



# IESF

SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS ET SCIENTIFIQUES DE FRANCE  
CÔTE D'AZUR

# BULLETIN

## 2022 – N°2

**Editorial**

**Le rouleau compresseur ministériel est en marche**

**Matières premières, métaux critiques, terres rares : Contexte international et enjeux**

**Jeu mathématique Sudoku**

## SOMMAIRE

<b>1. Editorial</b> .....	<b>2</b>
<b>2. Actualité</b> .....	<b>3</b>
2.1 Ukraine.....	3
2.2 Une image publicitaire vue dans le métro parisien le 06 avril 2022 .....	3
2.3 Conférence de Jean-Pierre Rozelot .....	3
2.4 Vœux AFFI 2022 - 27 janvier 2022 .....	3
<b>3. Le rouleau compresseur ministériel est en marche</b> .....	<b>4</b>
<b>4. Conférence de J.P. Loubinoux</b> .....	<b>6</b>
<b>5. Journée en Provence le 21 mars 2022</b> .....	<b>9</b>
<b>6. Assemblé Générale Ordinaire du 31 mars 2022</b> .....	<b>11</b>
<b>7. Matières premières, métaux critiques, terres rares : Contexte international et enjeux</b> .....	<b>12</b>
7.1 Le contexte international et les enjeux .....	13
7.2 Les terres rares.....	23
7.2.1 Quelques premières découvertes .....	23
7.2.2 Quelques rappels .....	23
7.2.3 Production, extraction et raffinage .....	24
7.2.4 Le recyclage : quelques actions du BRGM.....	25
7.2.5 France : Exploration de gisements dans les grands fonds sous-marins .....	27
7.3 Perspectives .....	28
7.4 Références.....	29
<b>8. Jeu mathématique : Solutions du bulletin N°1 de 2022</b> .....	<b>31</b>
<b>9. Jeu mathématique :</b> .....	<b>32</b>
<b>10. Sudoku</b> .....	<b>33</b>
<b>11. Sur votre Agenda</b> .....	<b>33</b>
<b>12. Cotisations 2022</b> .....	<b>34</b>

# 1. EDITORIAL

Ce numéro de notre bulletin est bien fourni, dénotant une bonne activité de notre association. Je m'en félicite, en remerciant tous les acteurs qui participent bénévolement à notre développement.

Nous avons repris le cycle de nos conférences, avec J.P. Loubinoux, sur les défis des chemins de fer au XXIème siècle (voir le compte rendu dans ce bulletin) ainsi que celui des visites, notamment à Salon de Provence où nous avons pu admirer une démonstration de la Patrouille de France. D'autres visites techniques sont d'ores et déjà prévues : Saint Michel l'Observatoire (où furent découvertes les premières exoplanètes qui valurent à leurs auteurs le prix Nobel) ou Virgo à Pise, haut lieu de l'interférométrie gravitationnelle. PMIS, très marquée par le COVID (comme partout en France) reprend ses programmes, sur des bases quelques peu différentes, pour s'adapter aux nouvelles orientations pré-, voire post-bac. Nous gardons de bons liens avec Polytech Nice-Sophia, ce qui nous a permis de tenir notre JNI dans les locaux de l'école, avec la participation d'une soixantaine d'étudiants ; merci à notre conférencier, J.P. Reich ; deux personnalités politiques (B. Asso, VP du département 06 et J.P. Mascarelli, VP CASA) sont venues spécialement soutenir cette initiative annuelle. Ils ont délivré un message fort aux élèves ingénieurs, afin qu'ils se souviennent de leur passage sphiapolitain, pour en être de futurs relais. J'espère que les événements désastreux que nous vivons actuellement en Ukraine, nous permettront de continuer nos activités. Enfin, nous recherchons encore et toujours plus de bénévoles pour s'investir dans le rayonnement d'IESF, tout particulièrement des jeunes filles scientifiques pour porter le message que la science et la technique sont accessibles à toutes !

Pour terminer, je voudrais insister ici sur la parution au JO d'un décret portant sur la coordination des activités de la CTI par le Hcéres. C'était dans l'air du temps depuis longtemps ; c'est maintenant chose faite. Le sujet m'a paru assez sérieux pour que je le développe plus avant dans une rubrique spécifique : je vous invite à la regarder de près, et de me transmettre vos observations, que vous soyez membres d'IESF-CA ou d'autres associations d'ingénieurs.

J'espère que vous avez passé de bonnes fêtes pascales et vous souhaite une bonne lecture de ce second bulletin de l'année 2022.

**Jean-Pierre Rozelot**  
**Président d'IESF-CA**



## 2. ACTUALITÉ

### 2.1 UKRAINE

*IESF-CA est consterné par les nouvelles dramatiques qui proviennent journallement d'Ukraine. En ces moments difficiles, nous exprimons notre profonde sympathie et notre solidarité à tous nos collègues ukrainiens, ainsi qu'à l'ensemble de la population.*

*Fidèles aux valeurs de liberté d'entreprendre, de liberté d'expression et de collaboration internationale que les communautés scientifiques et techniques portent et partagent, IESF-CA soutient toutes les initiatives qui permettent de promouvoir la paix en Ukraine, comme partout dans le monde.*

### 2.2 UNE IMAGE PUBLICITAIRE VUE DANS LE MÉTRO PARISIEN LE 06 AVRIL 2022



### 2.3 CONFÉRENCE DE JEAN-PIERRE ROZELOT

J.P. Rozelot a été invité par Marc Antoni, enquêteur ferroviaire et président de l'Association Ferroviaire Française des Ingénieurs et cadres (AFFI) pour donner une conférence au Cercle des Armées à Paris sur le thème « Que serait le monde sans l'astronomie ? » A cette occasion, et en introduction, il a pu présenter les activités IESF en Côte d'azur. Une soixantaine d'auditeurs étaient présents.

### 2.4 VŒUX AFFI 2022 - 27 JANVIER 2022



La soirée des Vœux 2022 AFFI s'est déroulée le 27 janvier 2022 dans les magnifiques salons du Cercle National des Armées à Paris. Les règles sanitaires en conséquence de la pandémie de COVID-19 ont limité le nombre participant et ont contraint de faire cette manifestation sous la forme d'un dîner servi à table.

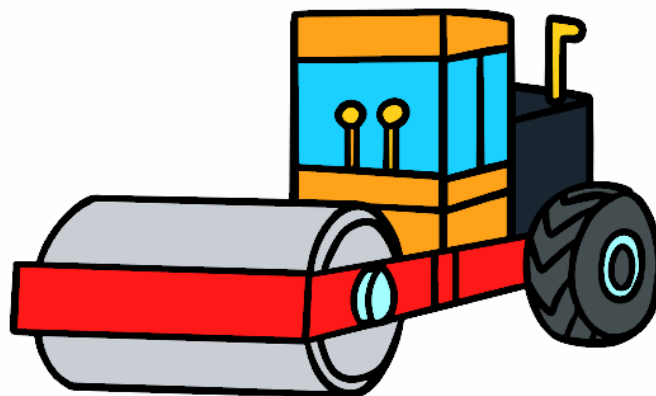
Ce contexte n'a pas empêché d'apprécier l'intervention de notre invité M. Jean-Pierre ROZELOT, président des Ingénieurs et Scientifiques de France Cote d'Azur. Il est diplômé de l'INP Grenoble, Docteur ès sciences astrophysiques et économiques. Il a été Directeur Adjoint à l'Institut des Sciences de l'Univers (INSU-CNRS) en charge des questions de formation en astronomie, Conseiller scientifique auprès des Ambassades de France en

Pologne, de l'Union européenne à Bruxelles.

Son intervention comportait deux temps distincts. La première en sa qualité de président de l'IESF Cote-Azur évoquait la place de l'ingénieur dans le monde et il nous a invité mettre à notre métier d'ingénieur plus en valeur. Dans sa deuxième partie, Jean-Pierre ROZELOT a par ces mots mis tout l'auditoire la tête dans les étoiles en retraçant les grandes étapes de l'astronomie qui commença bien avant JC et continuant jusqu'à nos jours.

<https://www.ingenieur-ferroviaire.net/>

### 3. LE ROULEAU COMPRESSEUR MINISTÉRIEL EST EN MARCHÉ



Le sous-titre de cette chronique pourrait être : les écoles d'ingénieurs (à la française) sont-elles solubles dans l'université ? Une question déjà très ancienne et qui ne cesse d'agiter tant le milieu universitaire que celui des ingénieurs, avec des soubresauts techniques, administratifs et politiques.

Dernière saillie en date, et non des moindres. Vient de paraître au JO du 22 février 2022, le décret n° 2022-225 « pris pour l'application de l'article L. 114-3-1 du code de la recherche relatif à la coordination des instances d'évaluation nationales par le Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (Hcéres) ». En d'autres termes moins législatifs, ce Hcéres est chargé de coordonner l'action des instances d'évaluation nationales que sont (i) la commission d'évaluation des formations et diplômes de gestion et (ii) la **commission des titres d'ingénieur** (la CTI). Selon le nouveau décret, le Hcéres assure :

- la cohérence entre les référentiels d'évaluation élaborés par chaque instance (Hcéres et CTI);
- les calendriers et les modalités de déroulement des évaluations, la politique d'information et de partage des données ;
- l'action européenne et internationale.

De manière plus crue, la CTI est dépossédée de son leadership, au profit du Hcéres. Il faut bien sûr y voir la main du ministère actuel, qui a fait passer ce décret en force avant les élections. Il ne faut peut-être ne pas y voir que du noir, car, comme toujours, il y a sans doute de bons aspects. Le moins mauvais étant une préparation plus homogène des dossiers d'évaluation présentés par les écoles, d'éviter des doublons et des présentations qui peuvent parfois être redondantes. Toutefois, c'est le Hcéres qui est chargé de produire in fine les synthèses de l'offre régionale de formation et, de recherche, et d'en assurer la cohérence.

Et alors direz-vous ? En s'en tenant à l'esprit, ce décret semble apporter, pour une fois, une simplification de marches administratives. Mais on voit bien que c'est l'Enseignement Supérieur et la Recherche qui met la main sur les écoles d'ingénieurs. Et ce, d'autant plus que le Ministère milite pour la création à marche forcée des EPE (Etablissements Publics Expérimentaux)<sup>1</sup>.

Enfin, la CTI jouit incontestablement d'une réputation de sérieux et de rigueur. Ses accréditations n'ont jamais, à ma connaissance du moins, souffert de critiques majeures. Elles sont respectées. Il n'en va pas de même du Hcéres. En mars 2021, la Cour des comptes rendait public un rapport d'une grande sévérité sur les activités menées par le Hcéres entre 2014 et 2020 : « Les rapports d'évaluation du Haut Conseil ne jouissent pas dans le milieu académique, d'une réputation à la hauteur de l'effort consenti. Menés sur la base de référentiels très normés et de procédures particulièrement longues, les travaux d'évaluation pèsent sur les établissements, et plus encore sur des unités de recherche déjà chargées en travaux non scientifiques ». Selon un plaidoyer d'enseignants chercheurs publié dans le Monde du 11 02 2022, « la bureaucratie du Hcéres nuit gravement à la recherche française : sa nouvelle politique d'évaluation va se traduire par un épouvantable gaspillage de moyens humains, intellectuels et nuanciers ». On ne peut qu'être inquiet pour la CTI, qui certes a aussi son lot de procédures normées, mais qui de manière approfondie, en se déplaçant sur le terrain notamment, permet de suivre, voire d'anticiper, avec les équipes locales, les besoins des écoles. La CTI, est, de par sa composition (32 membres dont 16 du monde académique et 16 du monde des entreprises) à même de suivre les évolutions de la société, les besoins du monde socio-économique et d'adapter le cadre de la formation de l'ingénieur au profil de l'ingénieur du XXIe siècle. De mon point de vue, ce souci majeur de mettre l'ingénieur en perspective des évolutions de la société, de lui donner, par une formation solide, la capacité de comprendre, au-delà des enseignements de base traditionnels (physique, chimie...), des matières aussi diverses que la conduite de projet, l'innovation, la gestion des entreprises, les technologies financières, etc. Les évaluations successives ont montré que cette transdisciplinarité est l'une des conditions primordiales du succès des écoles « à la française ».

Notez que plusieurs délégations IESF (dont la nôtre), voulons défendre un partenariat avec les écoles doctorales (universitaires) pour orienter les doctorants (et les étudiants masters dernière année), par le biais de cours ou

---

<sup>1</sup> Fera l'objet d'un prochain article !

conférences, dans le cadre des 90 heures hors quota recherche pure, vers des enseignements justement transdisciplinaires. Car jusqu'à présent du moins, il faut attendre le doctorat à l'université pour que les étudiants puissent bénéficier d'une ouverture sur le monde de l'entreprise... Seules des bourses spécifiques (type CIFRE) le font, mais cela reste encore marginal. Force est de constater que nombre d'universités rechignent à ce type de partenariat, pour s'arroger seules la conduite de telles formations, soutenues en cela par le MESR : « *une formation, du moment qu'elle est diplômante ne peut être conduite QUE par des universitaires* ».

Encore plus préoccupante est la situation de la CTI dans le concert international des écoles d'ingénieurs. Elle s'est vu renouveler la confiance de trois organisations européennes, l'European Association for Quality Assurance in Higher Education (ENQA), l'European Network for Accreditation of Engineering Education (ENAE) et l'European Quality Assurance Register (EQAR). Ces instances ont maintenu l'autorisation donnée à la CTI de délivrer des labels au moins jusqu'en 2024. Au-delà de cet incontestable acquis, la CTI a développé sa propre politique internationale, notamment pour l'évaluation et l'accréditation des établissements étrangers délivrant des diplômes et titres étrangers d'ingénieur. Elle peut ainsi agir sur des sites étrangers (Vietnam, Maroc...) et faire rayonner le savoir-faire indéniable d'instance d'accréditations. Elle a actuellement une réflexion stratégique sur la délivrance d'un « label CTI », gage de sérieux incontestable, ainsi que sur la création et la délivrance d'un label qualité des Instituts Franco-Chinois. Qu'en sera-t-il dans l'avenir, le Hcéres ayant sa propre politique internationale ?

Je ne pense pas (mais je peux me tromper !) que *le monde universitaire* seul pourra relever les défis qui s'ouvrent de nos jours. Le Hcéres pourra-t-il évaluer les quelques 7.000 masters conduits en France dans 556 écoles habilitées<sup>2</sup> (à délivrer le grade de master) ? Et dont certains (mais lesquelles pour les étudiants, pas toujours très clair pour eux) permettent de présenter un dossier pour une admission en école d'ingénieur (en seconde ou troisième année). Les enjeux sociétaux liés aux développements technologiques actuels nécessitent que les écoles d'ingénieurs s'adaptent, mais doivent rester évaluées par une instance indépendante, dont la composition reflète la diversité de la profession, et pas seulement le monde académique.

On l'aura compris, le Ministère entend conduire une politique de formation des ingénieurs sous la coupe des établissements publics, à ce jour expérimentaux, (les EPE), mais qui auront vocation à ne plus l'être (expérimental) pour devenir pérennes. Là aussi, c'est peut-être l'avenir, mais à condition que la dynamique soit collective et préparée. De mon point de vue, elle ne l'est pas.

**J.P. Rozelot**

**Président IESF-CA**

*Petit glossaire.*

Rappelons que :

- le **Hcéres** est « l'autorité administrative indépendante chargée d'évaluer l'ensemble des structures de l'enseignement supérieur et de la recherche, et de valider les procédures d'évaluations conduites par d'autres instances. Par ses analyses, ses évaluations, et ses recommandations, il accompagne, conseille et soutient la démarche d'amélioration de la qualité de l'enseignement supérieur et de la recherche en France, tandis que
- la **CTI** (mentionnée à l'article L. 642-3 du code de l'éducation), était jusqu'à présent un « organisme **indépendant**, chargé par la loi française depuis 1934 d'évaluer toutes les formations d'ingénieur, de développer la qualité des formations, de promouvoir le titre et le métier d'ingénieur en France et à l'étranger. Dans le cadre de ses missions, la CTI œuvre pour que les écoles françaises répondent aux besoins nouveaux des jeunes et des entreprises, en prenant en compte l'ouverture mondiale de l'enseignement supérieur ».
- les **EPE** (Etablissements Publics Expérimentaux). Créés par l'ordonnance du 12 décembre 2018 : « *Le nouvel établissement expérimente de nouveaux modes d'organisation et de fonctionnement dans les conditions prévues dans l'ordonnance, afin de réaliser un projet partagé d'enseignement supérieur et de recherche défini par les établissements qu'il regroupe, dans le respect des objectifs et missions de l'enseignement supérieur* ». 13 EPE sont en vigueur au 31 octobre 2021, par ex: l'Université de Clermont-Auvergne, née au 1<sup>er</sup> janvier 2021, regroupant tous les instituts (droit, lettres, santé, sciences...) et trois écoles d'ingénieurs (ISIMA, POLYTECH Clermont et SIGMA, elles-mêmes fédérées au sein de l'INP-Clermont !); l'IP -Institut Polytechnique de Paris, qui réunit cinq grandes écoles d'ingénieurs françaises (X, ENSTA, ENSAE, Télécom Paris et Télécom Sud-Paris) créé par décret du 31 mai 2019 autour de l'École Polytechnique .... Parfois les EPE signe les diplômes. Ex: Centrale Nantes (double signature, EPE, école). Les EPE sont d'ores et déjà évalués par le Hcéres.

⇒ On consultera aussi avec profit le bulletin N° 2018 N° 3 sur le fonctionnement de la CTI, par J.L. Droulin.

---

<sup>2</sup> <http://etudinfo.com/diplomes/master/2>

La ministre de l'enseignement supérieur et de la recherche, Geneviève Fioraso, en dénombrait 7.700 en 2013.

Cette multiplicité -associée à des intitulés parfois obscurs- ne facilite pas la visibilité des formations. La ministre Mme Vidal a donné pour objectif la disparition de 5.800 spécialités de master. Certaines formations n'attirant pas assez d'étudiants pourraient être aussi mutualisées entre les différentes universités.

