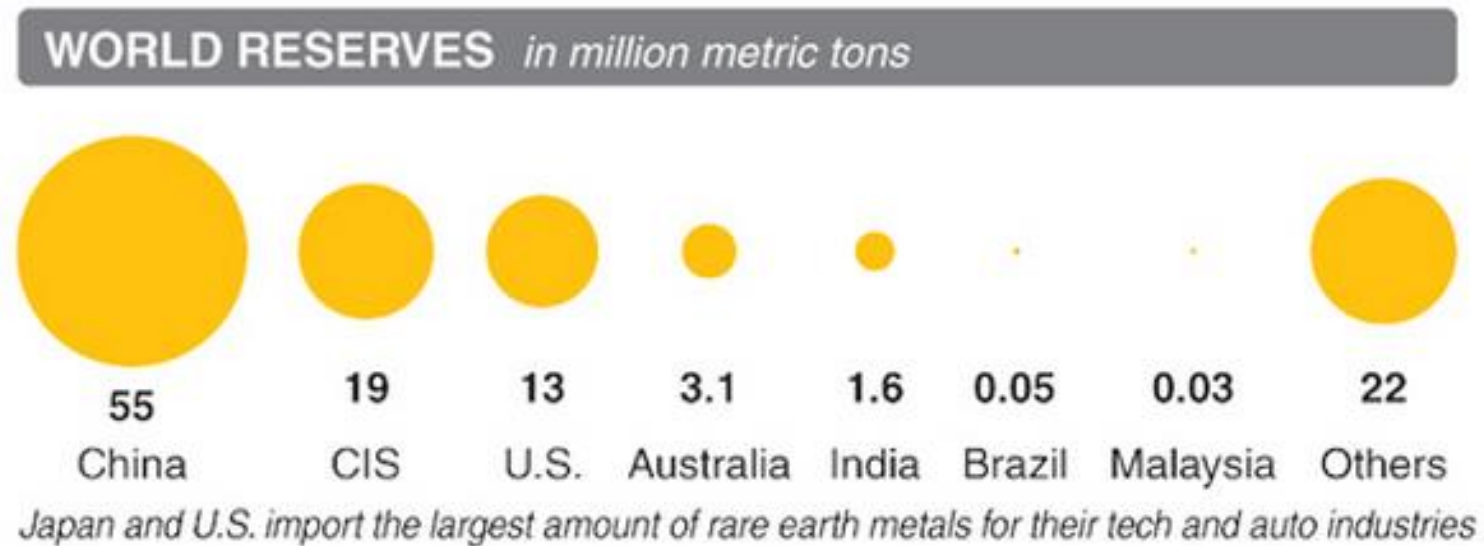
Occurrence naturelle et production

- A cause de l'impact environnement, de nombreux pays ont fermé leurs exploitations de terres rares;
- Aujourd'hui, c'est la Chine qui assure l'essentiel de la production mondiale, ce qui donne à Pékin un quasi monopole;
- Mais face à la flambée des prix des terres rares et les tensions politiques associées, de grands pays miniers souhaitent une diversification des sources d'approvisionnement ;
- Les États-Unis ont ainsi décidé en 2013 de réactiver la mine de Mountain Pass, le Canada, l'Australie et l'Afrique du Sud multiplient les projets d'extraction et de prospection, y compris dans les fonds marins du Pacifique.

Occurrence naturelle et production

- **Les réserves mondiales** (en oxydes de terres rares)

Évaluées en 2011 à environ 114 Mtonnes



Occurrence naturelle et production

- **Les réserves mondiales**

- Une évaluation plus récente (fin 2018) de l'IGG

- 120 millions de tonnes :

- Chine (37%), Brésil (18%), Viêt Nam (18%),
- Russie (10%), Inde (6%), Australie (2,8%), USA (1,2%)

Occurrence naturelle et production

- Selon les données IGG 2018 sur les réserves estimées (120 Mt) et au rythme de la consommation actuelle de REE de 2014 (144 kt/a), pour combien d'année l'humanité peut-elle encore fonctionner de manière similaire* ?