## 4. CONFÉRENCE DE J.P. LOUBINOUX

Au **Learning Centre** de l'Université de la Côte d'Azur (Sophia-Polytech) pour le compte des IESF, le 22 février 2022, sur le thème « **Les 5 grands défis des chemins de fer au XXI<sup>ème</sup> siècle** »

Cette conférence est disponible en vidéo sur le site [coteazur.iesf.fr](http://coteazur.iesf.fr)



*IESF-CA a invité J.P. Loubinoux, Ingénieur ECP pour ré-initialiser notre cycle de conférences après l'interruption due au COVID. J.P. Loubinoux a travaillé à la Délégation du Commerce extérieur français à Hong Kong (1977-1978) avant de rejoindre la SNCF où il a occupé diverses responsabilités. Il a été nommé Directeur Général de Fret SNCF International (2000), puis, de 2001 à 2009, président et directeur général de SNCF International et directeur du développement international SNCF. En mars 2009, Jean-Pierre Loubinoux a été élu Directeur général de l'Union internationale des chemins de fer (UIC), l'association mondiale représentant le secteur ferroviaire englobant 240 chemins de fer dans 95 pays, sur tous les continents. Son mandat a été régulièrement renouvelé lors des Assemblées générales successives de l'UIC jusqu'à son honorariat fin 2017. Il détient actuellement diverses responsabilités dont celles de la Présidence de l'association South East Europe Strategic Alliance (SEESARI), et la Présidence du Cercle des Nouveaux Mondes.*

*Nota : JP Loubinoux a toujours eu une sensibilité artistique singulière, nourrie par une vie de voyages et de rencontres aux quatre coins du monde. Elle s'est exprimée à travers des poèmes et des tableaux disponibles en librairie et sur « [Artmajeur.com/jploubin](http://Artmajeur.com/jploubin) ».*

On pourra également consulter le bulletin de notre association : 2019 N°1 disponible sur le site [coteazur.iesf.fr](http://coteazur.iesf.fr), à propos de l'Union Internationale des Chemins de fer.



<https://static.mediapart.fr/etmagine/default/files/2017/12/22/tren-electrico-bi.jpg>

Le système ferroviaire constitue un réseau physique d'infrastructures qui sillonne les régions, les pays et les continents pour aider et accroître la mobilité de nos sociétés modernes et leurs échanges de biens et de personnes. Ce que l'on peut observer aujourd'hui dans le contexte géopolitique n'est pas très encourageant :

- Fragmentation géographique,
- Diversité et instabilité politiques, voire tensions nationalistes,
- Désintégration économique.

Tout ceci ne devrait pas favoriser le développement des infrastructures ferroviaires qui nécessitent :

- l'interopérabilité,
- des investissements élevés à long terme,
- une stabilité dans l'espace et dans le temps.

Mais en raison de certaines des valeurs fondamentales du rail,

- capacité, sécurité et durabilité,
- recherche et innovation,
- impact social sur l'aménagement du territoire et la croissance du PIB là où il se développe,

la nécessité du rail est de plus en plus présente dans la vision de nos responsables politiques nationaux, européens ou d'outre-mer. Dans les investissements prévus pour la mobilité, la part du rail à travers le monde ne cesse d'augmenter pour atteindre un niveau sans précédent de 40%. Plus de 5000 milliards de dollars seront dépensés dans la prochaine décennie pour les grands projets ferroviaires afin de répondre à la croissance attendue des besoins de mobilité.

Dans ce contexte du 21<sup>ème</sup> siècle, le rail est confronté à 5 défis majeurs.

1. La notion même **de transport** s'est transformée en notion de **mobilité**, qui elle-même devient un besoin **d'accessibilité**. En d'autres termes, le mot « ferroviaire », implique que l'interopérabilité s'est transformée en intermodalité et encore plus en intégration modale. Il faut désormais penser en termes de chaînes logistiques, que ce soit pour le trafic de marchandises ou de passagers, afin de surmonter toutes les barrières et frontières, qu'elles soient techniques, physiques, modales, juridiques ou même culturelles. Le transport, avec le rail comme épine dorsale, doit être conçu comme une « SISICOM », anglicisme pour « Chaîne de mobilité internationale, intégrée, connectée et durable ». Dans cette chaîne modale, la gestion des interfaces entre les différents systèmes devient cruciale en termes d'exploitation et de connectivité des infrastructures.
2. **L'urbanisation rapide** est le deuxième défi. En effet, 2 milliards de personnes vont s'urbaniser d'ici 2030, principalement en Asie. 43 mégapoles auront une population supérieure à 20 millions d'habitants. Cela multipliera la congestion urbaine qui coûte déjà 200 milliards de dollars par an et augmentera les émissions de CO2 de 300% en 10 ans, dans le contexte actuel. Ce boom de la mobilité intra-muros nécessitera des investissements importants. Les besoins attendus sont équivalents à 6% du PIB mondial, alors qu'actuellement seulement 0,5% en moyenne est dépensé, et entre 1 et 2% dans les pays en développement. Mais la solution à ce défi n'est pas seulement financière ; la connectivité intelligente avec un rôle croissant des technologies de l'information et de la communication est une autre clé pour gérer la mobilité du premier et du dernier kilomètre.

3. **L'évolution d'une stratégie de concurrence modale**, poussée au 20ème siècle vers une stratégie de complémentarité entre les modes, est un défi évident afin de créer de nouvelles chaînes de mobilité et de nouveaux services qui amélioreront la qualité et la productivité. Cette approche coopérative intermodale n'est pas facile à réaliser alors que dans le même temps, la concurrence intramodale est toujours exigée au niveau européen. Le développement d'un mélange intelligent de mobilité pour un système de transport optimisé et durable peut contribuer à un grand nombre d'objectifs de développement stratégique mis en évidence par le rapport des Nations Unies sur la mobilité. Nous devons passer de l'atténuation et de la réduction du CO2 de chaque mode, à l'adaptation d'un système de transport intégré et résilient.

4. Le 4ème défi est de ne pas manquer les **bénéfices de la révolution numérique** en cours, et de maximiser ses impacts en termes de Productivité, Prévisibilité et Connectivité, afin d'améliorer les capacités de transport et les services. Grâce à l'évolution des technologies de l'information, aux 100 milliards d'loT (Internet of Things) en 2030, à l'apprentissage automatique, au cloud, à la blockchain et à l'informatique quantique, on estime qu'entre 10 000 et 15 000 milliards de dollars seront ajoutés au PIB mondial en 15 ans seulement ! Cela aura un impact sur :

- les services avec l'information et la billetterie,
- la maintenance prédictive des infrastructures et du matériel roulant afin de réduire de 50% le coût du cycle de vie,
- la signalisation par satellite et la capacité des grandes et petites lignes, contribuant à l'objectif de doubler la capacité,
- la cybersécurité.

Dans ce monde de Big data, tout doit être conçu et anticipé intelligemment pour être connecté correctement.

5. Le développement de **nouveaux corridors** est enfin, et surtout, un fantastique défi en termes de coopération internationale et de financement à long terme. En Europe bien sûr avec les 10 corridors du programme *Trans-European Transport Network* (TEN-T)<sup>3</sup>, traversant toute l'Europe et reliant l'Europe du Sud-Est à l'Asie centrale, mais aussi avec de nouveaux corridors comme le rail *Baltica*<sup>4</sup>, la Finlande, le Caucase, l'Ebre en Espagne... Dans d'autres parties du monde avec le corridor *Bi-océanique*<sup>5</sup> en Amérique du Sud, ou le *Transsibérien*, ou bien sûr la Route de la Soie OBOR<sup>6</sup>. Cette dernière est probablement le plus grand défi du 21ème siècle, dans un contexte géopolitique compliqué. En 2014, il n'y avait que 300 trains reliant la Chine à l'Europe occidentale. En 2020, il y en avait 400. Et la part de marché du rail n'est encore que de 1% dans un marché d'échanges de marchandises de 1000 milliards de dollars par an.

En conclusion, ces 5 défis majeurs dans un monde en mutation sont particulièrement sérieux pour répondre à la demande en termes de capacité et de qualité des services. Tous les modes doivent donc s'unir et se concentrer sur quelques enjeux majeurs :

- Impact social et économique,
- Gestion des objectifs environnementaux des interfaces entre l'intra et l'intermodal,
- Rénovation des infrastructures existantes,
- Construction des chaînons manquants pour réaliser des corridors internationaux plus longs,
- Meilleure gestion des actifs et des capacités grâce à l'intelligence numérique.

Tout ceci n'est bien sûr qu'un monde visionnaire et pacifique qui était déjà le rêve de Victor Hugo lequel écrivait au 19<sup>ème</sup> siècle (Discours d'ouverture du Congrès international de la Paix à Paris, le 21 août 1849) : "*Un jour viendra où il n'y aura plus d'autres champs de bataille que les marchés s'ouvrant au commerce et les esprits s'ouvrant aux idées*".

PS : On lira aussi dans les actualités IESF : [JPR+JPL+annE9e+du+rail+2021+v1.pdf](https://www.iesf.fr/IMG/pdf/JPR+JPL+annE9e+du+rail+2021+v1.pdf) ([iesf.fr](https://www.iesf.fr/))

→ **Ce texte a été écrit avant le 24 février 2022. L'avenir devient incertain quant à l'UIC.**

*Jean-Pierre Rozelot et Jean-Pierre Loubinoux*

---

<sup>3</sup> Programme de développement des infrastructures de transport de l'Union européenne mis en place par le Parlement et le Conseil européen.

<sup>4</sup> Projet ferroviaire européen, prioritaire dans le cadre du réseau transeuropéen de transport (TEN-T) de l'Union européenne, ayant pour objectif de relier la Finlande, les Pays Baltes et la Pologne.

<sup>5</sup> Corridor Bi-Océanique qui profitera à sept des 12 pays d'Amérique du Sud.

<sup>6</sup> Programme économique et stratégique chinois qui permet de relier plus étroitement les deux extrémités d'Eurasie, ainsi que l'Afrique et l'Océanie, autour de deux axes : l'un terrestre, l'autre, maritime. <https://lasultanemag.com/obor-nouvelle-route-de-soie-expliquee/>



## 5. JOURNÉE EN PROVENCE LE 21 MARS 2022



Organisée autour de la proposition mise en place par Pierre Quirin (IESF-CA), accompagné et complétée par Monique Fulconis (CARA-SE), ce fut une journée très amicale, collectivement en autobus et privativement en moyens de transport personnels. Nous étions une soixantaine à nous rendre à Salon-de Provence et Aix-en Provence ; malheureusement quelques inscrits ont dû faire défection en dernière minute pour cause de pandémie.

Après un voyage sans problème, nous sommes arrivées à l'École militaire et aéronautique française de formation des officiers de l'armée de l'Air, *École de l'air* et de l'espace qui forme des Officiers-ingénieurs EAE (certifié CTI) ; réception très militaire dans son processus et très amicale dans le comportement de chacun des participants.

Notre visite était orientée totalement sur la **Patrouille** de France. Stationnée sur la **base aérienne 701** de **Salon-de-Provence**, elle est considérée comme l'une des meilleures formations acrobatiques au monde, au même titre que les **Red Arrows** de la **Royal Air Force** britannique, les **Blue Angels** de l'aéronavale américaine, les **Frecce Tricolori** de l'armée de l'air italienne ou les **Chevaliers russes**. La "PAF" (pour "**Patrouille** Acrobatique de **France**") est composée de neuf pilotes et d'une quarantaine de mécaniciens. Elle évolue la plupart du temps à huit appareils et les démonstrations durent une vingtaine de minutes.

Son indicatif radio étant Athos ; elle se compose de 9 pilotes dûment sélectionnés qui sont :

- **Le leader**, Athos 1, qui reste à son poste sur une période d'un an, il est le seul pilote indispensable dans la patrouille et ne peut être remplacé. Chef d'orchestre de la patrouille, il détermine les figures et formations que la patrouille utilisera.
- **Les intérieurs**, respectivement Athos 2 et Athos 3. Ils sont en première année à la patrouille et évoluent au plus près du leader lors des vols en formation.
- **Le Charognard**, Athos 4, celui qui prendra la place de leader l'année suivante. Il tire son surnom de sa position: placé derrière le leader il avale littéralement ses fumées
- **Les extérieurs**, Athos 5 et Athos 6, plus aguerris, font partie des équipiers les plus éloignés du leader. Leurs places respectives au sein de la formation leur demandent beaucoup de puissances motrices et de concentration pour bien tenir les formations.
- **Les solos**, Athos 5 (leader solo) et Athos 6 (second solo), effectuent des croisements et des percussions lors de la « synchronisation », seconde partie du programme.
- **Le remplaçant**, qui permettrait la reconstruction de la formation initiale de base en cas de ...

Dans le hangar de vérification et réparation des Alfa-Jet, l'officier responsable, accompagné de l'officier qui nous accompagnait, nous a entretenu des caractéristiques des appareils, des moyens mis en œuvre lors des déplacements de la PAF (équipe de dépannage, équipe de piste, équipe de transport).





Nous nous sommes ensuite rendus sur le tarmac du terrain d'aviation contigu où nous avons pu admirer de loin les entraînements et essais de la PAF. Nous n'avons pu rejoindre avions et équipages, atterrés après une bonne heure de vol en formations multiples.

Après une halte-restaurant, nos cicérones (Pierre et Monique) nous ont conduit dans cette bonne ville d'Aix-en-Provence pour nourrir nos esprits de quelque culture intellectuelle.

Ce fut à l'hôtel de Caumont, où, à l'occasion du 70e anniversaire de la création de la Fondation Giorgio Cini, il nous a été proposé un voyage à Venise en présentant pour la première fois hors d'Italie des chefs-d'œuvre de la collection Cini, l'une des plus importantes collections d'art ancien italien.

Les 70 peintures, sculptures, dessins et objets précieux présentés font partie de l'un des plus prestigieux ensembles d'art italien, du XIVe au XVIIIe siècle, réuni par l'entrepreneur et philanthrope Vittorio Cini (Ferrare 1885 – Venise 1977). Sa curiosité insatiable et les conseils avisés d'historiens de l'art prestigieux lui ont permis, en l'espace de 50 ans environ, de former une collection exceptionnelle tant par sa qualité que par la variété de techniques et de typologies d'objets. On y trouve des sculptures, gravures, dessins, objets de mobilier et des peintures sur bois ainsi que des porcelaines vénitienes et des ivoires français, des miniatures et des volumes finement décorés.



Cette journée bien remplie s'est terminée par un voyage retour aussi agréable qu'à l'aller, piloté sûrement et délicatement par la conductrice de notre car.

Une journée mémorable dont nous pouvons remercier Pierre et Monique pour ses grands sujets d'intérêt et une organisation sans faille.

**Philippe Hernandez**

**IESF et CARA / poussin 1955-56 (qui saura ce que cela veut dire ?)**

## 6. ASSEMBLÉE GÉNÉRALE ORDINAIRE DU 31 MARS 2022



C'est dans les locaux de ACRI à Grasse que se sont tenus :

- la remise du livre blanc IESF à Odile Hembise Fanton D'Andon (Président de ACRI-ST),
- un bureau exécutif,
- une visite des locaux,
- et notre assemblée générale ordinaire (AGO). Les présents et représentés ont donné quitus au Président et au Trésorier après exposition des bilans moral et financier. Le bilan prévisionnel, approuvé à l'unanimité, a reconduit les cotisations 2023 au niveau de celles de 2022.

A noter que le rapport moral a souligné la volonté de l'association de maintenir ses activités malgré le contexte pandémique :

- Les réunions du bureau exécutif (en présentiel ou distanciel), les bulletins d'information, des mises à jour des sites.
- L'organisation d'un Hackathon les 26 et 27 novembre 2021 (Lycée de Croisset, Grasse)
  - Initiative IESF-CA/CAPG-Grasse-Campus . C'est le premier hackathon transdisciplinaire du territoire soutenu par PRODAROM et le Club des Entrepreneurs de Grasse dans le cadre de la 10<sup>ème</sup> semaine de l'industrie
  - Thème: « L'éco-conception, l'économie du partage et le ré-emploi dans les entreprises grassoises et notamment celles de la parfumerie. »
- La participation à la Journée Nationale de l'Ingénieur le 10/03/2022 au Campus Sophia Tech avec une conférence phygitale (vidéo + présence du public) de Jean-Paul REICH : « Hydrogène et transition environnementale : des destins croisés »
- La participation aux événements de l'IESF nationale (AGO, congrès des régions, comité patrimoine, remise du livre blanc IESF National à différentes personnalités de la région).
- Les visites :
  - Le 20 octobre 2021 des sites de Innova et Biotech Grasse
  - Le 21 mars 2022 avec CARA IBM et SNIPF, la base aérienne de Salon de Provence avec un entraînement de la patrouille de France et la visite de l'exposition « La collection Cini » au Musée Caumont à Aix en Provence.
- L'organisation d'une conférence le 22 février 2022 « Les défis des chemins de fer au XX<sup>ème</sup> siècle » par Jean-Pierre Loubinoux.
- La confection d'un **Livre blanc IESF- Côte d'Azur** pour mieux faire connaître ce que nous faisons et donner notre position sur la formation initiale des ingénieurs, la reconnaissance du rôle de l'ingénieur dans la société et notre expertise dans des domaines ciblés : PMIS, assistance juridique...
- Poursuite des relations avec Polytech Nice Sophia, avec ECAM-EPMI, avec l'IUT et avec les associations :
  - IPF / CARA SE (IBM) / INSAZUR / Cercle des Sources / A&M / SACA: Société d'astronomie de Cannes
- Promotion des Métiers de l'Ingénieur et du Scientifique (PMIS). C'est ce point, qui aura le plus souffert de la situation. Beaucoup d'interventions ont été annulées, les chefs d'établissements appliquant encore le principe de précaution.

En 2022, nous espérons une situation sanitaire plus sereine afin de remettre en place les actions extérieures traditionnelles, si possible même, de les renforcer (PMIS, conférences, JNI, visites, etc.)

L'AGO a été suivie d'un apéritif et d'un repas amical animés.

**Pierre QUIRIN** Secrétaire IESF Côte-d'Azur

## **7. MATIÈRES PREMIÈRES, MÉTAUX CRITIQUES, TERRES RARES : CONTEXTE INTERNATIONAL ET ENJEUX**

### **Raw materials, critical metals, rare earths: context and issues**

#### **Résumé**

Les métaux stratégiques ou critiques dont les terres rares, grâce à leurs propriétés physiques particulières, sont à la base de la fabrication de produits de haute technologie. Les secteurs civil et militaire sont concernés avec les domaines de l'industrie numérique, de la transition énergétique, de la mobilité électrique, des télécommunications, de la santé, du nucléaire, de l'aérospatial, de la défense, etc. L'extraction de ces métaux est le plus souvent localisée dans des pays non-membres de l'Union européenne (Chine, Brésil, Viêt Nam, Russie, Inde, Australie, Chili, etc.). Les ressources minérales du Groënland font l'objet de la convoitise de nombreux pays. Les enjeux sont donc environnementaux et sociétaux mais aussi stratégiques (sécurisation de l'approvisionnement afin de préserver la souveraineté industrielle et économique). Cet article, non exhaustif, présente le contexte international et les enjeux, les initiatives européennes et françaises, la nature des matériaux et leurs domaines d'utilisation. Les images ou figures présentées sont la propriété de leurs auteurs cités. Le contenu de l'article est fondé sur l'ensemble des références données en fin de chaque chapitre. Des références complémentaires en fin d'article sont proposées afin d'approfondir le sujet.

#### **Mots-clefs**

Terres rares, lanthanides, aimants permanents, matières premières, métaux critiques, métaux stratégiques, transition énergétique, environnement, ressources naturelles, pollution, minerais, extraction minière, rareté, recyclage, substitution, approvisionnement, production, sécurité, durabilité, résilience, enjeux, économie, société, stratégie, industrie, numérique, nucléaire, santé, spatial, défense.

#### **Abstract**

Strategic or critical metals, including rare earths, thanks to their particular physical properties, are the basis for the manufacture of high-tech products. The civil and military sectors are concerned with the digital industry, energy transition, electric mobility, telecommunications, health, nuclear, aerospace, defense, etc. The extraction of these metals is most often located in non-EU countries (China, Brazil, Vietnam, Russia, India, Australia, Chile, etc.). Greenland's mineral resources are coveted by many countries. The stakes are therefore environmental and societal, but also strategic (securing the supply in order to preserve industrial and economic sovereignty). This non-exhaustive article presents the international context and the challenges, the European and French initiatives, the nature of these materials and their fields. The images or figures presented are the property of their cited authors. The content of the article is based on the set of references given at the end of each chapter. Additional references are provided at the end of the article to further explore the subject.

#### **Keywords**

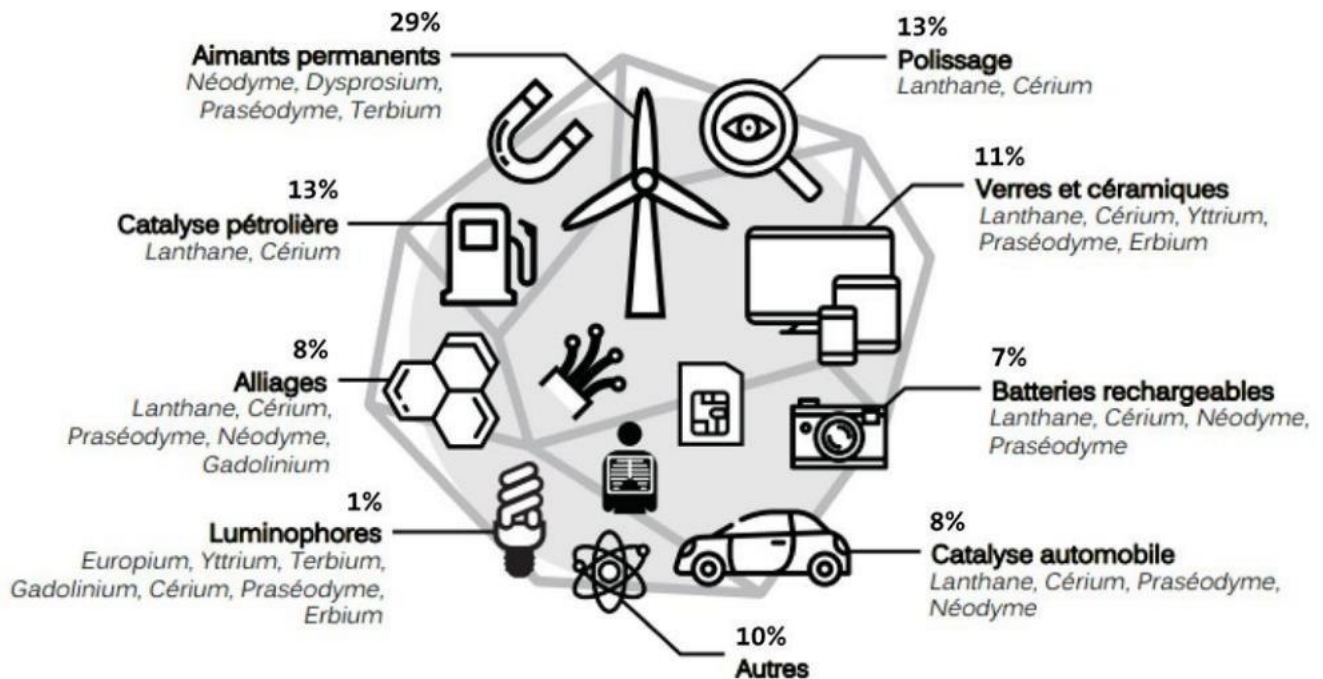
Rare earths, lanthanides, permanent magnets, raw materials, critical metals, strategic metals, energy transition, environment, natural resources, pollution, ores, mining, scarcity, recycling, substitution, supply, production, security, sustainability, resilience, issues, economy, society, strategy, industry, digital, nuclear, health, space, defense.

## 7.1 LE CONTEXTE INTERNATIONAL ET LES ENJEUX

Nos sociétés se développent grâce aux matières premières qui accompagnent nos modes de vie (alimentaire, industrielle, énergétique, etc.). Leur caractère stratégique engendre des enjeux sociétaux, économiques et environnementaux au cœur de la géopolitique mondiale.

C'est le cas pour l'eau, par exemple, vitale pour l'humanité mais aussi essentielle aujourd'hui pour la fabrication des semi-conducteurs, par exemple, entre autres dispositifs ! \*

Les matières premières minérales, sont indispensables à la production d'une large variété de biens et de services dans les secteurs civil et militaire, pour leur usage dans de nombreux domaines - industrie high-tech, industrie numérique, transition énergétique, mobilité électrique, télécommunications, santé, nucléaire, aérospatial, défense, etc. Elles contribuent à la fabrication de produits de haute technologie - semi-conducteurs, lasers, smartphones, panneaux solaires, rotors d'éoliennes, composants de véhicules hybrides, batteries, appareils d'imagerie médicale, systèmes de guidage de missile, équipements des avions de chasse, etc.

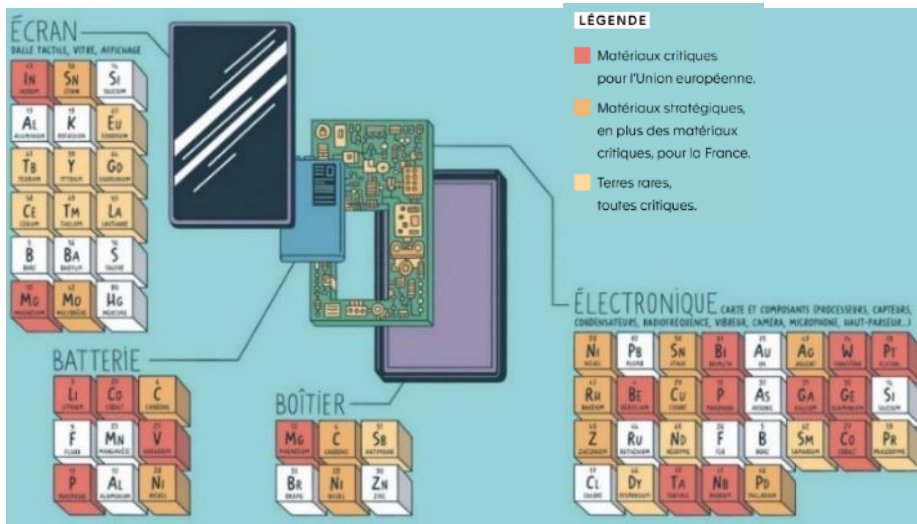


Bureau de Recherches Géologiques et Minières © [BRGM](#)

Les métaux occupent une place essentielle dans l'économie. D'une vingtaine utilisée il y a quarante ans, l'émergence de nouvelles technologies en a presque quadruplé le nombre. Grâce à des qualités naturelles et des propriétés exceptionnelles (chimiques, magnétiques, catalytiques, spectrales, etc.), les terres rares occupent ainsi une place de choix, à côté de métaux bien connus comme le fer, l'aluminium, le manganèse ou l'argent, par exemple.

Pour les batteries des véhicules électriques et le stockage de l'énergie, l'Union européenne (UE) prévoit qu'elle aurait besoin de 18 fois plus de lithium et de 5 fois plus de cobalt en 2030 et de 60 fois plus de lithium et 15 fois plus de cobalt en 2050, par rapport à son approvisionnement de 2020. Dans le même sens, la demande de terres rares pour la technologie des aimants permanents présents dans les véhicules électriques, les éoliennes, etc. serait multipliée par 10 d'ici 2050.

\*Les ressources en eau sont l'un des défis majeurs du 21<sup>ème</sup> siècle : le programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR) exploratoire [OneWater - Eau bien commun](#), co-piloté par le [CNRS](#), le [BRGM](#) et l'[INRAE](#), a été lancé le 16 mars 2022. Il est doté d'un budget de 53 millions d'euros sur 10 ans et financé dans le cadre du [PIA 4](#) et du plan [France Relance](#). Il a vocation à mettre les recherches sur les ressources en eau au cœur de la transition durable des territoires.



Pour un seul smartphone :

- 70 kg de matières premières pour le produire, l'utiliser et l'éliminer
- Environ 60 matières premières présentes dont une vingtaine recyclable
- 15 % des smartphones mis sur le marché sont recyclés

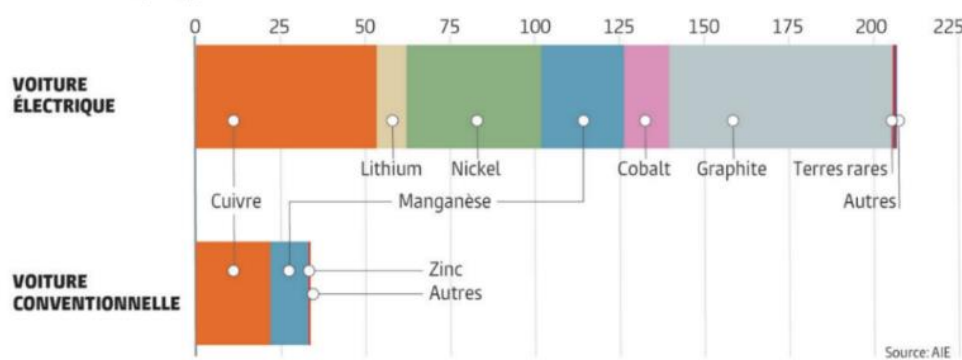
Source : [Les matières premières d'un smartphone](#) © J.Perrodeau, Défis du CEA, 27 juillet 2021

Si un smartphone ne contient en moyenne que 3 g de terres rares, une voiture peut en contenir jusqu'à quelques Kg alors qu'une éolienne offshore peut en compter quelques centaines selon sa puissance.

En prenant comme exemple les voitures conventionnelle et électrique, on a une meilleure vision des matières nécessaires à leur élaboration dont certaines sont dites critiques :

### LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES, GRANDS CONSOMMATEURS DE MATÉRIAUX CRITIQUES

Kilos de métaux par type de véhicule



Voiture électrique ou conventionnelle et les matériaux critiques

Source : [Les terres rares font leur retour comme opportunité d'investissement](#), LeTemps, 26 mai 2021

Crédit IEA / [AIE](#)

La criticité de certaines matières premières dont les terres rares, est liée à la difficulté de l'approvisionnement (risques géologiques, techniques, géopolitiques, etc.), au caractère de vulnérabilité à une pénurie éventuelle avec une envolée des cours et aux impacts industriels ou économiques préjudiciables importants.

Faisant suite au différend territorial de 2010 entre la Chine et le Japon, concernant les îles Senkaku, la Chine avait décrété un embargo sur l'exportation des terres rares vers le Japon et mis en place une politique de quotas à l'exportation de ces matières. La Commission Européenne a alors décidé, depuis 2011, de renforcer son plan d'action en dressant une liste de matériaux critiques, tous les trois ans. Elle en compte aujourd'hui 45. Cependant, le nombre et le type de matériau peuvent varier, d'une session à l'autre :

Antimoine / Baryte / Bauxite / Béryllium / Bismuth / Borate / Caoutchouc naturel / Charbon à coke / Cobalt / Gallium / Germanium / Graphite naturel / Hafnium / Indium / Lithium / Magnésium / Niobium / Platinoïdes / Phosphate naturel / Phosphore / Scandium / Silicium métal / Spath Fluor / Strontium / Tantale / Titane / Tungstène / Vanadium	<b>Terres rares légères :</b> Cérium / Lanthane / Néodyme / Praséodyme / Prométhium / Samarium / Scandium	<b>Terres rares lourdes :</b> Dysprosium / Erbium / Europium / Gadolinium / Holmium / Lutécium / Terbium / Thulium / Ytterbium / Yttrium
--	--	---

Dans le cas où un matériau est indispensable à la politique économique, énergétique et à la défense d'un Etat ou d'une entreprise ou d'un domaine sensible (aéronautique, nucléaire, énergie, électronique, télécommunications, etc.), la qualification de stratégique lui est associée. Au vu de ce constat, le Comité pour les matériaux stratégiques ([COMES](#)) de la France, en ajoute 13 à la liste européenne. *Métaux qualifiés de stratégique* : Argent / Carbone / Chrome / Cuivre / Étain / Molybdène / Nickel / Palladium / Rhénium / Rhodium / Sélénium / Tellure / Zirconium.

Le COMES participe à l'élaboration et à la mise en œuvre de la politique de gestion des métaux stratégiques, en vue de renforcer la sécurité d'approvisionnement nécessaire à la compétitivité durable de l'économie.

Pour mémoire, [les principaux producteurs de matières premières critiques](#) sont :

- Chine : 86 % des terres rares, 89 % du magnésium, 80 % du bismuth, gallium et germanium ;
- Afrique du Sud : 93 % du ruthénium, 80 % du rhodium et 71 % du platine ;
- République Démocratique du Congo (RDC) : 59 % du tantale et 64 % du cobalt ;
- Etats-Unis : 88 % du béryllium ;
- Brésil : 92 % du niobium ;
- Chili : 44 % du lithium ;
- France : 49 % d'hafnium (utilisé notamment dans les réacteurs nucléaires de sous-marins).

La **Chine** a donc une position de quasi-monopole sur l'extraction et le traitement des terres rares qu'elle veut développer avec son projet de Nouvelle route de la soie, *Belt and Road Initiative (BRI)* : politique de constructions d'infrastructures portuaires, ferroviaires, terrestres dans le bassin méditerranéen, qui lui permettra de s'approvisionner en matières premières. Elle est devenue le premier partenaire commercial du Brésil et elle s'intéresse de très près à l'Inde et au Viêt Nam, parmi les principaux détenteurs de terres rares. Selon une publication du site portail allemand, [Statista](#), spécialisé dans l'analyse de données du secteur économique, la Chine verrait son monopole sur les terres rares diminuer. En effet, des pays disposant de gisements de terres rares commencent à en intensifier l'extraction : le Brésil, le Vietnam, la Russie, par exemple, disposant d'un gros potentiel minier encore largement inexploité. Les États-Unis et l'Australie ont augmenté leur production depuis une dizaine d'années et le Myanmar et la Thaïlande ont commencé à en extraire de grosses quantités.

*Chine actualités :*

- Parmi les initiatives récentes, il faut signaler que, le 23 décembre 2021, la [China Rare Earth Group Co. Ltd](#), entreprise publique, a été officiellement créée à Ganzhou, dans l'est de la Chine. C'est *la plus grande initiative de ce genre au monde* : conglomérat de certains des principaux producteurs industriels, y compris les unités de terres rares de trois des "Big Six" entreprises d'état - Aluminium Corporation of China ([CHALCO](#)), [China Minmetals Corporation](#) et [Ganzhou Qiangdong Rare Earth Group Co., Ltd](#) et deux sociétés de recherche - China Iron & Steel Research Institute Group ([CISRI](#)) et [Grinm Group Corporation Ltd](#). Cela *représente environ 62 % des approvisionnements nationaux en terres rares lourdes*. Un autre projet est d'en créer une autre, dans le nord, concentrée sur les terres rares légères. Le gouvernement pourrait regrouper tous ses acteurs mineurs et transformateurs de terres rares dans ces deux conglomérats. [Source : [China Merges Three Rare Earths State-Owned Entities to Increase Pricing Power and Efficiency](#), China Briefing, 12 janvier 2022].
- Pour conserver son monopole, la Chine a lancé, le 2 janvier 2022, un satellite de chasse aux minéraux pour explorer la planète à la recherche de nouvelles ressources : le Ziyuan-1 02E (satellite optique) dans le but d'identifier les zones du monde riches en minéraux de terres rares. Il serait capable de prendre des photos du sol avec une résolution de cinq mètres. [Source : [La Chine lance un satellite de chasse aux minerais pour maintenir son monopole sur les terres rares](#), Astrounivers, 4 janvier 2022].

Les **BRICS** (Brésil, Russie, Inde, Chine et l'Afrique du Sud), les États-Unis et l'UE se livrent à une guerre stratégique et d'influence (gouvernements, organisations non-gouvernementales, organismes financiers, fonds d'investissements, entreprises privées et publiques, etc.). L'UE est encore le premier partenaire commercial du continent africain, mais la Chine s'impose comme le principal fournisseur de marchandises pour plus de 30 nations africaines, ainsi que le premier investisseur étranger en Afrique. Pour ses richesses minières, l'Afrique est au cœur de cette guerre. Certains états, en échange de financement pour la construction d'infrastructures locales, acceptent de livrer des barils de pétrole ou des minerais stratégiques, primordiaux pour l'industrie des énergies renouvelables. Il ne faut pas oublier qu'une grande partie des échanges de matières premières se négocie sur les marchés financiers, ouverts à la spéculation et à la fluctuation des prix.

Un exemple pertinent est celui concernant les ressources minérales du **Groënland**, qui font l'objet de la convoitise de nombreux pays (Chine, Australie, Etats-Unis, etc.). Son sous-sol contient de grandes réserves de terres rares, mais aussi d'uranium, de pétrole, de gaz, de zinc, de plomb, de molybdène, d'or, de diamants, etc. La glace recouvre 80% de l'île, mais le changement climatique la fait fondre à grande vitesse.