$$120\ 000\ 000\ [t] / 144\ 000\ [t/a] \approx 1000\ \text{ans!}$$

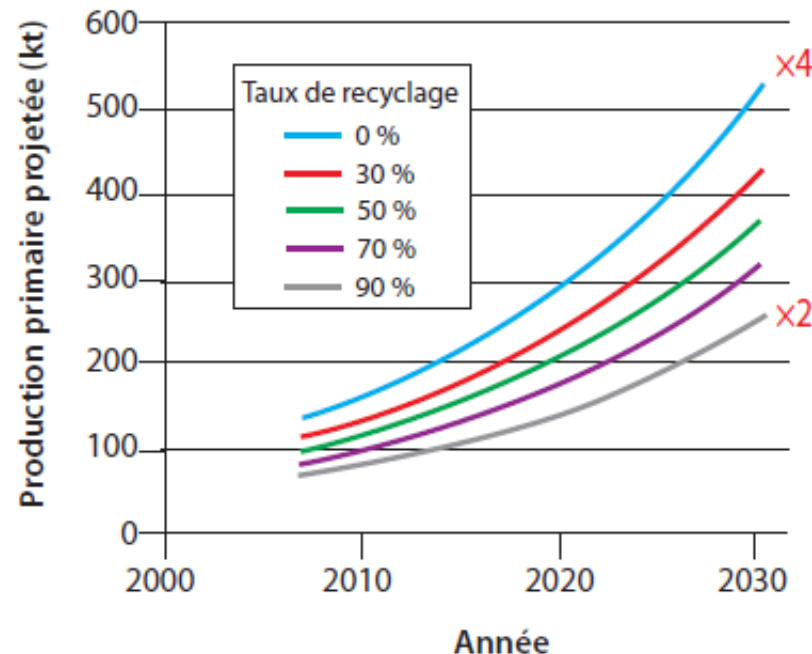
- Est-ce vraiment viable ?
- C'est à cette question que tente de répondre la suite...

* Ne pas considérer le recyclage ni l'augmentation de la consommation (elle a cependant déjà doublé en 20 ans).

Occurrence naturelle et production

- Selon les données IGG 2018 sur les réserves estimées (120 Mt) et au rythme de la consommation actuelle de REE de 2014 (144 kt/a), pour combien d'année l'humanité peut-elle encore fonctionner de manière similaire* ?

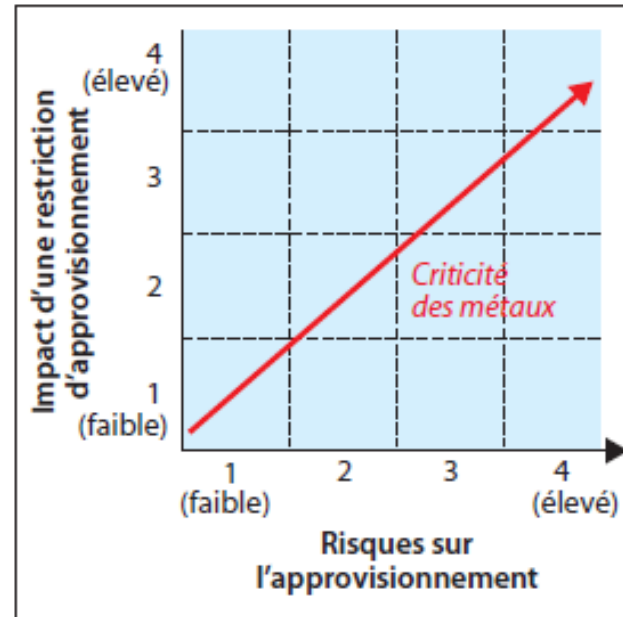
- Une production projetée de loin supérieure à la production réelle
- Néanmoins une forte hausse est prévue.



* Ne pas considérer le recyclage ni l'augmentation de la consommation (elle a cependant déjà doublé en 20 ans).