[Podcast : un village d'Inuits lutte contre l'extraction d'uranium au Groënland](#)



La ville de Tasiilaq au Groënland © filip gielda / unsplash  
14 août 2020

L'extraction des terres rares, souvent énergivore et polluante, est le plus souvent localisée dans des pays non-membres de l'UE comme la Chine, le Brésil, le Viêt Nam, la Russie, l'Inde, l'Australie, le Chili, le Burundi, etc. Par exemple, le lithium est surtout extrait en Australie, au Chili, en Bolivie et en Argentine. Le manganèse, le lithium, le cobalt ou le nickel, ont fait l'objet d'importants contrats miniers signés par la Chine avec les pays détenteurs, comme la République Démocratique du Congo qui fournit, à elle seule, plus de la moitié des besoins mondiaux en cobalt.

Selon le [BRGM](#), l'Europe possède des gisements primaires, repérés en Scandinavie, à Norra Kärr en Suède, par exemple. Le Groënland, pays constitutif du royaume du Danemark et aussi territoire d'outre-mer associé à l'Union européenne, ne contiendrait pas moins de 12% des réserves mondiales exploitables de terres rares. Des gîtes secondaires existent en Bohême, en Grèce et même en France (Bretagne, zone méditerranéenne). A l'heure actuelle, excepté le site russe de Lovozero, aucune mine d'extraction de terres rares n'est active sur le Vieux continent. Alors que l'Europe importe plus de 90% de ses terres rares depuis la Chine, une prise de conscience a émergé visant à sécuriser les approvisionnements.

Depuis la fin de l'époque soviétique, la **fédération de Russie** a fait des terres rares un produit d'exportation, au même titre que de nombreux métaux (platinoïdes, nickel, cuivre, vanadium, etc.) engendrant ainsi une rente, au même titre que du gaz ou du pétrole. Concernant les terres rares, c'est [Rostec](#), société d'État russe fondée fin 2007, qui est à la tête d'un conglomérat actif dans le développement, la production et l'exportation de produits industriels de haute technicité destinés aux secteurs civil et militaire. Elle rassemble environ 700 entités constituant 14 sociétés dont onze sont dans le domaine de l'industrie de la défense. Les réserves russes sont considérables (environ 20% du total mondial) et classe la Russie au troisième ou quatrième rang derrière la Chine et le Brésil, selon l'évaluation des réserves du Danemark avec le Groënland. La Russie fournit 25 % des terres rares consommées en Europe.

**Aux Etats-Unis**, selon les propos rapportés par [La Tribune](#) du 15 janvier 2022, deux sénateurs américains veulent réduire la dépendance du pays à l'égard de la Chine en ce qui concerne les terres rares, en déposant un projet de loi au Sénat, recommandant, notamment, la création d'une réserve stratégique de terres rares d'ici à 2025.

Diverses mesures ont déjà été adoptées pour renforcer cette indépendance stratégique du pays vis-à-vis de la Chine comme la réouverture, en 2017, de la seule mine américaine spécialisée dans l'extraction de terres rares, un temps fermée et de nouveau active : Mountain Pass, en Californie, qui fournit 15% de la production mondiale. En 2018, un décret présidentiel a été rédigé pour renforcer les capacités d'extraction et de raffinage de minéraux sur le sol national, de même en 2020 un autre décret relatif aux minerais rares d'urgence nationale et à la construction de mines américaines par le Département de la Défense (DoD) a été adopté. En 2021, dans le plan d'investissement, sont prévus 140 millions de dollars de subventions programmés pour créer, aux Etats-Unis, un démonstrateur d'usine de séparation des terres rares.

L'Institut d'études géologiques des États-Unis (*United States Geological Survey, USGS*) en association avec Geoscience Australia et la Commission géologique du Canada, a formé la *Critical Minerals Mapping Initiative (CMMI)* en 2019 afin de combiner l'expertise et de mener des recherches en collaboration sur les ressources minérales critiques. L'objectif est de développer la construction d'usines de minage et de raffinage et de diversifier l'approvisionnement du pays en s'appuyant sur les pays alliés plutôt que sur la Chine. Mais le coût écologique de l'extraction et du raffinage des minerais stratégiques doit être considéré dans cette approche.

## Critical Minerals Mapping Initiative (CMMI)

ACTIVE

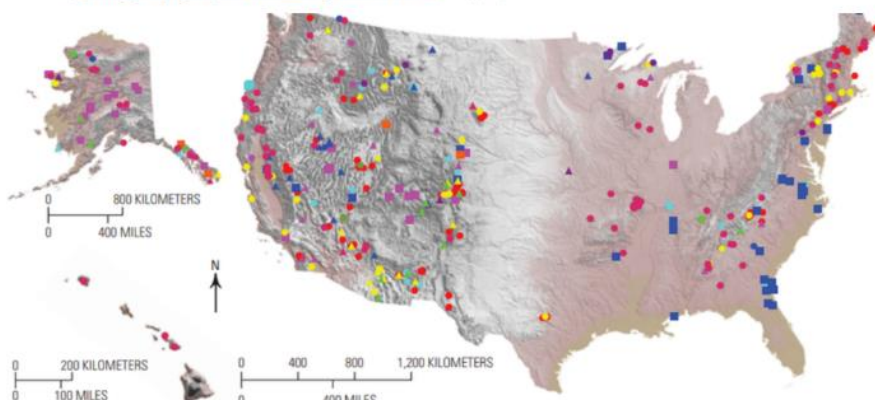
By [Geology, Geophysics, and Geochemistry Science Center](#) August 4, 2021

### Critical Minerals

- |             |                           |
|-------------|---------------------------|
| • Antimony  | ▲ Manganese               |
| • Barite    | ▲ Niobium and Tantalum    |
| • Beryllium | ▲ Platinum Group Elements |
| • Cobalt    | ▲ Rare Earth Elements     |
| • Fluorite  | ▲ Rhenium                 |
| • Gallium   | ▲ Tellurium               |
| • Germanium | ▲ Tin                     |
| • Graphite  | ■ Titanium                |
| • Indium    | ■ Vanadium                |
| • Lithium   | ■ Zirconium               |

### [Cartographie des ressources minérales critiques](#)

Geology, Geophysics, and Geochemistry Science Center August 4, 2021



Ne disposant pas de ressources minières terrestres exploitables, le **Japon**, second consommateur mondial de terres rares, a développé une politique stratégique à grande échelle nommée Genso Senryaku (*Project of Strategic Advanced Materials* ou *Projet de Matériaux Stratégiques Avancés*) pour sécuriser l'approvisionnement de son industrie en terres rares et matières premières stratégiques. En effet, le Japon a mis en œuvre, depuis de très nombreuses années, des systèmes d'intelligence économique et stratégique performants afin de transformer les données environnementales économiques en connaissance efficiente, opérationnelle et sécurisée en prenant soin de détecter les menaces, d'en exploiter les vulnérabilités en vue d'agir à bon escient.



Des programmes interministériels de promotion de l'innovation stratégique ont ainsi vu le jour. Ils concernaient, entre autres, l'exploitation des ressources minérales marines de prochaine génération (dépôts hydrothermaux, encroûtements de cobalt et les terres rares) y compris la sécurisation des ressources minérales, la recherche et le développement de technologies de recyclage des métaux critiques à partir de produits en fin de vie et de procédés industriels, etc.

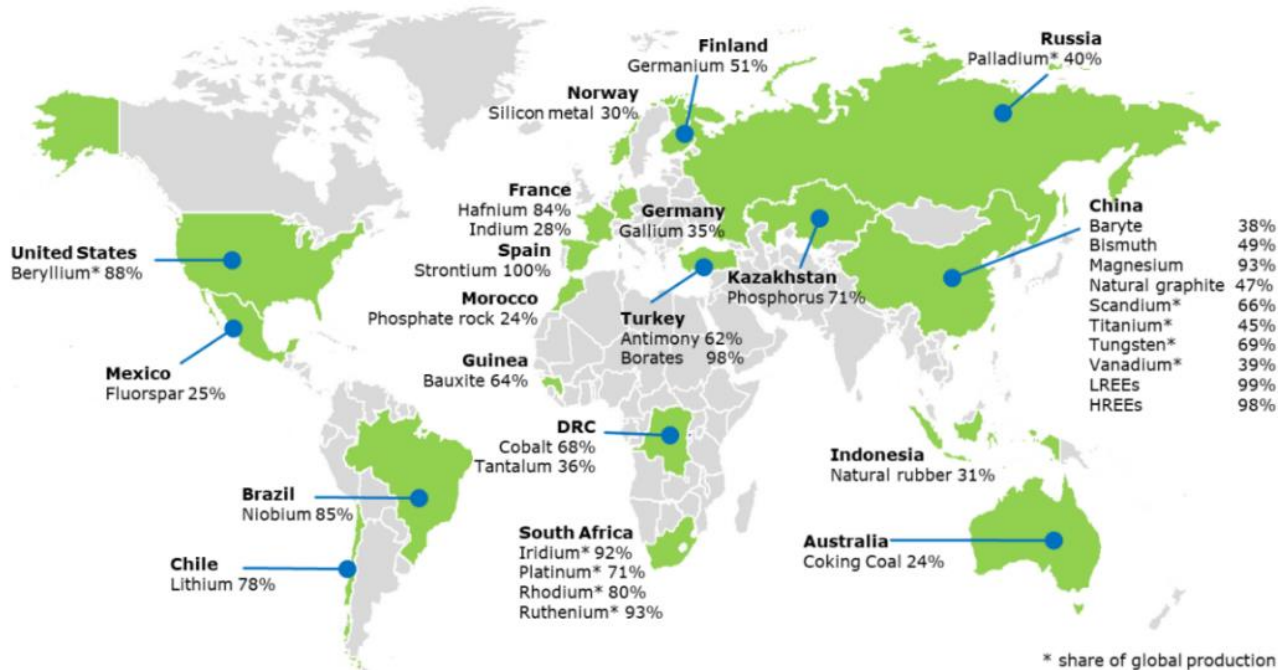
La *Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC)* en tant qu'institution administrative indépendante du gouvernement japonais, a pour mission d'assurer un approvisionnement stable en pétrole, gaz naturel, métaux non-ferreux et ressources minérales. Son rôle est aussi de veiller à la constitution de stocks nationaux de trente éléments identifiés comme stratégiques en fonction des besoins du pays, des stratégies et besoins des Etats-Unis et de l'Union Européenne.

Le Japon s'est aussi engagé dans la prospection sous-marine, pour devenir le premier fournisseur mondial de terres rares car il affirme avoir découvert une importante réserve de minéraux au large de l'île de Minamitori : près de 16 millions de tonnes de terres rares (yttrium, dysprosium, europium, etc.), soit plusieurs centaines d'années de production, selon [Business Insider](#). Les minéraux ont été découverts dans des carottes de 10 mètres de profondeur prélevées dans les sédiments du fond marin.

[Sources : [Recherche et développement au Japon au service de l'autosuffisance en terres rares](#), Ambassade de France au Japon, Service pour la Science et la Technologie, D. Lecellier, S. de Bentzmann, avril 2019 ; J.-P. Damiano, [Les enjeux de la recherche et l'intelligence économique et stratégique](#), Techniques de l'Ingénieur, Octobre 2019].

Au sujet de l'**Union européenne**, entre 75 et 100 % de la plupart des métaux que les écosystèmes industriels d'importance stratégique utilisent, proviennent de pays non-membres de l'UE (Chine, Brésil, pays africains, Asie centrale, etc.). La Chine fournit 98 % de notre approvisionnement en terres rares. L'UE ne représente qu'un peu moins de 5 % de la production mondiale de matières premières minérales.

La situation est que les matières premières pas ou peu produites en UE servent pourtant à fabriquer des produits consommés par les européens. La Chine pour le silicium, le lithium et les terres rares, mais aussi d'autres pays producteurs, comme le Chili pour le lithium, la RDC pour le cobalt, etc. exportent ces matières premières vers les pays de l'UE. La dépendance de l'UE et de la France aux matières critiques et aux terres rares plus particulièrement est inquiétante. Avec les meilleures prévisions et initiatives européennes dans ce domaine, on ne peut espérer que l'UE soit en capacité de produire plus de 30% des besoins européens, d'ici 2030. Le risque de pénurie semble bien réel.



Les principaux pays fournisseurs de matières premières critiques\* à l'UE

Source : [Rapport de la Commission européenne sur l'évaluation de la criticité en 2020](#)

Selon l'étude prospective de la Commission européenne et l'avis du Comité économique et social européen ([CESE](#)) sur la résilience des matières premières critiques, l'UE représente moins de 5 % de la production mondiale de matières premières minérales. La Chine fournit à elle seule 66 % des batteries au lithium finies, alors que l'UE en fournit environ 1 %. Un autre exemple est celui des piles à combustible : l'UE en produit moins de 1 %.

La sécurisation des approvisionnements en matières premières métalliques ne peut s'opérer au seul niveau national ; elle doit être réalisée au niveau européen à travers de nombreuses actions et initiatives. De manière plus générale, la sécurité énergétique est plus que jamais au cœur des enjeux géopolitiques, stratégiques, financiers, environnementaux et sociétaux - depuis l'inventaire des gisements, l'extraction du minerai, ou plutôt des minerais de terres rares nécessitent des techniques de traitement bien adaptées, jusqu'à la transformation en produits de haute valeur ajoutée.

En septembre 2020, la Commission européenne a présenté un [plan d'action](#) sur les matières premières critiques :

- Développer des chaînes de valeur résilientes pour les écosystèmes industriels de l'UE ;
- Réduire la dépendance vis-à-vis des matières premières critiques primaires grâce à l'utilisation circulaire des ressources, des produits durables et de l'innovation ;
- Renforcer l'approvisionnement domestique de matières premières dans l'UE ;
- Diversifier l'approvisionnement auprès des pays tiers et éliminer les distorsions du commerce international, en respectant pleinement les obligations internationales de l'UE.

Ci-après, sont listés des engagements que la Commission européenne devra réaliser à plus ou moins long terme renforçant la résilience et l'autonomie stratégique ouverte de l'Europe :

Établir une alliance européenne des matières premières : *The European Raw Materials Alliance (ERMA) a été créée dès septembre 2020 avec comme objectif la diversification des chaînes d'approvisionnement, la création d'emplois, l'attraction d'investissements, l'encouragement à l'innovation, la formation de jeunes talents, le soutien à l'économie circulaire ;*

- Élaborer des critères de financement durable pour les secteurs minier, extractif et de la transformation ;
- Lancer la recherche et l'innovation sur les matières premières essentielles sur le traitement des déchets, les matériaux avancés et la substitution ;
- Cartographier l'approvisionnement potentiel de matières premières critiques secondaires à partir des stocks et des déchets de l'UE et identifier les projets de valorisation viables d'ici 2022 ;
- Identifier les projets d'extraction et de transformation dans l'UE qui peuvent être opérationnels d'ici 2025 ;
- Développer l'expertise et les compétences dans les technologies d'exploitation minière, d'extraction et de traitement dans les régions en transition ;
- Utiliser le programme d'observation de la Terre [Copernicus](#) de l'UE pour améliorer l'exploration des ressources, les opérations, la gestion de l'environnement, etc. : *Un des enjeux de Copernicus est la réutilisation des données par les entreprises, les scientifiques et les entités publiques, à l'image des États. La société ACRI-ST du groupe ACRI, à Sophia-Antipolis, est partie prenante de cette opération. Le groupe ACRI implante un [centre de recherche spatiale à vocation internationale](#) sur le plateau de Roquevignon (Grasse, ancien site du CERGA). Il pourra développer ses activités dans le traitement, la distribution et l'archivage des données issues de l'observation spatiale par les satellites (geodata) ;*
- Développer des projets de recherche et d'innovation Horizon Europe (programme-cadre de recherche et d'innovation de l'UE) sur les processus d'exploitation et de traitement des matières premières critiques ;
- Développer des partenariats internationaux stratégiques et les financements associés pour garantir un approvisionnement diversifié et durable en matières premières essentielles ;
- Promouvoir des pratiques minières responsables pour les matières premières critiques grâce au cadre réglementaire de l'UE et à la coopération internationale.

---

En ce qui concerne les batteries, il est intéressant de considérer les actions initiées par l'UE, car elles sont un élément stratégique de la transition énergétique et numérique ainsi que les technologies habilitantes associées indispensables à la compétitivité du secteur automobile, à la mobilité à faibles émissions, au stockage de l'énergie et à la stratégie économique de l'Europe. L'UE cherche ainsi à rattraper le Japon, la Chine, la Corée du Sud et les États-Unis sur la fabrication de batteries pour véhicules électriques et autres dispositifs de mobilité.

Le positionnement de l'Europe devrait changer avec la mise en service par le groupe suédois de batteries électriques [Northvolt](#) de sa giga-usine de batteries *Northvolt Ett*. en Suède. Pour une meilleure compréhension de la situation et des développements engendrés, voici, ci-après, un aperçu de ces actions de l'UE depuis 2017 (*extrait source : [Stockage d'énergie électrique : un regard sur les enjeux et les défis technologiques](#), IESF-CA, janvier 2022*)

Dès 2017, la Commission européenne, avec les pays de l'UE, l'industrie et la communauté scientifique, a lancé l'alliance européenne pour les batteries ([EBA](#)) dans la production et l'utilisation durables des batteries. Il s'agissait de créer une filière européenne autonome de production de batteries. Des constructeurs connus comme Fiat Chrysler Automobiles, BMW, Rimac Automobili et Tesla en font partie. De très nombreuses collaborations ont été initiées entre des acteurs privés, des universités et des organismes publics.

Au côté du projet de l'« Airbus des batteries », débuté en décembre 2019, pour la construction d'une filière de production de batteries sur le modèle du géant aéronautique Airbus, un second projet a été lancé, en janvier 2021 : « Innovation européenne dans la batterie » ([European Battery Innovation](#)). Le premier a levé 3,2 Md€ d'argent public (7 États concernés dont l'Allemagne et la France) pour un consortium de 17 entreprises. Le second porte sur l'ensemble de la chaîne des batteries. Il a reçu un versement d'aide publique de 2,9 Md€ par 12 États-membres : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, la Croatie, l'Espagne, la Finlande, la France, la Grèce, l'Italie, la Pologne, la Slovaquie et la Suède. Ce financement public devrait permettre de mobiliser 9 Md€ supplémentaires en investissements privés. Selon Maros Sefcovic, vice-président de la Commission européenne en charge de l'énergie entre 2014 et 2019, en deux ans seulement, [l'Europe](#) est devenue la première place mondiale en termes d'investissements dans les batteries.

En juin 2021, la Commission européenne et l'Association de Partenariats Européens pour les Batteries ([BEPA](#)) ont signé un protocole d'accord de recherche et développement (partenariat public-privé) à travers le programme [BATT4EU](#) afin d'accroître la compétitivité européenne sur la production de batteries lithium-ion. Le projet, dans le cadre d'[Horizon Europe](#), a pour objectif de réduire le prix des batteries destinées aux transports de 60% et d'augmenter leur capacité également de 60%, pour une commercialisation en 2030 : 925 M€ sont mobilisés.

BATT4EU s'inscrit dans le [Pacte vert pour l'Europe](#) qui est un ensemble d'initiatives politiques pour lutter contre le changement climatique et faire de l'Europe, le premier continent neutre en émissions de CO<sub>2</sub> d'ici à 2050. D'autant que l'extraction du lithium et du cobalt nécessaires à la production de batteries demeure polluante : [Reporterre](#) met en exergue les 200 millions de litres d'eau quotidien utilisés sur le site d'Atacama au Chili. *Il s'agit de chercher de nouvelles techniques d'extraction de matières premières et leur transformation en matériaux avancés, la production de cellules et de systèmes de batteries mais aussi leur recyclage et leur durabilité.*

L'Airbus des batteries et BATT4EU font partie des projets importants d'intérêt européen commun (PIIEC) dont le but est de stimuler l'innovation et de positionner l'UE sur des secteurs d'avenir stratégiques comme celui des batteries Li-ion. Toutes ces initiatives permettront à l'UE de réduire sa dépendance vis-à-vis des pays asiatiques en situation de quasi-monopole de batteries Li-ion pour l'industrie automobile ou de la société américaine Tesla. L'UE envisage d'atteindre 25 % du marché mondial des batteries d'ici 2030, en ouvrant de nombreuses giga-usines de production.

Le groupe suédois de batteries électriques [Northvolt](#) a annoncé, le 29 décembre 2021, avoir lancé la production de sa giga-usine de batteries *Northvolt Ett*. Northvolt a été fondé, il y a cinq ans par des anciens de Tesla, le suédois Peter Carlsson et l'italien Paolo Cerruti. Fabricant de cellules de batteries à la base, il propose des cellules Li-ion haute performance basées sur la chimie propriétaire Lingonberry NMC, des composants modulaires et des systèmes complets de batteries évolutifs. L'usine est située à [Skellefteå](#), une petite ville industrielle de la principale zone minière du Nord de la Suède. Elle emploie 500 salariés et devrait atteindre les 3000 à pleine capacité. Elle est dimensionnée pour équiper annuellement en batteries un million de véhicules électriques. Sa capacité de production serait de 60 gigawattheures (GWh) / an.

Northvolt a reçu des commandes de plusieurs constructeurs pour 30 Md\$ ([BMW](#), [Fluence](#), [Scania](#), [Volkswagen AG](#), [Volvo Cars](#) et [Polestar](#) (filiale du groupe Geely et de Volvo Cars). Il vise au moins 20 à 25% du marché européen d'ici 2030. Il rivaliserait ainsi avec des groupes tels que l'américain Tesla qui va lancer courant 2022 sa première usine en Europe ou les producteurs asiatiques de batteries [Panasonic](#), [LG Chem](#), [CATL](#) ou [BYD Company](#). L'Europe ambitionne 25% du marché en 2030, avec plusieurs autres ouvertures d'usine. [Source, [Le Figaro](#), 29 déc. 2021]. Pour information, Tesla a ouvert officiellement [sa gigafactory de Grünheide](#), au sud-est de Berlin, le 22 mars 2022. Elle devrait devenir la plus grande en Europe en termes de volume produit (jusqu'à 500 000 véhicules/an). De plus elle offrirait de nombreuses innovations sur la conception des voitures, des batteries, la peinture, etc.



Usine de Northvolt, établie à Skellefteå, haut lieu suédois de l'industrie durable à faible impact climatique

Dans le cadre des initiatives de l'UE, les projets importants d'intérêt européen commun (PIIEC), déjà initiés en 2014, ont eu leurs [règles](#) modifiées récemment. Leur mécanisme vise à promouvoir l'innovation dans des domaines industriels stratégiques et d'avenir au travers de projets européens transfrontières de rupture en matière d'innovation et d'infrastructure. Les pouvoirs publics des États membres peuvent financer des initiatives au-delà des limites de la réglementation européenne.

Actuellement, plusieurs PIIEC sont en cours de réalisation, de finalisation ou en préparation.

- Le PIIEC relatif au [domaine de la microélectronique](#) (2018) s'intègre au [plan français Nano 2022](#) pour la production de nouvelles générations de composants électroniques - automobile, communications 5G, objets connectés, intelligence artificielle embarquée, aérospatial et sécurité.
- Un premier PIIEC sur les [batteries électriques](#) (décembre 2019) est initié pour soutenir le développement de technologies hautement innovantes et durables pour les batteries Li-ion (à électrolyte liquide et à semi-conducteurs). Il couvre l'ensemble de la chaîne de valeur des batteries et les domaines de recherche : les matières premières et les matériaux avancés, les cellules et les modules, les systèmes de batteries et enfin la réaffectation, le recyclage et le raffinage. Il permettra ainsi à la [coentreprise créée par Saft, PSA et Opel](#) de produire, d'ici fin 2023, à Douvrin des cellules et modules de batteries automobiles.
- Le deuxième PIIEC sur les batteries, [European Battery Innovation](#), élaboré et notifié par 12 États européens, a été approuvé en [janvier 2021](#) par la Commission européenne. Il couvre l'ensemble de la chaîne de valeur des batteries, contribuant au développement d'innovations technologiques, y compris des formulations chimiques différentes pour les batteries et des processus de production nouveaux, ainsi que d'autres dans la chaîne de valeur des batteries, en allant plus loin que le premier PIIEC de 2019.
- Dans le cadre du PIIEC sur [l'hydrogène](#), développé avec 23 États membres de l'UE et la Norvège, la [carte](#) des quinze projets français sélectionnés vient d'être publiée : déploiement de *gigafactories* autour de la mobilité lourde (trains, piles à combustible, réservoirs, matériaux...) et production d'hydrogène à grande échelle pour décarboner l'industrie notamment. L'opération compte plus de 120 projets dont 15 français pour construire des usines d'électrolyse et financer la décarbonation de certaines industries.
- Le PIIEC sur [la santé](#) est demandé par 16 États européens par un manifeste en date du 3 mars 2022 afin de soutenir l'innovation, d'améliorer la qualité et l'accès aux soins des patients européens.

Parmi les nouvelles propositions, on peut citer :

- Un PIIEC sur le cloud pour créer un continuum de services du *Cloud à l'Edge* (analyse des données au plus près de l'objet connecté) et d'avoir un stockage de données qui soit véritablement souverain. Cela permettra de financer plus de 60 projets, avec 180 entreprises européennes participantes. Mais au vu du contexte dans ce domaine, la part de marché des acteurs européens ne fait que baisser depuis plusieurs années. AWS, Microsoft Azure et Google contrôlent ainsi 69% du cloud computing de l'UE et le numéro un européen, Deutsche Telecom, doit se contenter de 2% de ce marché. [Source : [Transformation numérique](#), inCyber, 11 février 2022]
- Dans l'objectif de diversifier l'approvisionnement des industriels européens, l'alliance européenne pour les matières premières ([ERMA](#)) a identifié 14 projets d'extraction ou de recyclage des terres rares en Europe (1,7 M€ d'investissement estimés). Elle recommande fortement et soutient la mise en place d'un PIIEC pour les aimants permanents, pour lequel quatre Etats sont déjà très intéressés. S'il était créé rapidement, cela permettrait d'assurer 20 % de la demande européenne en 2030.
- Parmi ces projets, est présente une jeune société lyonnaise, [Carester](#), qui développe des procédés innovants pour le traitement des terres rares. Elle réunit un savoir-faire unique au monde sur des problématiques pointues. Son fondateur, Frédéric Carencotte, ingénieur chimiste, diplômé de l'Institut de Chimie et Physique Industrielles de Lyon, possède vingt-deux ans d'expériences au sein de Rhône Poulenc / Solvay. Son positionnement est le bienvenu suite à la fermeture de l'usine de Solvay à la Rochelle qui était la seule unité européenne de recyclage de terres rares.

[Sources : [Les Echos](#), 13 janvier 2022 ; [L'Usine Nouvelle](#), 1<sup>er</sup> octobre 2021 ; [IndustriAll](#) 129/2021, 10 juin 2021 ; [Flottes Automobiles](#), 9 décembre 2019]

La Commission européenne a adopté une série de propositions visant à adapter les politiques de l'UE en matière de climat, d'énergie, de transport et de fiscalité en vue de réduire les émissions nettes de gaz à effet de serre d'au moins 55 % d'ici à 2030 par rapport aux niveaux de 1990 ([Pacte vert pour l'Europe](#)) : le [Fit for 55](#). L'objectif est de faire de l'Europe le premier continent au monde à atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. Dans le cadre de cette transition écologique, tous les pays doivent faire face à d'importants investissements, mais aussi au risque de dépendre cette fois-ci des minerais ou métaux stratégiques indispensables à la neutralité carbone souvent importés, de Chine. [Source : [La mise en œuvre du Pacte vert européen à l'horizon 2050 : ambitions et contraintes](#), Vie publique, Jacques Percebois, 19 janvier 2022].

En décembre 2021, comme pour répondre aux initiatives chinoises des routes de la soie, la Commission européenne et le haut représentant de l'UE pour les affaires étrangères et la politique de sécurité lancent la stratégie, [Global Gateway](#), visant à développer des liens intelligents, propres et sûrs dans les domaines du numérique, de l'énergie et des transports et à renforcer les systèmes de santé, d'éducation et de recherche dans le monde entier. Cette opération vise à mobiliser 300 Md€ entre 2021 et 2027, issus des fonds européens, des États membres et de fonds privés, dans des secteurs majeurs de l'économie (Europe : numérique, climat et énergie, transports, santé, éducation et recherche).

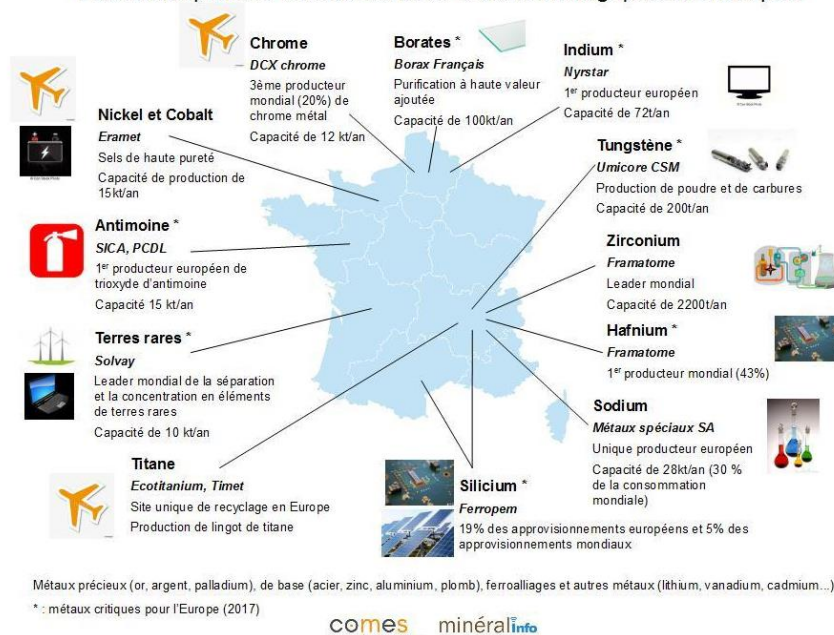
Le plan Global Gateway, inscrit sa stratégie dans la continuité des objectifs de développement durables et de l'Accord de Paris. La présidente de la Commission européenne, Ursula von der Leyen, déclarait : « *Nous soutiendrons les investissements intelligents dans des infrastructures de qualité, qui respectent les normes sociales et environnementales les plus élevées, conformément aux valeurs et aux normes de l'UE. La stratégie « Global Gateway » offre un modèle de la manière dont l'Europe peut établir des liens plus résilients avec le monde.* »

Cependant, cette stratégie s'inscrit dans le cadre de l'initiative internationale pilotée par les États-Unis, [Build Back Better World](#) (juin 2021), regroupant les pays du G7 (Allemagne, Canada, États-Unis, France, Italie, Japon et Royaume-Uni). Son objectif est de combler le retard d'investissement dans les infrastructures des pays émergents, environ 40 000 Md\$.

En **France**, le 10 janvier 2022, Barbara Pompili, ministre de la Transition écologique et Agnès Pannier-Runacher, ministre déléguée chargée de l'Industrie, ont reçu [le rapport sur la sécurisation de l'approvisionnement de l'industrie en matière premières minérales](#), confié en septembre 2021 à Philippe Varin, ancien président de France Industrie et du groupe PSA. Ce rapport a été rédigé en se fondant sur les contributions des comités stratégiques de filières [Automobile](#), [Nouveaux systèmes énergétiques](#) et [Mines et Métallurgie](#), ainsi que des responsables d'institutions scientifiques ([BRGM](#), [CNRS](#), [CEA](#)) et de nombreuses personnalités qualifiées. Le rapport a ciblé, dans un premier temps, les métaux des batteries (nickel, cobalt, lithium, graphite) et les aimants permanents (terres rares), avec comme objectifs : l'évaluation avec les industriels, du niveau de sécurité des approvisionnements en métaux, l'expression de leurs besoins et la proposition d'une organisation du travail des acteurs privés et publics pour améliorer la résilience aux métaux critiques des chaînes de production.

Parmi les actions retenues par le Gouvernement, suite de la remise du rapport Varin, il a été décidé de créer auprès du Bureau de recherches géologiques et minières ([BRGM](#)), un des plus grands acteurs mondiaux dans la connaissance et la maîtrise du sous-sol, un observatoire des métaux critiques. Constitué avec le [Comité stratégique de la Filière \(CSF\) Mines et Métallurgies](#), ses objectifs sont de rassembler les compétences et les moyens des industriels et des administrations et de permettre de fournir aux pouvoirs publics et aux industriels français une veille stratégique de haut niveau sur l'ensemble des chaînes de valeur minérales afin d'anticiper les filières futures d'approvisionnement et de renforcer ainsi la résilience des filières industrielles françaises. *Ce CSF regroupe les acteurs de l'extraction, de la production, de la transformation et du recyclage des métaux autour des organisations professionnelles [A3M](#), [Aluminium France](#), [Fédération Forge Fonderie](#), de l'Union des industries et métiers de la métallurgie ([UIMM La fabrique de l'Avenir](#)).*

## Production primaire et secondaire de métaux stratégiques en Métropole



Le gouvernement français a lancé le plan d'investissement [France 2030](#) doté de 30 milliards d'euros déployés sur 5 ans dont 8 Md€ pour le secteur de l'énergie, 4 Md€ pour les transports du futur, 2 Md€ pour une nouvelle révolution de l'alimentation saine, durable et traçable, 3 Md€ pour le secteur de la santé, 2 Md€ pour l'espace et les fonds marins, le domaine culturel, etc.

Il reprend des recommandations du rapport Varin, compte tenu de l'excellence des universités françaises, des écoles d'ingénieurs et la force de leurs liens avec les organismes nationaux de recherche, des capacités industrielles certaines (savoir-faire et infrastructures) :

- Création d'un fonds d'investissement public/privé dans les métaux stratégiques avec pour objectif de sécuriser l'approvisionnement des usines de productions de batteries, environ 1Md€ (Douai, Douvrin et une dans le sud-est).
- Développement de deux plateformes industrielles, l'une à Dunkerque pour regrouper les acteurs de la filière batteries électriques, l'autre à Lacq pour celle des aimants permanents, le raffinage, la fabrication des précurseurs des batteries (cathodes, anodes), la formation, le recyclage, etc.
- Mise en synergie des industriels et des scientifiques pour contribuer efficacement à innover, avec l'aide du Bureau de recherche géologique et minières (BRGM), du CNRS ou du CEA.

Ce plan d'investissement France 2030 doit permettre au pays de réaliser sa transition énergétique et numérique, en restant compétitif sur le plan industriel. Le montant de l'investissement, 30 milliards d'euros, vient s'ajouter aux précédents plans d'investissements, ciblant des secteurs industriels pour leur un rôle central dans les transitions à venir.

Le BRGM, dans le cadre de sa contribution au rapport [CyclOpe 2021](#), a publié son expertise sur l'évolution des marchés de 27 « petits métaux » en 2020. Cette contribution confirme cette dépendance européenne sur ces marchés.

### Actualités / informations d'intérêt

- La Compagnie des Métaux Rares ([CDMR](#)), société financière basée à Genève, créée en 2014, est spécialisée dans le conseil et l'investissement en métaux rares. Elle conseille le [Fonds Métaux Rares](#), seul fonds au monde à être entièrement investi en métaux rares physiques. Il bénéficie d'une gestion active et comporte un portefeuille de 10 à 30 métaux rares. Les métaux sont assurés et stockés de manière sécurisée dans des entrepôts spécialisés.
- Centre d'expertise de réputation mondiale dans le domaine des matériaux et des géosciences, la ville de Nancy a vu se concrétiser un accord entre la CDMR et l'École nationale supérieure des mines de Nancy ([Mines Nancy](#)). Les objectifs sont d'accroître la compréhension mutuelle des problématiques liées aux métaux rares, de croiser la connaissance du marché des métaux rares et de ses enjeux avec les compétences scientifiques de l'École et d'augmenter la pertinence de la formation offerte aux étudiants. Récemment a eu lieu une journée de formation et d'échanges « [Métaux stratégiques : au cœur des enjeux du 21<sup>ème</sup> siècle](#) » à Nancy, le 29 mars 2022.
- Le Laboratoire d'Excellence Ressources21 ([LabEx R21](#)), financé dans le cadre du programme national français "Investissements d'Avenir" ([PIA](#)) est un projet stratégique pour la France. Créé en 2011 et renouvelé pour 2019-2024, il encourage les approches structurantes autour du cycle de vie des métaux stratégiques, de la géométallurgie, du développement d'outils portables d'exploration et d'analyse et de l'intégration sociale, économique et territoriale du projet minier. La conservation de la biodiversité, la surveillance et la remédiation de l'environnement sont intégrées afin de favoriser l'émergence de nouvelles stratégies minières.
- L'Institut des sciences chimiques de Rennes ([ISCR](#)) et la société [Olnica](#) ont créé le laboratoire commun [ChemInTag](#) (*Chemical inorganic taggants*) pour développer des solutions de traçabilité basées sur des marqueurs luminescents de nouvelle génération, constitués de polymères de coordination à base de terres rares, qui ont des propriétés de luminescence intenses et modulables pour lutter contre la fraude et la contrefaçon avec une authenticité garantie et

la protection de la propriété intellectuelle sur l'ensemble des produits concernés partout dans le monde. Ces solutions présentent également un très grand intérêt dans le domaine du recyclage des matériaux. Le marqueur proposé est luminescent. Ainsi ce traceur élaboré à base de terres rares, permet un encodage plus fiable et à plus gros volume, soit 1,3 milliard de signatures uniques impossibles à copier. Il est aussi distinctif que l'ADN mais beaucoup plus robuste, résiste à la lumière, aux fortes températures et autres conditions extrêmes et reste stable dans le temps.