Occurrence naturelle et production

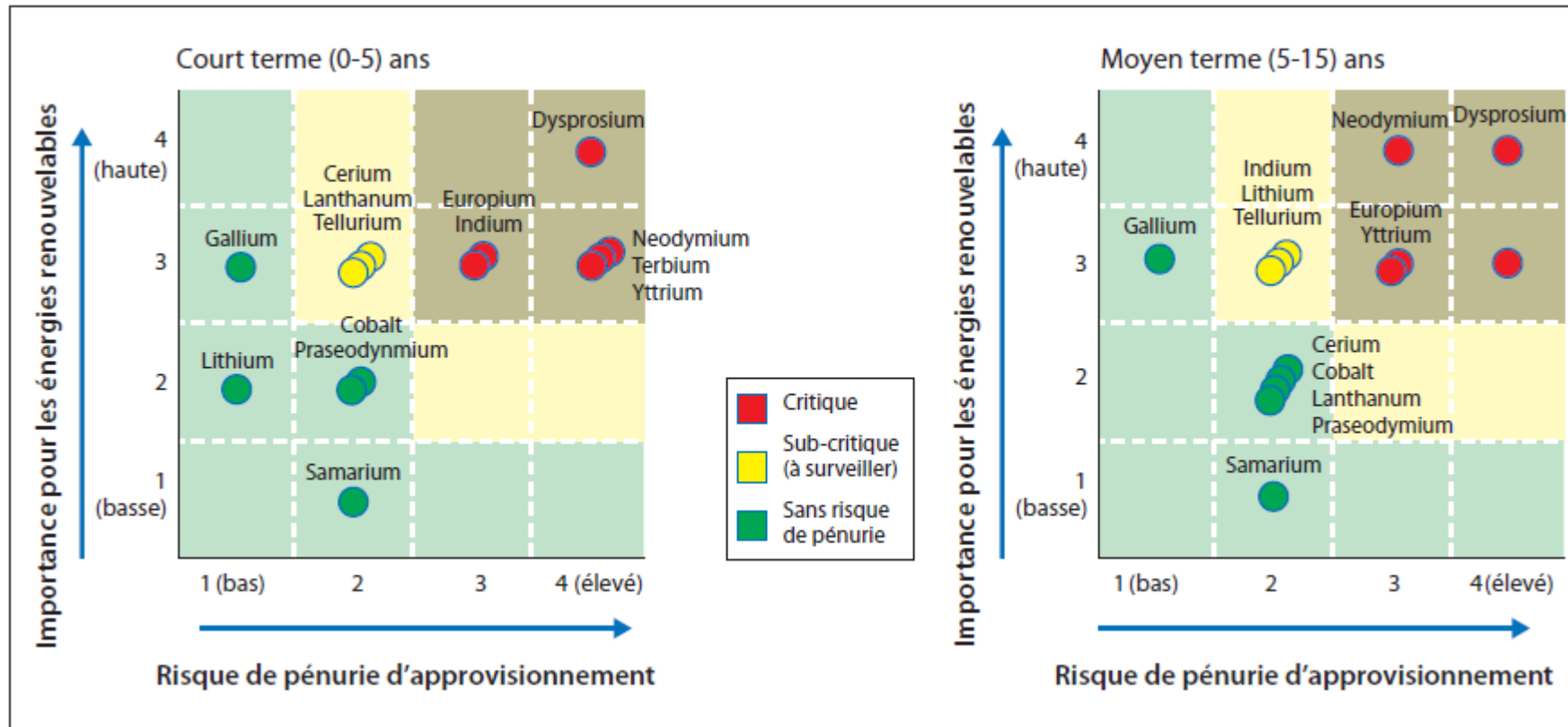
- Matrice de criticité
 - pour quantifier les situations de pénurie en éléments chimiques et les gérer



- doivent être fréquemment remises à jour, car elles dépendent de nombreux facteurs, économiques, géostratégiques et humains.