[Sources : [Des marqueurs luminescents pour lutter contre la contrefaçon et mieux recycler les matériaux](#), The Conversation, 24 février 2022 ; [Le GhostPrint System d'Olnica révolutionne le marquage industriel invisible pour une traçabilité inviolable des produits](#), Entreprendre.fr, 28 mai 2021].

Ainsi donc, au niveau de l'UE et de la France évidemment, l'enjeu de réduction de la dépendance vis-à-vis des pays producteurs et celui du développement de l'accès aux matières premières critiques sur le sol européen, devront être tenus pour éviter les pénuries d'approvisionnement. Il s'agit de favoriser l'extraction et la transformation de ces matières premières dans les pays de l'UE tout en respectant l'environnement et les conditions sociales.

Cela s'accompagne aussi du recyclage des matières premières en Europe pour éviter leur fuite faute de rentabilité économique immédiate. Il s'agira aussi de développer la recherche de produits de substitution, afin de privilégier les métaux abondants ou de limiter le recours à des métaux non essentiels. Les efforts devront cibler aussi le développement de solutions alternatives (en diminuant ou supprimant l'apport de terres rares, dysprosium ou néodyme, etc. dans les aimants permanents, pour ne citer que cet exemple) adaptables aux besoins et durables garantissant ainsi la sauvegarde de l'environnement et la retombée des revenus issus des extractions minières en direction des populations des pays producteurs. Dans ce contexte, tout projet minier devrait donc faire appel aux techniques de géométallurgie combinant la géologie, les géostatistiques et la métallurgie extractive afin de tenir compte des ressources minérales, du procédé d'extraction, des enjeux sociétaux, environnementaux et économiques tout en minimisant les risques techniques.

*Les défis pour la France sont évidemment de sécuriser les chaînes d'approvisionnement des métaux stratégiques mais surtout d'être en capacité de maîtriser les chaînes de valeur par diverses initiatives comme la prise de parts dans des mines (comme le font d'autres pays), la création de stocks stratégiques (après analyse des avantages et inconvénients), le développement du recyclage et celui des produits de substitution, une relocalisation des industries de la transformation, etc.*

#### Sources :

- [Terres rares : L'Afrique, terrain d'une guerre d'influence entre l'Europe et la Chine](#), Novethic, 18 février 2022 ;
- [Les insuffisances européennes et françaises face à l'approvisionnement en minerais stratégiques](#), Pierre-Marie Durier, Portail-IE, 8 février 2022 ;
- [Le monopole de la Chine sur les terres rares s'amenuise](#), Statista, Tristan Gaudiaut, 8 fév. 2022 ;
- [L'essentiel sur ... Les matières premières critiques](#), CEA, 2 février 2022 ;
- [FRANCE 2030 pousse l'industrie vers le futur](#), Livre blanc, Techniques de l'ingénieur, janvier 2022 ;
- [Stockage d'énergie électrique : un regard sur les enjeux et les défis technologiques](#), IESF Côte d'Azur, Bull.1, p.10-22 (2022) ;
- Nicolas Charles, Johann Tuduri, Gaetan Lefebvre, Olivier Pourret, Fabrice Gaillard, Kathryn Goodenough, 2021. [Ressources en terres rares de l'Europe et du Groënland : un potentiel minier remarquable mais tabou ?](#) In : Boulvais P. & Decrée S. (Eds), Ressources métalliques : cadre géodynamique et exemples remarquables. ISTE Science Publishing Ltd-Wiley ;
- Jacques Percebois, [L'énergie racontée à travers quelques destins tragiques](#), Éditions Campus Ouvert, 2<sup>ème</sup> édition, sept. 2021 ;
- [La Géopolitique des Terres rares](#), Geopragma, Christopher Coonen, 12 juillet 2021 ;
- [L'autonomie stratégique européenne concerne aussi les matières premières critiques. Quel bilan dix ans après la crise des Terres Rares ?](#) Diploweb.com, La revue géopolitique, Maxime Berri, 10 juillet 2021 ;
- [Terres rares contre semi-conducteurs : une course de fond technologique aux enjeux géopolitiques](#), Anne Kraatz, Senior Fellow de l'Institut Open Diplomacy, 2 juillet 2021 ;
- [Garantir un approvisionnement durable en matières premières en Europe](#), Bruxelles, 10 juin 2021, IndustriAll 129/2021 ;
- [Résilience des matières premières critiques : la voie à suivre pour un renforcement de la sécurité et de la durabilité](#), 24 mars 2021, Réf. CCMI/177-EESC-2020 ;
- Jean-François Guilhaudis, Jacques Fontanel, [Les terres rares et autres matériaux critiques et stratégiques, au cœur des conflits de demain ?](#) Paix et sécurité européenne et internationale, université Côte d'Azur 2021 ;
- Rapport CyclOpe : Rapportée par Le portail français des ressources minérales non énergétiques ([Mineralinfo.fr](#)), l'extraction des chapitres « [Métaux Electriques](#) » et « [Petits Métaux](#) », issus de ce 35<sup>ème</sup> rapport - [Les Marchés Mondiaux 2021](#), Ed. Economica. Rédaction par le BRGM suite aux conventions signées BRGM - CyclOpe et Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DGALN/DEB) du ministère de la Transition Écologique (MTE) ;
- [Les « terres rares », au cœur des conflits économico-politiques de demain](#), Jacques Fontanel, Conflits et guerres économiques, ILERI, Paris, Janvier 2021 ;
- Camille Bortolini, [La guerre des terres rares aura-t-elle lieu ?](#) Le Monde diplomatique, juillet 2020 ;
- [Résilience des matières premières critiques : la voie à suivre pour un renforcement de la sécurité et de la durabilité](#). Bruxelles, le 3.9.2020 COM (2020) 474 final, § 1. La communication, est complétée par une très substantielle Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020) Final Report ;
- [Matières premières et nouvelles dépendances](#), *Responsabilité et environnement*, Annales des Mines, n° 99, Juillet 2020 ;
- [Métaux rares, stratégiques et critiques : de quoi parle-t-on exactement ?](#) Learnandconnect.pollutec, Hélène Bouillon-Duparc, 6 nov. 2019 ;
- [Les enjeux stratégiques des terres rares et des matières premières stratégiques et critiques](#), Rapport de M. Patrick Hetzel, député et Mme Delphine Bataille, sénatrice, fait au nom de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, n° 617, tome I (2015-2016) - 19 mai 2016 ;
- [Rapport sur la gestion durable des matières premières minérales](#) déposé au nom de la mission d'information du développement durable et de l'aménagement du Territoire, présenté par les députés Christophe Bouillon et Michel Havard, Assemblée nationale le 26 octobre 2011, n°3880, 164 p.

## 7.2 LES TERRES RARES

### 7.2.1 QUELQUES PREMIÈRES DÉCOUVERTES

Les terres rares (*Rare-Earth Elements* ou *REE* ou *REY*) ont d'abord été découvertes au XVIII<sup>ème</sup> siècle, en Suède, en terrain granitique, dans un gisement de minerais situé près du village d'Ytterby. Certaines portent un nom issu de ce lieu : l'yttrium, le terbium, l'erbium et l'ytterbium.

Le chimiste français [Paul-Émile Lecoq de Boisbaudran](#) (1838-1912) découvrit le gadolinium, nommé ainsi par référence au chimiste finlandais [Johan Gadolin](#) (1760-1852) qui avait consacré sa vie à l'étude des terres rares : il découvrit, en 1794, le premier élément chimique du groupe des terres rares, l'yttrium dans le minerai *ytterbite*, roche noire découverte par [Carl Axel Arrhenius](#) (1757-1824). L'yttrium était très utilisé dans les années 1960, pour ses capacités à transmettre des courants électriques à très haute fréquence ou encore à améliorer les propriétés du verre, par exemple.

Le terbium, métal blanc assez lourd, a été découvert, en 1843, par le chimiste et professeur suédois [Carl Gustav Mosander](#) (1797-1858). Grâce à ses travaux de recherches, il découvrit aussi le lanthane et l'erbium. D'autres terres rares ont un nom dérivant de la Scandinavie comme l'holmium ou encore le thulium. Le français Lecoq de Boisbaudran publia, en 1874, *Spectres lumineux. Spectres prismatiques et en longueurs d'onde destinés aux recherches de chimie minérale*, un des ouvrages fondateurs de la spectroscopie. Puis entre 1875 et 1886, il met en évidence les indices de l'existence du gallium, isole le samarium et découvre le dysprosium.

### 7.2.2 QUELQUES RAPPELS

Bien qu'appelés terres rares, ces éléments ne sont pas rares car ils sont relativement abondants dans l'écorce terrestre mais les concentrations dans les gisements sont faibles.

Le plus abondant, le [cérium](#), est plus répandu dans l'écorce terrestre que le [cuivre](#) ; le plus rare, le [thulium](#), est quatre fois plus abondant que l'argent. Généralement, ils se présentent commercialement sous forme d'oxydes, de sels ou de métaux, les éléments étant séparés ou pas. Ils possèdent des propriétés physico-chimiques souvent uniques et sont de fait des éléments essentiels dans de nombreuses nouvelles technologies : semi-conducteurs, lasers, smartphones, panneaux solaires, aimants permanents, batteries, composants de véhicules hybrides, appareils d'imagerie médicale, systèmes de guidage de missile, équipements des avions de chasse, etc.

1	H																	2	He																
3	Li	4	Be																	10	Ne														
11	Na	12	Mg																	18	Ar														
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
55	Cs	56	Ba	57-71		72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
87	Fr	88	Ra	89-103		104	Rf	105	Db	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt	110	Ds	111	Rg	112	Cn	113	Uut	114	Uuq	115	Uup	116	Uuh	117	Uus	118	Uuo
				<b>Terres rares légères (LREE)</b>																	<b>Terres rares lourdes (HREE)</b>														
<b>Lanthanides</b>				57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71																	
				La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																	
<b>Actinides</b>				89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103																	
				Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																	

Tableau périodique avec la mention des terres rares.

Selon l'Union internationale de chimie pure et appliquée (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) - [IUPAC](#), les éléments appartenant aux terres rares réelles sont uniquement les 17 oxydes de terres rares répartis, en raison de certaines propriétés physico-chimiques très similaires, comme suit : le groupe des 15 lanthanides (éléments de numéros atomiques compris entre 57 et 71, du lanthane au lutécium) auquel s'ajoutent, du fait d'autres propriétés chimiques voisines, l'yttrium et le scandium. Un élément est instable : le prométhium, non présent naturellement sur terre à des concentrations significatives, car il est radioactif et obtenu par la fission de l'uranium.

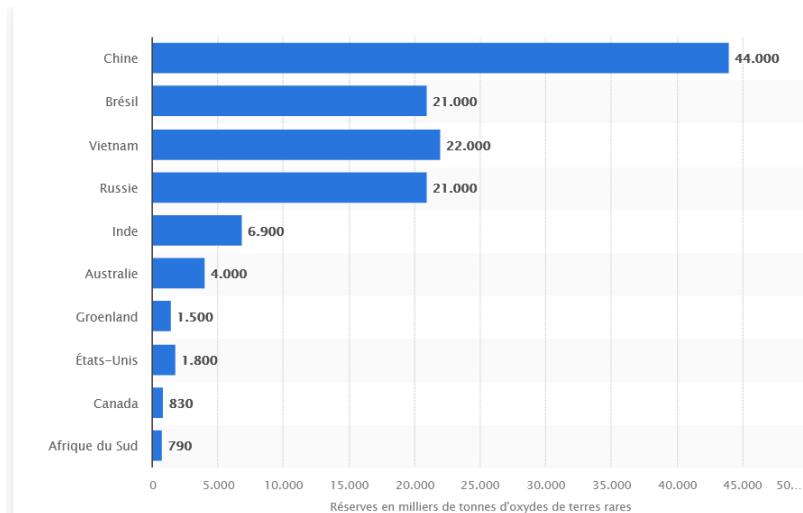
On distingue les terres cériques, légères ou *LREE* (lanthane, cérium, praséodyme, néodyme, samarium, europium et gadolinium) et les terres yttriques, plus lourdes ou *HREE* (les autres terres rares), l'europium et le gadolinium étant parfois classés comme terres rares lourdes. Les gisements offrant les plus fortes concentrations de terres rares lourdes se situent en Chine, qui abrite des gisements d'argiles ioniques enrichis en terres rares représentant pas loin de l'essentiel de l'offre mondiale en terres rares lourdes. Ils sont rares et de petite taille, aussi les terres lourdes représentent un enjeu stratégique important. A l'opposé, les gisements de terres légères sont nombreux, présents dans de nombreux pays, parfois très importants (comme ceux associés à des massifs de carbonatites).

Selon le [BRGM](#), les terres rares sont présentes à toutes les étapes du cycle des roches : magmatique, métamorphique, sédimentaire. Elles sont largement présentes à l'état de traces dans la croûte terrestre. Les gisements avec des teneurs économiquement exploitables sont éparpillés et assez peu nombreux, et aucun d'entre eux ne contient l'ensemble des terres rares.

### 7.2.3 PRODUCTION, EXTRACTION ET RAFFINAGE

Selon les fiches du site [Atlas sociologique mondial](#), jusqu'en 1948, la plupart des terres rares du monde proviennent de gisements de sable de placer situés en [Inde](#) et au [Brésil](#). Dans les années 1950, l'[Afrique du Sud](#) devient la principale source mondiale d'oxydes de terres rares grâce au gisement riche en monazite de la mine de Steenkampskraal, dans la province du Cap occidental. À partir du milieu des années 1960, les [États-Unis](#) occupent une place importante dans la production mondiale de terres rares et ce, jusqu'à la fin des années 1980 avec l'exploitation de la mine de Mountain Pass, en Californie, qui fermera en 2002.

Sur la période 1990 à 2010, de nouveaux gisements sont exploités en [Australie](#), en [Russie](#), en [Inde](#), au [Brésil](#) et en [Malaisie](#). Cependant, la [Chine](#) conserve son avance en termes de production d'oxydes de terres rares devant l'Australie, les États-Unis, et d'autres pays qui développent leurs activités minières comme la [Birmanie](#), le [Burundi](#), la [Thaïlande](#) et le [Viêt Nam](#). Les [États-Unis](#) décident de relancer l'industrie américaine des terres rares, notamment par la réouverture de la mine Mountain Pass en 2013. Le [Canada](#) et l'[Afrique du Sud](#) envisagent de nombreux projets de prospection, y compris dans les fonds marins.



La Chine possède les plus grands [gisements actuellement connus](#) dans le monde, mais des pays comme le Brésil, le Viêt Nam et la Russie disposent aussi d'un gros potentiel minier encore largement inexploité. Les États-Unis et l'Australie ont, quant à eux, augmenté leur production de terres rares à partir des années 2010 et, plus récemment, le Myanmar et la Thaïlande ont commencé à en extraire des quantités considérables.

Comme le révèle notre graphique, les États-Unis ont relancé leur production quand ces métaux sont devenus indispensables aux nouvelles technologies.

Pays comptant les plus grandes réserves de terres rares en 2021 (en milliers de tonnes d'oxydes de terres rares) [Statista 2022](#)

Un minéral de terre rare peut contenir un ou plusieurs éléments de terre rare comme constituants métalliques principaux. Les 18 minéraux de terres rares sont : aeschynite, allanite, apatite, bastnäsite, britholite, brockite, cerite, fluocérite, fluorine, gadolinite, monazite, parisite, stillwellite, synchysite, titanite, wakefieldite, xénotime, zircon.



Par exemple, la bastnäsite renferme du carbone et du fluor, couplés à du cérium, du lanthane ou de l'yttrium. Du néodyme et du praséodyme sont aussi souvent présents. Les principaux gisements se trouvent à Mountain Pass en Californie, à Bayan Obo en Mongolie intérieure et dans diverses exploitations au Sichuan en Chine.

Cristal de bastnäsite-cérium. *Source* : [Frandroid](#), 2021

Les minéraux de terres rares n'ont pas la valeur stratégique des oxydes de terres rares. Les principaux états producteurs de minéraux de terres rares sont la Russie, l'Inde, la Malaisie et le Burundi. Les principaux états producteurs d'oxydes de terres rares sont la Chine, l'Australie, les États-Unis, la Birmanie et la Russie.



Le gisement de Bayan Obo, en Chine, dépasse des teneurs élevées de 5% en éléments de terres rares (pour en obtenir 50 kg, il faut extraire 1 tonne de roche).  
© Xinhua/ZUMA/REA



Le site américain de Mountain Pass, en Californie, aux États-Unis extrait environ 15 % des terres rares dans le monde. © Steve Marcus/REUTERS





Le mont Weld est un site minier en Australie occidentale, parmi les gisements de terres rares les plus riches au monde (néodyme, praséodyme entre autres). [Ns Energy](#)



Gakara est la première et la seule mine de minerais de terres rares située au Burundi, en Afrique, avec la plus forte teneur au monde. [Agence Ecofin](#)

Contenues dans des minerais (monazites diverses, carbonatites, etc.) et des alliages, les terres rares doivent être traitées, séparées et purifiées suivant leur utilisation. Pour cette opération de séparation, il est nécessaire de développer des procédés métallurgiques appropriés pour transformer sur place le minerai brut en un concentré utilisable. Compte tenu des technologies à mettre en œuvre, les investissements sont très importants et deviennent rentables sur de longues périodes.

Au départ le minerai ne contient pas que des terres rares, mais aussi de nombreuses impuretés qu'il faut éliminer. L'opération d'enrichissement consiste à faire en sorte que le pourcentage de terres rares soit le plus élevé possible : broyage du minerai en petits morceaux, puis tri des éléments inutiles. Ces opérations sont menées afin d'obtenir une sorte de boue faite de poussières humides contenant les particules de terres rares rendues par un système de filtration emportant toutes les impuretés.