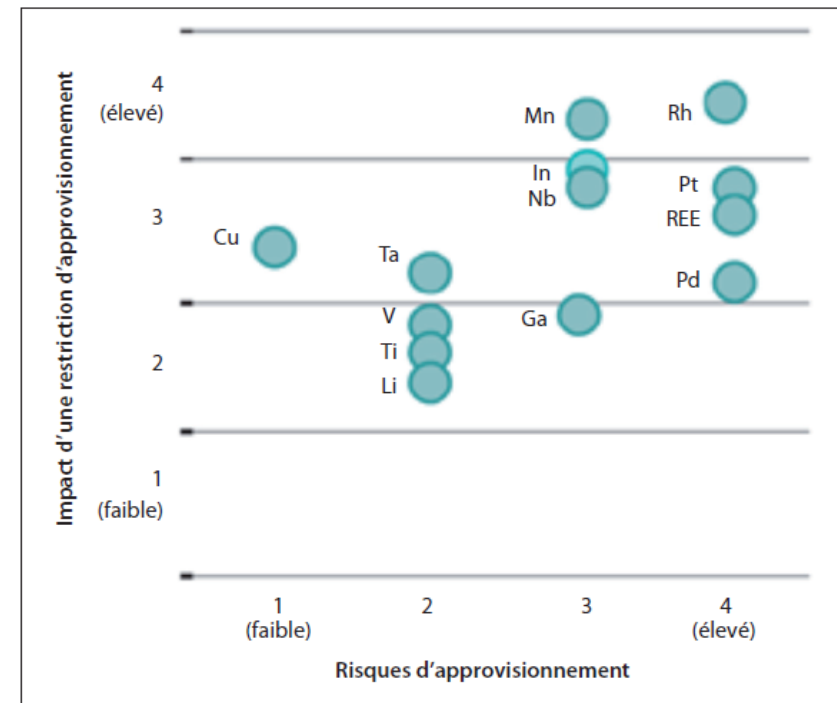
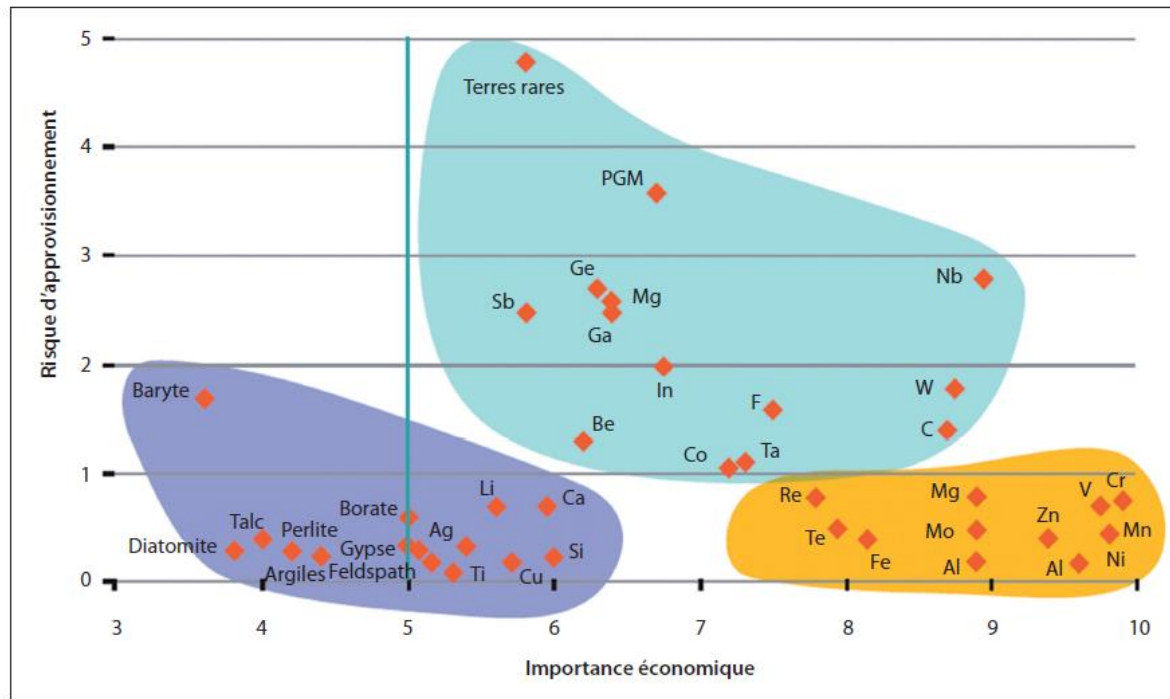
Occurrence naturelle et production

- Matrice de criticité
 - Exemples : USA Court terme et moyen terme



Occurrence naturelle et production

- Matrice de criticité
 - Exemples: Europe et USA

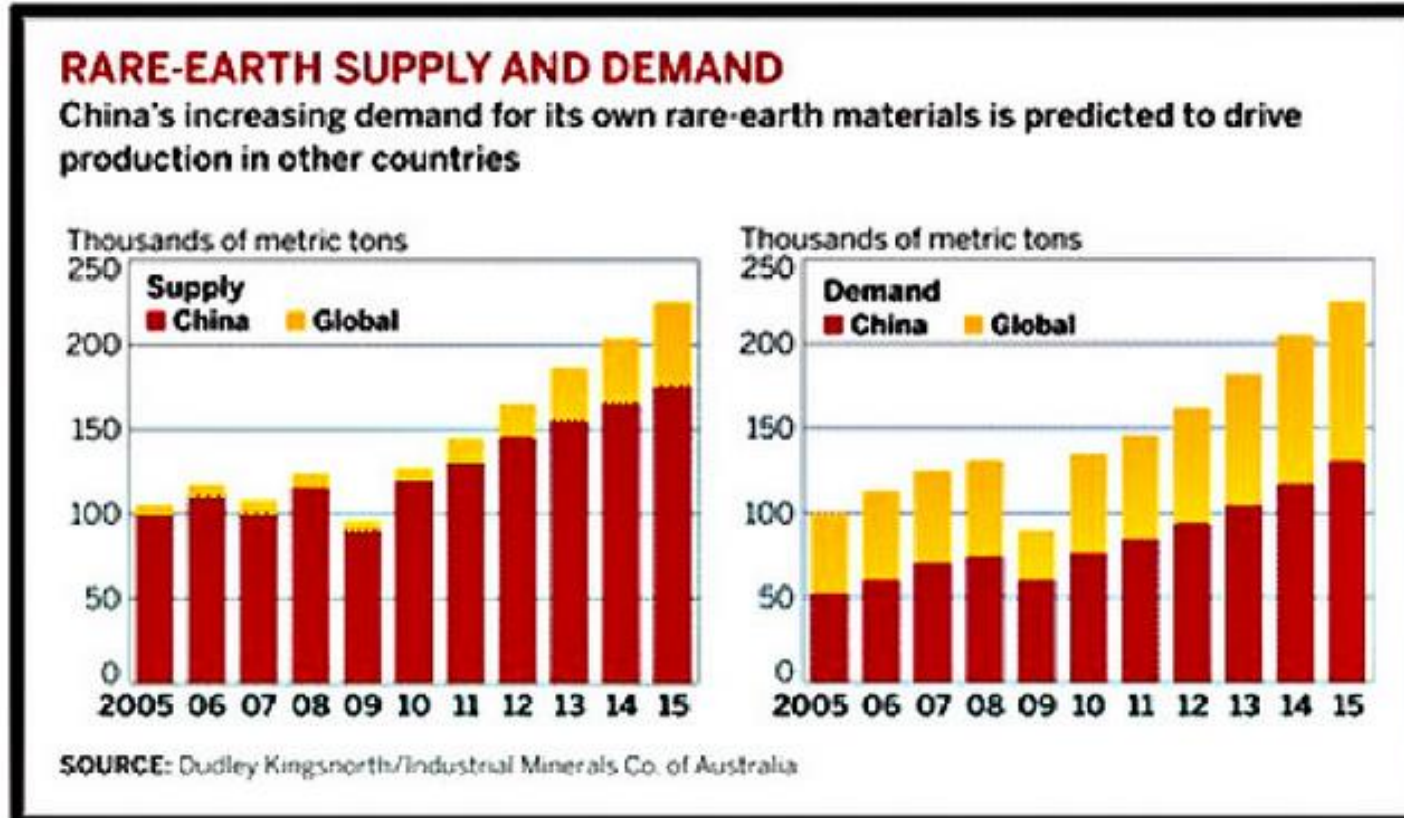


Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Liste, découverte et utilisations
- Occurrence naturelle et production
- ***Enjeux politico-énergétiques associés***
- Impacts environnementaux
- Recyclabilité
- Autres matériaux stratégiques en énergie
- Conclusion