Suivant les applications, la séparation n'est pas nécessaire et il est possible d'utiliser un mischmétal (de l'allemand Mischmetall, alliage métallique), appelé aussi métal d'Auer, en référence au chimiste et industriel autrichien, [Carl Auer von Welsbach](#) (1858-1929), spécialiste des terres rares. Il est composé de l'ordre de 50% de cérium et de 25% de lanthane avec de plus petites quantités de néodyme, de praséodyme et d'autres traces de terres rares constituant l'équilibre. Comme les terres rares s'oxydent et absorbent facilement l'hydrogène et l'azote, il est très difficile de produire un échantillon de mischmétal suffisamment pur pour en tester les propriétés mécaniques et électriques. Il est dans la préparation de pratiquement toutes les terres rares.

Pour des applications plus contraignantes, il importe d'utiliser des terres rares bien identifiées et dont la qualité est garantie, ce qui tient en grande partie à leur purification. Leur séparation repose alors sur différentes techniques qui peuvent parfois être utilisées conjointement.

Parmi les techniques appropriées, on note que :

- L'hydrométallurgie est l'une des techniques les plus intéressantes de purification des métaux. Elle consiste à mettre en solution les différents métaux contenus dans un minerai ou un concentré afin de les séparer pour les valoriser : opérations de lixiviation ou dissolution, de séparation (purification) et enfin récupération du métal voulu sous forme métallique (électrolyse). Les différents métaux ainsi traités sont le zinc, le nickel, le cuivre, le cobalt, l'uranium, le chrome, le manganèse. L'Institut européen d'hydrométallurgie (IEH), de Marcoule, est une structure unique permettant la récupération des terres rares, dans les minerais ou les déchets technologiques.
- La pyrométallurgie constitue souvent une approche concurrente ou complémentaire : on peut ainsi d'abord faire fondre en conditions réductrices des téléphones portables et récupérer les métaux les plus intéressants dans une phase de cuivre en fusion.
- Suivant les cas à traiter, des procédés de chimie fine, extractive, séparative, peuvent être aussi mis en œuvre (cas pour la monazite qui contient des terres rares).

#### **7.2.4 LE RECYCLAGE : QUELQUES ACTIONS DU BRGM**

Selon un rapport rédigé sous l'égide des Nations Unies, seulement 20% des 45 millions de tonnes de déchets électroniques sont recyclés. Contrairement à des éléments communs comme le fer ou le cuivre, les métaux rares sont peu recyclés car les quantités récupérées sont souvent très faibles et présentent des impuretés. De plus la rentabilité des procédés n'est pas comparable par rapport aux faibles coûts d'extraction de ces métaux dans certains pays.

Parvenir à recycler les métaux, rares ou non, contenus dans les déchets des équipements électriques et électroniques ou D3E (ordinateurs, smartphones, micro-ondes, par exemple) constitue un enjeu. L'Europe constitue une importante zone de consommation de terres rares par les produits issus de ses industries à haute valeur ajoutée. De nombreux biens issus des nouvelles technologies sont et ont été consommés, accumulés et amenés en fin de vie. Ils constituent ainsi des ressources secondaires de terres rares car, dans ce cas, le besoin énergétique est bien inférieur à celui nécessaire à l'exploitation des ressources primaires.

Divers programmes de recherche européens et nationaux sont en cours de réalisation pour répondre à ces défis technologiques au vu de la difficulté de séparation des éléments.

Financé par des fonds européens, le projet VALOMAG regroupe le BRGM, le CEA, Suez, deux universités néerlandaises (Université de technologie de Delft, Université de Leiden) et l'entreprise allemande Kollector Magnet Technology. Lancé en janvier 2020, il a pour objectif de mettre au point des techniques efficaces pour extraire et valoriser les aimants permanents (méthode de broyage et de dissolution du matériau). Le BRGM réalise des pilotes de démantèlement à grande échelle des disques durs d'ordinateurs. Le projet prend en compte toute la chaîne de traitement depuis la collecte et la caractérisation des déchets, jusqu'à la production de nouveaux aimants pour des utilisations spécifiques, etc.

Deux projets européens auxquels participe le BRGM visent à récupérer les métaux en vue de leur recyclage via des procédés biologiques où les bactéries remplacent les réactifs chimiques car elles produisent elles-mêmes l'équivalent des réactifs chimiques pour dissoudre les métaux. Elles peuvent extraire quasiment 100% du cuivre, 100% du nickel, 100% du cobalt de ces déchets électroniques.

- Le projet européen [H2020 NeMO](#) étudie l'opportunité de récupérer plusieurs éléments présents en faible quantité dans les déchets d'extraction de la mine finlandaise de Sotkamo, afin de pouvoir réutiliser le résidu comme matériau de construction. Les procédés de biolixiviation sont développés pour mettre en solution, entre autres, le nickel, le cobalt et le cuivre résiduels, puis de nouvelles méthodes sont expérimentées afin de récupérer les éléments mis en solution, ainsi que d'éventuelles traces de terres rares, dans les lixiviats obtenus.
- Par ailleurs, dans le cadre du projet [H2020 CroCodile](#), le BRGM développe un procédé de biolixiviation réductrice afin de valoriser le cobalt contenu dans des limonites, matériau pour lequel il existe à ce jour peu de procédés de traitement économiquement viables.

#### Sources :

- [Dossier Terres rares](#), L'[Élémentarium](#) : nouveau site internet dédié aux éléments du tableau périodique pour tout savoir sur les comportements physique et chimique des 118 éléments, allant de l'hydrogène  $^1\text{H}$  à l'oganesson  $^{118}\text{Og}$  ;
- [What is mischmetal ?](#) Blog Greelane indépendant [Ressource éducative](#) ;
- [Le recyclage des métaux indispensable à la transformation de l'économie](#), Pascale Megardon-Auzepy, Crédit agricole, podcast 21 janv. 2022 ;
- [Terres rares contre semi-conducteurs : une course de fond technologique aux enjeux géopolitiques](#), Anne Kraatz, juil.2021 ;
- [Ressources minérales : les terres rares](#), BRGM, 10 juin 2021 ;
- [Que sont les terres rares, ces matières premières stratégiques ?](#) Atlas sociologique mondial, [Atlasocio.com](#), 20 déc. 2019 ;
- [Les enjeux stratégiques des terres rares et des matières premières stratégiques et critiques](#), Rapport de M. Patrick Hetzel, député et Mme Delphine Bataille, sénatrice, fait au nom de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, n° 617, tome I (2015-2016) - 19 mai 2016.

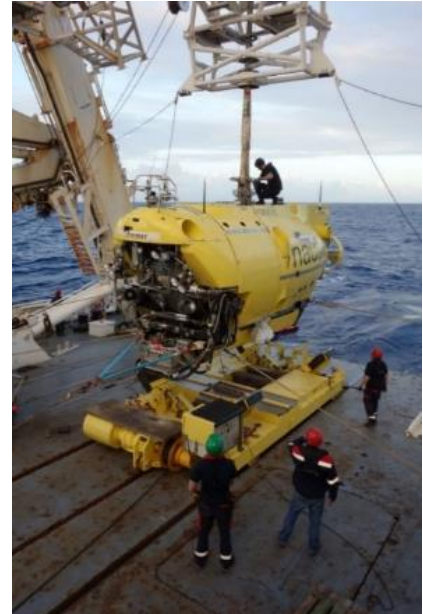
## 7.2.5 FRANCE : EXPLORATION DE GISEMENTS DANS LES GRANDS FONDS SOUS-MARINS

Selon les propos rapportés de l'interview du géologue de l'[Ifremer](#), Ewan Pelleter, il est encore très difficile de connaître les ressources réelles qui se trouvent dans les grands fonds.

En juillet 2022, le chercheur embarquera pour sa seconde mission d'exploration des grands fonds marins (-4 600 m) dans l'Atlantique Nord, à l'aide du petit sous-marin le Nautilus, le même utilisé en 1987 pour explorer le Titanic. Son équipe va identifier des ressources minières potentielles et observer la biodiversité.

Cette mission, Hermine II, à bord du navire de la flotte océanographique française, le [Pourquoi Pas ?](#) s'effectuera pour le compte de la France sous l'égide de l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM), un organisme onusien chargé d'encadrer les pratiques d'exploration, de prospection et d'exploitation des ressources minières en haute mer.

Source : [lfremer.fr](#)



Le nouveau robot de l'Ifremer, [Ulyx](#), explorera les grands fonds marins. Ce robot autonome de la flotte océanique française plongera à 6 000 m de profondeur.

Il complètera l'exploration des grands fonds aux côtés du robot téléopéré à câble, Victor 6000, piloté à partir d'un navire support et du sous-marin habité Nautilus.

Source : [L'odyssée d'Ulyx au fond des océans](#), Sciences Ouest, n°385, Janv.-Fév. 2021

Les associations environnementales sont inquiètes de l'exploration des grands fonds. Elles soulignent les risques pour les écosystèmes lents à se reconstituer (plusieurs décennies) et pour la biodiversité, liés à une éventuelle exploitation minière des grands fonds marins dans les années à venir. La France souhaite, elle, une meilleure connaissance scientifique.

En janvier 2022, lors de l'audition du directeur du département Ressources physiques et écosystèmes de fond de mer de l'Ifremer, dans le cadre d'une mission d'information qu'ils menaient sur les fonds marins, les sénateurs ont appris, par exemple, que 10 % des tests PCR sont constitués de molécules extraites de zones situées vers -1700 mètres de fond. Les ressources minérales sous-marines n'ont été évaluées que dans des zones extrêmement réduites de la surface du globe, dans les régions où l'AIFM a délivré des permis d'exploration.

La France, deuxième puissance maritime du monde en termes de superficie et première en termes de domaine sous-marin au monde, n'a pas soutenu le moratoire de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) car « Investir dans le champ des fonds marins », est l'un des dix objectifs du plan d'investissement [France 2030](#). La France a étendu son influence au fond des océans, cependant ses droits sur ces zones ne s'exercent que sur le sol et le sous-sol marin et non sur la colonne d'eau, qui reste du domaine international.

### Sources :

- [Les associations environnementales inquiètes de l'exploration des grands fonds](#), Les Echos, Muryel Jacque, 9 février 2022 ;
- [Haute mer : il est encore très difficile de savoir les ressources réelles qui se trouvent dans les grands-fonds](#), Liberation.fr, Aurore Coulaud, 9 février 2022 ;
- [La France étend son territoire sous-marin dans l'océan indien](#), Les Echos, 11 juin 2020.

## 7.3 PERSPECTIVES

Les terres rares et autres métaux critiques sont devenus indispensables au développement des technologies de pointe par ses propriétés physico-chimiques exceptionnelles et participent à la transition énergétique. Inégalement réparties sur la planète, difficiles à produire et à traiter, les terres rares sont une source de tensions géopolitiques et économiques d'où des enjeux sociétaux et environnementaux tout aussi importants à considérer que les enjeux technico-économiques. En effet, la multiplication des zones d'exploitation minières nécessaires a d'importants impacts sur l'environnement et la santé. Les minerais de terres rares agrègent différents métaux et compte tenu de leurs propriétés chimiques très proches, il est très difficile de réaliser leur séparation et leur purification. Les méthodes utilisées nécessitent, du moins aujourd'hui, des procédés complexes - extraction liquide-liquide, résines échangeuses d'ions, etc. - et notoirement polluants : rejets d'acides, de bases, de solvants, de métaux lourds ou de déchets radioactifs.

Aujourd'hui, l'intérêt stratégique de ces éléments pousse les Etats et les industriels à repenser les modes d'approvisionnement. De même, la recherche de nouveaux procédés chimiques pourra répondre à ces enjeux par des techniques de recyclage et des matériaux de substitution.

Si l'épuisement des ressources minérales avant la fin de ce siècle est très peu probable pour la plupart des matières premières minérales par contre des pénuries sur des durées importantes sont à envisager, faute d'une mise en exploitation suffisamment rapide de nouveaux gisements. En effet, avec la transition énergétique, la demande en métaux pourrait exploser d'ici à 2050 d'autant que les défis environnementaux de la Chine et le durcissement des réglementations pourraient également restreindre les approvisionnements d'ici cet horizon. Les plus fortes tensions devront porter sur les métaux plus traditionnels comme le cuivre, l'aluminium ou le nickel.

Selon les prévisions d'[Emmanuel Hache](#), économiste à l'Institut français du pétrole et des énergies nouvelles (IFPEN), dans le cadre des politiques de lutte contre le réchauffement climatique, contrairement au cuivre ou au cobalt, les risques qui pèsent sur les terres rares, tous types confondus, ne sont pas tant géologiques mais plutôt :

- géostratégiques : la Chine domine l'ensemble de la chaîne de valeur, de la production des minerais jusqu'aux activités de séparation des terres rares et de production de produits intermédiaires ;
- économiques : le marché mondial des terres rares dépend de la stratégie chinoise en matière de consommation, de production et d'exportation sur les marchés ;
- environnementaux : les activités de production et de séparation des terres rares engendrent des externalités environnementales et sanitaires importantes (pollutions, etc.). En outre, elles requièrent de grandes quantités d'eau et cette consommation est amenée à croître en même temps que l'offre de terres rares, ce qui impactera directement les pays à fort stress hydrique comme la Chine et l'Australie.

[Guillaume Pitron](#), journaliste et réalisateur de documentaires, auteur de nombreux ouvrages, présente des données chiffrées sur les consommations des métaux nécessaires aux nouvelles technologies. Ainsi concernant l'éolien, il précise que pour fournir l'ensemble de la filière en suivant les développements demandés, il faudrait utiliser des milliards de tonnes d'acier, des centaines de millions de tonnes d'aluminium et des dizaines de millions de tonnes de cuivre. Il rappelle que 8 tonnes de roche sont nécessaires pour produire 1 Kg de vanadium. Il en faut jusqu'à 1 200 tonnes pour produire 1 Kg de lutécium (très cher et 10 tonnes de production annuelle).

En ce qui concerne l'approvisionnement de ces métaux, pour diminuer la dépendance de l'UE aux pays producteurs, il faudra favoriser l'extraction et la transformation de ces matières premières les plus importantes dans les pays de l'UE, en respectant les normes environnementales. Un secteur est très concerné à court terme, celui de l'automobile électrique avec les batteries électriques grandes consommatrices de matières stratégiques (lithium, cobalt, nickel, manganèse, graphite, etc.). La France possède des ressources minières dans son sol et dans la région Pacifique, Polynésie française et la Nouvelle Calédonie.

Au sujet du recyclage de ces matières premières, bien qu'il ne puisse pas répondre à l'ensemble des besoins des pays, particulièrement de l'UE, une difficulté existe, c'est le faible développement de ces filières de recyclage. Extraire et recycler les métaux qui composent les montagnes de déchets technologiques que nous créons sans cesse est un enjeu considérable sur le plan technologique. Les procédés développés doivent être respectueux des normes environnementales et sociales.

Aussi l'intérêt stratégique de ces terres rares conduit les Etats et les industriels à chercher des produits de substitution de ces éléments. Des recherches sont menées et proposent des pistes très intéressantes, sans pour autant diminuer les qualités et les performances des produits créés.

Compte tenu du contexte international et du montant des investissements nécessaires ainsi que des impacts environnementaux et sociétaux, il pourrait se poser la question de la soutenabilité de la transition énergétique au regard des ressources sur lesquelles elle s'appuie directement - les métaux - ou indirectement - les besoins accrus en eau et en énergie.

Ainsi un changement de la façon de produire, de consommer et de recycler ces ressources doit être réfléchi. La situation est telle que la création de matériaux toujours plus complexes (alliages, composites, etc.) rend de plus en plus difficile la séparation des métaux assemblés ! Cela peut se traduire par des actions telles que l'utilisation de matériaux renouvelables et recyclables, la conception d'objets modulaires et réparables à base de matériaux simples nano structurés. Les instances étatiques doivent poursuivre et développer leur soutien aux industriels, aux laboratoires de recherche, aux jeunes sociétés à travers divers mécanismes de financement internationaux et nationaux, avec des cursus de formation adaptée aux étudiants en mobilisant toutes les ressources intellectuelles du pays pour répondre à ces enjeux, dans le respect de l'environnement et de l'humain.

## Sources :

- [Les insuffisances européennes et françaises face à l'approvisionnement en minerais stratégiques](#), Pierre-Marie Durier, Portail-IE, 8 février 2022 ;
- [Et si les énergies renouvelables signaient le retour en force des mines en France ?](#) Millénaire 3, Veille, La prospective de la Métropole de Lyon, 3 janvier 2022 ;
- Nicolas Charles, Johann Tuduri, Gaetan Lefebvre, Olivier Pourret, Fabrice Gaillard, Kathryn Goodenough, 2021. [Ressources en terres rares de l'Europe et du Groënland : un potentiel minier remarquable mais tabou ?](#) In : Boulvais P. & Decrée S. (Eds), Ressources métalliques : cadre géodynamique et exemples remarquables. ISTE Science Publishing Ltd-Wiley ;
- Emmanuel Hache, Charlène Barnet, Gondia-Sokhna Seck, [Les terres rares dans la transition énergétique : quelles menaces sur les « vitamines de l'ère moderne » ?](#) Les métaux dans la transition énergétique, n° 3, IFPEN, Janvier 2021 ;
- [Les terres rares, et après ?](#) Michel Latroche, CNRS Le Journal, 9 mai 2019 ;
- [Métaux rares : la face cachée de la transition énergétique](#), Guillaume Pitron, *TedxLille*, 28 juin 2018, (17:08) ;
- [L'épuisement des métaux et minéraux : faut-il s'en inquiéter ?](#) Technical Report, Jun 2017, Alain Geldron, Direction Économie circulaire et déchets - ADEME – Angers ;
- [L'Âge des low tech](#). Vers une civilisation techniquement soutenable, Philippe Bihouix, Essais, Ed. Seuil, avril 2014.