Enjeux politico-énergétiques associés

- Le monopole chinois sur le marché des REE



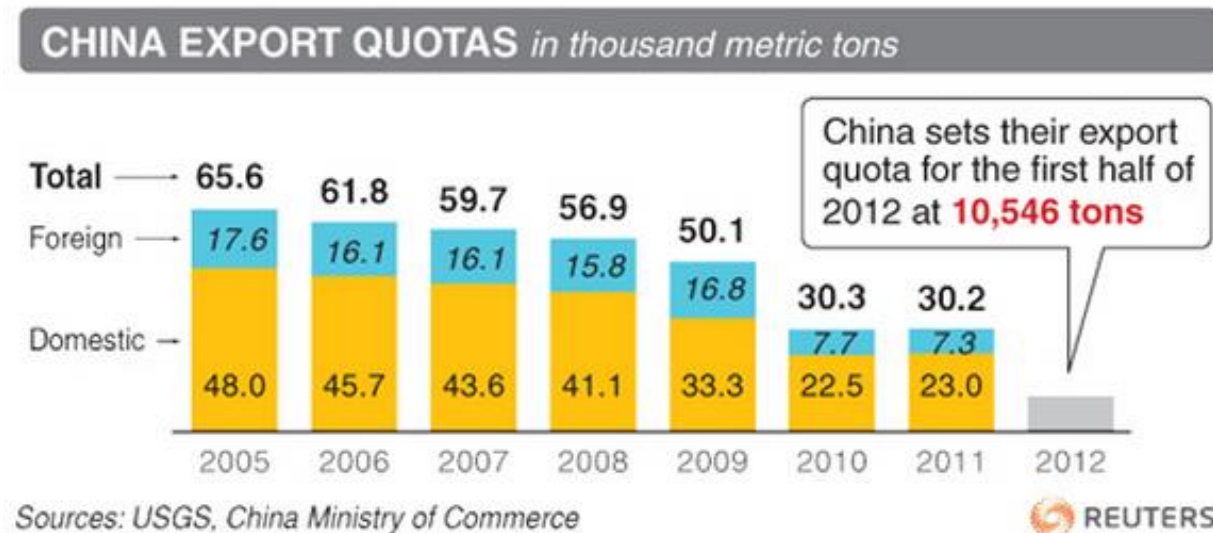
<http://www.theaureport.com/pub/na/rare-earth-metals-is-a-stock-pickers-market-jason-burack-and-mo-dawoud/> (page supprimée)

Enjeux politico-énergétiques associés

- **Les quotas chinois d'exportations**

Forte baisse des quotas depuis 2009. Argument chinois pour justifier cette baisse : le principal gisement, celui de Bayan Obo, vers Baotou, en Mongolie-Intérieure, menace d'être épuisé d'ici 2040.

La pratique a été dénoncée par l'EU, les USA et le Mexique. L'OMC a créé le 21 décembre 2010 un groupe spécial de règlement des différends.



Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Liste, découverte et utilisations
- Occurrence naturelle et production
- Enjeux politico-énergétiques associés
- ***Impacts environnementaux***
- Recyclabilité
- Autres matériaux stratégiques en énergie
- Conclusion

Impacts environnementaux

- Un bilan écologique déplorable
 - Les terres rares sont si éparpillées que le processus d'extraction est très long et complexe.
 - Beaucoup d'eau est requise
 - Des produits chimiques aussi
 - Lors de l'extraction et du raffinage des terres rares, des éléments toxiques sont rejetés dans l'environnement : des métaux lourds, de l'acide sulfurique, et même de l'uranium.

Impacts environnementaux

- Un bilan écologique déplorable
 - En 1998, les Etats-Unis furent contraints de fermer la mine à ciel ouvert de Mountain Pass, en Californie, après que des milliers de litres d'eau radioactive aient été accidentellement déversés dans la nature.
 - En Mongolie intérieure, la radioactivité mesurée dans les villages près de la mine de Baotou serait 32 fois supérieure à la normale (contre 14 fois à Tchernobyl).

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Liste, découverte et utilisations
- Occurrence naturelle et production
- Enjeux politico-énergétiques associés
- Impacts environnementaux
- ***Recyclabilité***
- Autres matériaux stratégiques en énergie
- Conclusion

Recyclabilité

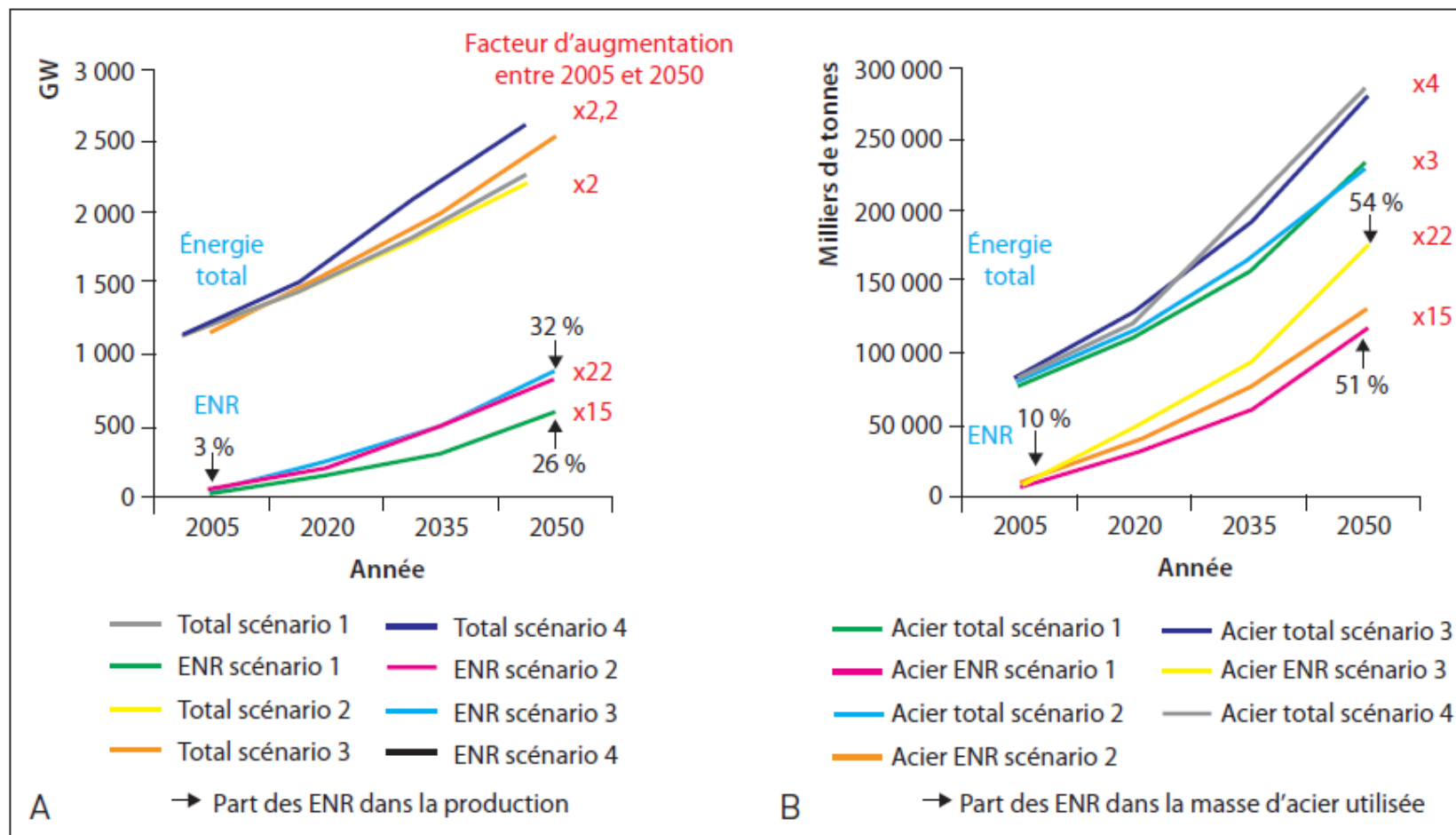
- Recycler plutôt que produire, voilà ce que proposent de nombreux chercheurs pour faire face à l'accroissement de la demande en terres rares. Une solution serait donc de recycler les déchets électroniques pour en extraire les terres rares et les réutiliser.
- Cependant, en 2018 le recyclage des terres rares (très complexe dans le cas des alliages) avait un coût supérieur à leur valeur. Le prix des métaux rares recyclés pourrait être compétitif si les cours des matières premières étaient eux-mêmes élevés, mais depuis fin 2014 ils sont bas.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Liste, découverte et utilisations
- Occurrence naturelle et production
- Enjeux politico-énergétiques associés
- Impacts environnementaux
- Recyclabilité
- ***Autres matériaux stratégiques en énergie***
- Conclusion

Autres matériaux stratégiques en énergie

- Exemple de l'acier (WEC projections pour l'Europe, 2007)



Autres matériaux stratégiques en énergie

- Si vous y trouvez un intérêt et désirez contribuer à ce cours, vous pouvez effectuer une recherche sur d'autres substances essentielles
- Le silicium paraît aussi essentiel que certaines terres rares
 - <http://www.leblogfinance.com/2006/12/pnurie-de-silic.html>
 - <http://www.leblogenergie.com/2007/12/08/pnurie-de-silic/>
 - <http://www.usinenouvelle.com/article/semi-conducteurs-la-penurie-de-silicium-s-installe.N77758>
 - <http://www.lechodusolaire.fr/ihs-agite-le-spectre-dune-penurie-dans-les-tranches-de-silicium-solaire/>
 - <http://www.consoglobe.com/le-sable-une-ressource-en-voie-de-disparition-cg>