## 7.4 RÉFÉRENCES

### Quelques autres sites-sources

- L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie ([ADEME](#))
- Agence internationale de l'énergie ([AIE](#))
- Benchmark Mineral Intelligence ([BMI](#))
- [Bibliothèque des Rapports publics](#)
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières ([BRGM](#))
- Conseil en stratégie, cartographie et analyse de données [Cassini Conseil](#)
- Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives ([CEA](#))
- Centre Technique des Industries Mécaniques ([CETIM](#))
- [Collège de France](#)
- Conseil mondial de l'énergie / World Energy Council ([CME](#))
- Centre National de la Recherche Scientifique ([CNRS](#))
- [Futurs énergétiques 2050. Principaux résultats](#), RTE France, Octobre 2021
- [Élémentarium](#)
- [Industrie & Technologies](#)
- Institut français des relations internationales ([IFRI](#))
- Institut français du pétrole et des énergies nouvelles ([IFPEN](#))
- The International Renewable Energy Agency ([IRENA](#))
- Joint Research Center ([JRC](#))
- Le portail français des ressources minérales non énergétiques [Mineral Info](#)
- [Les Echos](#)
- National Minerals Information Center ([NMIC](#))
- Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques ([OSFME](#))
- Plateforme d'information des acteurs de l'environnement et de l'énergie, [Pollutec Learn & Connect](#)
- Réseau de Transport d'Electricité français ([RTE](#))
- Revue de l'Electricité et de l'Electronique ([REE](#))
- [Statista](#), site portail allemand spécialisé dans l'analyse de données du secteur économique
- [Techniques de l'ingénieur](#)
- [Usine Nouvelle](#)
- [Wikipedia](#)

### Quelques autres références

- [Ressources Transition et métaux rares : vraies et fausses alertes](#), Alternatives Economiques, 31 décembre 2021, Hors-série n°124, 01/2022 ;
- Thomas Zemb, Jean-Christophe P. Gabriel. [L'extraction raisonnée : une opportunité pour un recyclage local des métaux stratégiques](#). In Conférence débat de l'Académie des Sciences, Paris, France, novembre 2021 ;
- [Rapport sur une stratégie européenne pour les matières premières critiques](#) (2021/2011(INI)), Document de séance A9-0280/2021, 12 octobre 2021, Commission de l'industrie, de la recherche et de l'énergie, Rapporteuse : Hildegard Bentele (\*) Commissions associées – article 57 du règlement intérieur ;
- [Terres rares : défi écologique et géopolitique](#), Cité des Sciences et de l'Industrie, Bibliothèque, Zooms, septembre 2021 ;
- [L'Année stratégique 2022](#), Sous la direction de Pascal Boniface, Armand Colin/IRIS éditions, Septembre 2021 ;
- [Les états quantiques améliorés par des nanoparticules de terres rares](#), CNRS, Diana Serrano, 24 septembre 2020 ;
- [L'Union européenne espère sortir de sa dépendance aux terres rares ?](#) *Portail de l'IE*, Louis-Marie Heusé, 16 sept. 2020 ;
- [Matières premières et nouvelles dépendances](#), *Annales des mines*, N° 99 - Juillet 2020 ;
- [Comment sont extraites les terres rares et pourquoi cela pollue autant ?](#) *Frandroid*, 29 octobre 2019 ;
- [Terres rares : notre ultra dépendance à la Chine](#), *The conversation*, Olivier Soria, 28 octobre 2019 ;
- [Les matériaux à base de terres rares : histoire, enjeux et perspectives](#), Journée de conférence, Institut de Chimie et des Matériaux Paris-Est, CNRS-UPEC, Thiais, 3 octobre 2019 ;
- [Terres rares](#), Valérie Buissette, Thierry Le Mercier, Techniques de l'ingénieur, n° J6630, 10 mai 2019 ;
- [L'yttrium, la mémoire quantique de demain](#), *Techniques de l'ingénieur*, Pierre Thouverez, 20 août 2018 ;
- [Métaux rares : la face cachée de la transition énergétique](#), Guillaume Pitron, *TedxLille*, 28 juin 2018, (17:08) ; *Arctique, Russie*
- [Métaux stratégiques : La guerre en Ukraine pourrait freiner la transition écologique de l'Union européenne](#), Novethic, mars 2022 ;

- F. Lasserre, A. Lerouge, [Les terres rares en Arctique, un réel enjeu stratégique ?](#) *Revue Diplomatique*, Hors-série n°1, *L'Arctique, enjeux et perspectives d'un nouveau pôle géopolitique*, 1-21, novembre 2021 ;
- [La Russie et les terres rares, ancienne ressource, nouvelle politique](#), L'Observatoire, Centre d'analyse de la CCI France Russie, Nicolas Mazzucchi, 1<sup>er</sup> novembre 2018 ;

#### *Afrique*

- [L'Afrique, alliée inattendue de l'Europe face à la domination chinoise sur les terres rares](#), Agence Ecofin, 18 juin 2021 ;
- [L'Afrique des ressources naturelles](#), *International Institute for Sustainable Development (IISD)*, Isabelle Ramdoo, nov. 2019 ;
- [Terres rares : Afrique, une alternative à la Chine](#), *Africanews*, 6 juin 2019, vidéo (5:29) ;

#### *Groënland*

- [Terres rares : enjeu géopolitique du XXI<sup>e</sup> siècle : Chine - Etats-Unis - Europe - Japon - Groënland](#), Damien Degeorges, collection « Un autre regard » dirigée par Georges Nurdin, Editions L'Harmattan, 25 février 2021 ;
- [Pourquoi le Groënland avive les appétits de la Chine et des USA : Excellentes explications](#), Damien Degeorges, CultureTops, 15 avril 2021 ;
- [L'exploitation des terres rares et de l'uranium, enjeu électoral au Groënland](#), Marie-Pierre Olphand, Radio France Internationale, 6 avril 2021 ;
- [Terres rares : « La face cachée peu reluisante du défi climatique n'a pas fini d'inquiéter les électeurs, du Groënland ou d'ailleurs »](#), le Monde, Philippe Escande, 8 avril 2021 ;
- [Le Groënland et ses terres si convoitées](#), *Franceinfo*, 7 octobre 2019 ;

#### *Autres publications de J.-P. Damiano dans le Bulletin IESF Côte d'Azur*

- [Stockage d'énergie électrique : un regard sur les enjeux et les défis technologiques](#), IESF Côte d'Azur, Bull. 1, p.10-22 (2022) ;
- [Aperçu des apports des technologies quantiques à la sécurité et à la défense](#). IESF Côte d'Azur, Bull. n°4, p.5-25 (2021) ;
- [Les technologies quantiques. Contexte et enjeux, applications et perspectives](#). IESF Côte d'Azur, Bull. n°2, p.8-29 (2021) ;
- [De la 5G à la 6G : contexte et enjeux !](#) IESF Côte d'Azur, Bull. n°4, p.13-23 (2020) ;
- [Les végétaux doués d'intelligence ? Aspects historiques et philosophiques. Eléments de synthèse des capacités cognitives et des mécanismes. Nouvelles approches bio-robotiques](#). IESF Côte d'Azur, Bull. n°3, p.10-25 (2020) ;
- [Biomimétisme, intelligence artificielle, robotique et applications de l'intelligence en essaim. Cybersécurité et questions d'éthique et de droit](#). Part.2, IESF Côte d'Azur, Bull. n°2, p.7-25 (2020) ;
- [Biomimétisme, intelligence artificielle et robotique. Applications de l'intelligence en essaim et questions d'éthique et de droit](#). Part.1, IESF Côte d'Azur, Bull. n°1, p.2-14 (2020) ;
- [Réflexions sur les enjeux de l'IA et les questions d'éthique](#), IESF Côte d'Azur, Bull. n°3, p.2-7 (2019) ;
- [La cobotique : quand les humains et les robots collaborent](#), IESF Côte d'Azur, Bull. n°2, p.3-7 (2019) ;
- [Les laboratoires de recherche et la sécurité numérique](#). Part.1&2, IESF-Côte d'Azur, Bull. n°2, p. 3-5 / Bull. n°3, p. 5-7 (2018).

#### **Jean-Pierre Damiano**

**Ancien ingénieur de recherches ([Université Côte d'Azur CNRS](#))**

**Membre [IESF-Côte d'Azur](#) et [URSI-France](#)**

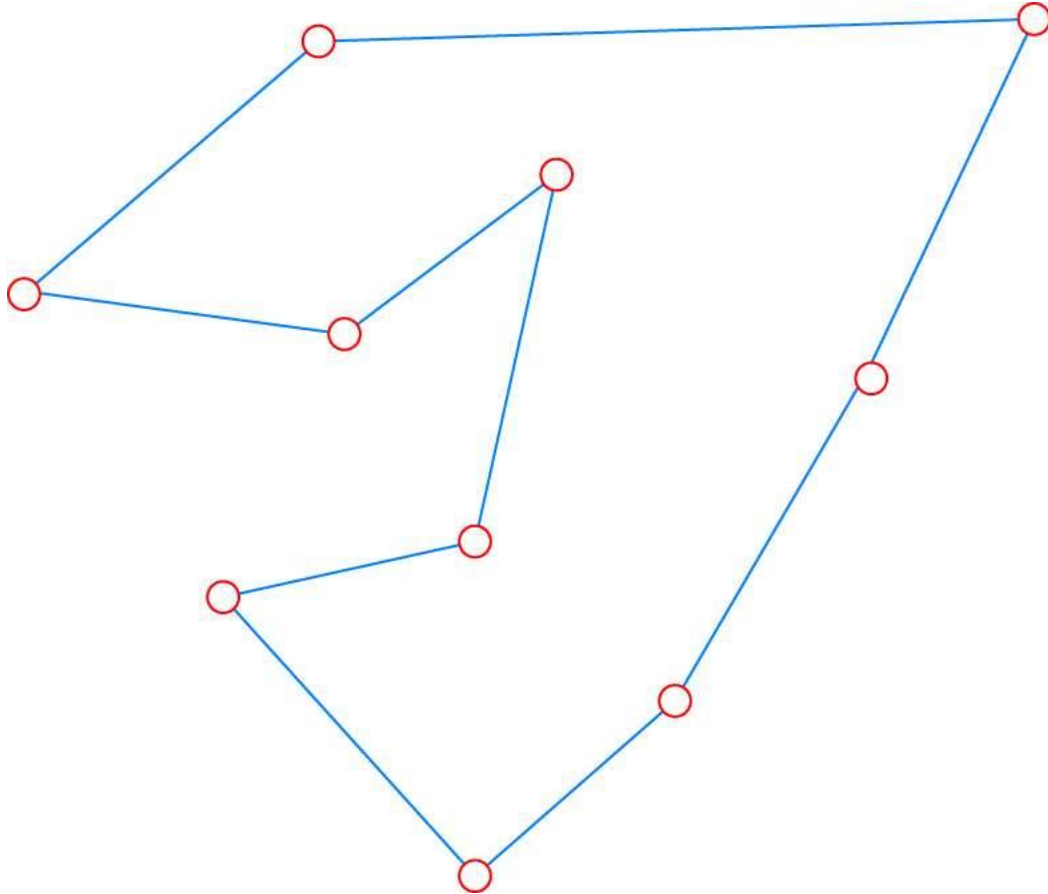
**[jean-pierre.damiano@univ-cotedazur.fr](mailto:jean-pierre.damiano@univ-cotedazur.fr)**

## 8. JEU MATHÉMATIQUE : SOLUTIONS DU BULLETIN N° 1 DE 2022

### Quel est le trajet optimal d'un voyageur de commerce ?

Le problème du voyageur de commerce est simple à formuler. Il doit visiter un certain nombre de villes, disons dix, en partant d'une ville et en y revenant après avoir visité toutes les autres. Il connaît les distances entre les villes prises deux à deux.

Quel trajet doit suivre le voyageur de commerce pour minimiser la distance parcourue ? On peut déterminer le nombre de trajets possibles assez facilement. Pour cela, on choisit une ville que l'on considère comme la ville de départ. Ensuite, on a neuf choix possibles pour continuer, huit une fois ce choix fait, etc. On obtient ainsi  $9 \times 8 \times 7 \times \dots \times 1$  trajets possibles.



Un trajet entre dix villes. © Hervé Lehning. Tous droits réservés.

Comme le sens de parcours ne compte pas, le nombre de trajets possibles est  $9 \times 8 \times 7 \times 6 \times 5 \times 4 \times 3 = 181.440$ . Comparer leurs longueurs est donc faisable à l'aide d'un ordinateur dans le cas de dix villes.

#### Question :

L'algorithme résolvant le problème du voyageur de commerce présenté ci-dessus est considéré comme inefficace. Pourquoi ?



Le trajet du voyageur de commerce. © Free-photos, Pixabay, DP

#### Réponse

Cet algorithme est inefficace car, quand le nombre de villes augmente, il devient vite inapplicable. Par exemple, pour 20 villes, le nombre de trajets à comparer est égal à  $60.822.550.204.416.000$  ! Si chaque trajet est engendré en une nanoseconde, il faut 60 millions de secondes pour tous les générer tous, ce qui fait environ deux ans. Ainsi, pour 21 villes, il faudra 42 ans, et pour 22, presque un millénaire !

Ce problème du voyageur de commerce fait partie d'une classe de problèmes qui pourraient être résolus si l'un des problèmes à un million de dollars de l'Institut Clay était résolu par l'affirmative. Il s'agit de la conjecture «  $P = NP$  ».

*Hervé Lehning Normalien et agrégé de mathématiques, il a enseigné sa discipline une bonne quarantaine d'années.*

## 9. JEU MATHÉMATIQUE :

### Voltaire avait-il raison à propos des cabinets noirs ?

À la période classique, on suspectait (à raison !) l'existence d'un cabinet noir qui ouvrait les lettres pour les lire et surveiller ainsi la population. Cette pratique pouvait vous conduire à la Bastille... ou pire...

Pour empêcher la lecture de leurs lettres, un grand nombre de gens les chiffraient afin qu'on ne puisse pas les lire. Le grand sceptique qu'était Voltaire ne croyait pas à la possibilité du décryptement des lettres chiffrées. Pourquoi ? À cause du très grand nombre de possibilités. Il aurait donc parié que vous seriez incapable de décrypter le message :

S2oe2a w45t qm1d2 e5 us4d1e2s4 e2n13o 1t23a2 i25s2t

#### Question :

Saurez-vous lui donner tort en décryptant ce message ?



François-Marie Arouet dit Voltaire (1724 ou 1725), d'après Nicolas de Largillière, exposé au château de Versailles.

© Collection Palace of Versailles, *Wikimedia commons*, DP

*Hervé Lehning Normalien et agrégé de mathématiques, il a enseigné sa discipline une bonne quarantaine d'années.*



## 10. SUDOKU

Complétez la grille avec les chiffres manquants, sachant que chaque colonne, chaque ligne et chacun des neuf carrés doit contenir **une seule fois tous les chiffres de 1 à 9**

La solution sera donnée dans le prochain bulletin

	4	5						7
		1					3	
			6	2				
					5			8
3	7	4	2		8	9	6	5
2			7					
				9	4			
	1					5		
4						6	7	

Solution du Sudoku du dernier bulletin

2	3	6	1	7	8	5	4	9
9	5	4	2	3	6	8	1	7
1	8	7	4	9	5	6	2	3
3	2	8	9	5	4	7	6	1
4	7	5	6	8	1	9	3	2
6	1	9	7	2	3	4	5	8
8	6	2	3	4	7	1	9	5
5	4	3	8	1	9	2	7	6
7	9	1	5	6	2	3	8	4

## 11. SUR VOTRE AGENDA

<i>Dates</i>	<i>Sujets / événements</i>	<i>Lieux</i>	<i>Organisation</i>
A reprogrammer	Déjeuner associatif annuel	La Guinguette Gaudoise	IESF CA

## 12. COTISATIONS 2022

### ADHESION – COTISATIONS 2022 AUX IESF COTE D'AZUR

Cette cotisation vous permet de participer à la formation de notre jeunesse avec le projet « Promotion des Métiers de l'Ingénieur et du Scientifique » PMIS dans les collèges et les lycées, de recevoir notre bulletin trimestriel, d'accéder aux informations sur les activités, conférences et visites organisées par l'IESF Côte d'Azur.

Nous ne pouvons faire fonctionner notre association sans votre aide.

- Pour les membres individuels (actifs et retraités), elle s'élève à 65 €, avec une réduction d'impôt de 66%.
- Pour les groupes régionaux, elle s'élève à 5,40 € par membre cotisant.
- Payer par carte bancaire en cliquant sur le lien suivant : [Payer sa cotisation 2022 sur HelloAsso](#)
- Payer par carte bancaire votre cotisation sur HelloAsso en scannant ce Qrcode



- Ou établir un chèque à l'ordre d'IESF Côte d'Azur
- Ou par virement interbancaire : IBAN FR76 1460 7003 3434 0190 9537 082

Merci.

Si vous ne l'avez déjà fait, il n'est pas trop tard pour devenir membre adhérent des Ingénieurs et Scientifiques de France de la Côte d'Azur (IESF-CA). Il vous suffit de retourner le bulletin ci-dessous accompagné de votre cotisation pour cette année, à l'adresse :

**IESF-CA - Polytech'Nice-Sophia Site Templiers 930 route des Colles - BP 145  
06903 - Sophia Antipolis Cedex**

**NOM :** ..... **Prénom :** .....

**Ecole / Université :** ..... **Adresse :** .....

**Code Postal** ..... **Ville :** ..... **Courriel :** .....

**Tous nos Bulletins sont disponibles sur le site d'IESF-CA : [coteazur.iesf.fr](http://coteazur.iesf.fr)**

Conformément à la loi informatique et liberté du 06/01/1978 (art.27), vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des données vous concernant. Si vous souhaitez modifier vos coordonnées ou si vous ne désirez plus recevoir de messages électroniques de cet annonceur, envoyez un mail aux IESF-CA :

[contact-coteazur@iesf.fr](mailto:contact-coteazur@iesf.fr)

**Responsables des groupes régionaux, faites-nous part des manifestations que vous organisez. Nous les publierons sur le site IESF Côte d'Azur (IESF-CA) pour en informer tous nos adhérents et sympathisants.**

*Article 18 du Règlement Intérieur : L'Association n'est pas responsable des opinions de ses membres, même dans ses publications.*

Siège : Espace Associations Nice Garibaldi - SIRET 810 124 982 000 10

Adresse Postale : IESF-CA Polytech'Nice-Sophia - Site Templiers

930 route des Colles BP 145 -- 06903 – Sophia Antipolis Cedex

Site : [coteazur.iesf.fr](http://coteazur.iesf.fr) ([www.iesf-ca.fr](http://www.iesf-ca.fr)) Compte Twitter : [@IESF\\_CA](https://twitter.com/IESF_CA) - Email : [contact-coteazur@iesf.fr](mailto:contact-coteazur@iesf.fr)

Page Facebook : [facebook.com/iesfca/](https://facebook.com/iesfca/)