Autres matériaux stratégiques en énergie

- En quantité, le sable est la ressource naturelle la plus consommée sur la planète, avant l'eau et le pétrole
- Denis Delestrac. 2011. *Sable : enquête sur une disparition*, documentaire diffusé par TéléQuébec et Arte
 - https://boutique.arte.tv/detail/sable_enquete_disparition (payant)
- Denis Delestrac. 2013. *Let's talk about sand*, at TEDxBarcelona
 - <https://www.youtube.com/watch?v=VOXikTyZxPA>

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Liste, découverte et utilisations
- Occurrence naturelle
- Enjeux politico-énergétiques associés
- Impacts environnementaux
- Recyclabilité
- Autres matériaux stratégiques en énergie
- ***Conclusion***

Conclusion

Bruno Goffé

- En fait, toutes nos intentions de changement dans nos besoins en énergie visent à remplacer le carbone fossile par les métaux
 - Ils permettent dans le court terme la conversion de l'énergie solaire que le carbone fossile a réussi sur le long terme.
- Ces métaux particuliers (les REE) ont une abondance limitée, une distribution inégale, des impacts environnementaux parfois insupportables, et leur recyclage est imparfait.
 - Justifient-ils que l'on reconsidère l'utilisation du carbone, l'élément le plus abondant à la surface de la Terre, celui qui a les plus grandes densités énergétiques et que l'on sait mieux recycler ?

Conclusion

Bruno Goffé

- Ne pourrait-on pas maîtriser à l'échelle du temps humain – quelques dizaines d'années – le cycle du carbone à travers la biomasse, la valorisation du CO₂ ?
- Transformer le CO₂ en hydrocarbures déplace le problème vers la fabrication d'hydrogène nécessaire pour faire un hydrocarbure à partir du CO₂.
- La question se pose d'accéder ou de fabriquer l'hydrogène par électrolyse, ou de transformer directement l'énergie solaire par la photosynthèse assistée.
- Ce sont ces questions, dans une vision de substitution, qu'il faut se poser.

Conclusion

- L'incertitude associée à la disponibilité des terres rares, éléments indispensables au développement des énergies renouvelables envisagé aujourd'hui, conduit à des questions fondamentales.
 - Les solutions envisagées actuellement sont-elles réalistes ?
- Mais ces éléments (les REE) ne sont pas les seuls qui entrent dans la composition des systèmes énergétiques.
 - Tôt ou tard, il faudra diminuer la consommation des ces éléments aussi.

La croissance infinie dans un système fini est impossible et nous en avons atteint les frontières

Bibliographie/médiagraphie

- <http://pubs.usgs.gov/fs/2014/3078/pdf/fs2014-3078.pdf>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Terre_rare#G%C3%A9ographie_%C3%A9conomique
- Publié en 2014 : <https://www.geo.fr/environnement/definition-terres-rares-scandium-yttrium-et-lanthanides-124433>
- <https://www.usgs.gov/media/images/mountain-pass-rare-earth-element-mine-california>
- <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-terre-rare-1647/>
- <https://www.systext.org/sites/all/animationreveal/mtxsmpl/#/7>
- <https://advances.sciencemag.org/content/6/8/eaay8647/tab-pdf>
- Site de l' U.S. Geological Survey : <https://www.usgs.gov/>
- https://www.canalacademie.com/ida9942-Les-terres-rares-des-proprietes-extraordinaires-sur-fond-de-guerre-economique.html?page=article&id_article=9942
- Guillaume Pitron, auteur de *La Guerre des métaux rares* (janvier 2018, éditions Les liens qui libèrent)
- <https://www.youtube.com/watch?v=znvquPhkmvw>
- <https://www.youtube.com/watch?v=LVWUDLBYb-Q>
- https://www.francetvinfo.fr/monde/environnement/cop24/pourquoi-les-energies-renouvelables-sont-moins-propres-que-vous-ne-le-pensez-en-tout-cas-pour-l-instant_3075963.html
- https://www.lecho.be/opinions/general/Pour-rouler-en-voiture-verte-il-faut-rouvrir-nos-mines/10082899?utm_campaign=MORNING_COMMENT&fbclid=IwAR2Ew8xdUKrIHHL9-soYx0doRivdMiPM9742NODRfGD6-Qd4HxzyIGWofFo



Merci de votre attention !

Lorsque cette capsule de formation est présentée en asynchrone (PDF récupérable sur le site du cours), si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

Période de questions

