

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة الاخوة منتوري قسنطينة I
Frères Mentouri Constantine I University
Université Frères Mentouri Constantine I

جامعة الاخوة منتوري قسنطينة
كلية علوم الطبيعة والحياة

Université Frères Mentouri Constantine
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie Végétale et Écologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie
Filière : Biologie végétale et Écologie
Spécialité : Écologie fondamentale et Appliquée

N° d'ordre :
N° de série :

Intitulé :

L'apport des terres rares dans la transition énergétique et numérique
Effets sur l'Environnement

Présenté par : BAKHOUCHE Maroua

Le 30/06/2022

BELBEKHOUCHE Lina

Jury d'évaluation :

Encadreur : Prof. KADEM Dhaou El Djabine	Université Frères Mentouri, Constantine 1.
Examineur 1 : Prof. SAHLI Lila	Université Frères Mentouri, Constantine 1
Examineur 2 : Dr. TOUATI Laid	Université Frères Mentouri, Constantine 1

Année universitaire
2021 - 2022

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة الإخوة منتوري قسنطينة I
Frères Mentouri Constantine I University
Université Frères Mentouri Constantine I

جامعة الاخوة منتوري قسنطينة
كلية علوم الطبيعة والحياة

Université Frères Mentouri Constantine
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie Végétale et Écologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie
Filière : Biologie végétale et Écologie
Spécialité : Écologie fondamentale et Appliquée

N° d'ordre :
N° de série :

Intitulé :

**L'apport des terres rares dans la transition énergétique et numérique
Effets sur l'Environnement**

Présenté par : BAKHOUCHE Maroua
BELBEKHOUCHE Lina

Le 30/06/2022

Jury d'évaluation :

Encadreur : Prof. KADEM Dhaou El Djabine	Université Frères Mentouri, Constantine 1.
Examineur 1 : Prof. SAHLI Lila	Université Frères Mentouri, Constantine 1
Examineur 2 : Dr. TOUATI Laid	Université Frères Mentouri, Constantine 1

Année universitaire
2021 - 2022

« La critique est aisée, mais l'art est difficile. »

Philippe Néricault

Je dédie ce travail

A mes parents qui m'ont soutenue et encouragée durant mes années d'études.

A Paul, qui a toujours été là pour moi dans les bons comme dans les moins bons moments.

A Zozo ma boule de poils partie trop tôt mais qui restera toujours dans mon cœur.

Maroua

Je dédie ce travail à :

*Mes parents, qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon égard,
de me soutenir et de m'épauler durant toute la période de mes études,*

*Mon grand-père Youcef, qui restera toujours dans mon cœur, que ce
travail soit le meilleur cadeau que je puisse t'offrir,*

*Mon fiancé, qui a partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la
réalisation de ce travail,*

Malak et Maha pour leurs aides et supports dans les moments difficiles,

Ma Bissa, mon petit bout de chou...

اللَّهُمَّ اُنْفَعْنِي بِمَا عَلَّمْتَنِي وَاُنْفَعْنِي فِي

فَاَلْحَمْدُ لِلَّهِ عَلَى حُسْنِ التَّمَامِ وَالنَّجَاتِ

Lyna

Remerciements

En préambule à ce rapport nous souhaitons exprimer toute notre reconnaissance à notre encadreur Monsieur Kadem D.E.D., qui sans son aide et le temps qu'il nous a consacré, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait jamais vu le jour.

Nous le remercions pour son soutien moral, sa patience et ses judicieux conseils qui ont alimenté notre réflexion.

Nos vifs remerciements s'adressent à tous les membres du jury : Madame Sahli L. et Monsieur Touati L. qui ont accepté d'examiner notre travail.

A tous les enseignants qui nous ont formées durant ces années d'études.

Table des matières

Introduction.....	1
Chapitre I : La transition énergétique et la transition numérique.....	5
I.1. La transition énergétique.....	5
I.1.1 les sources d'énergie.....	5
I.1.2 Historique.....	6
I.1.3 La transition énergétique définition.....	6
I.1.3.1 La transition énergétique un impératif.....	7
I.1.3.2 La transition énergétique et climat.....	7
I.1.3.3 La transition énergétique et écologie.....	7
I.1.3.4 La transition énergétique : santé et sécurité.....	8
I.1.3.5 Réduction des déchets.....	8
I.1.3.6 La transition énergétique pour la croissance verte.....	8
I.2. La transition numérique : définition.....	9
I.3 Les Interactions entre les transitions numérique et écologique.....	10
 Chapitre II : Métaux rares/terres rares.....	 12
Introduction.....	12
II.1 Terres rares découverte.....	13
II.2 Définitions : terres rares stratégiques et critiques : lourdes et légères.....	15
II.2.1 Terres rares (TR)	15
II.2.2 Terres rares légères.....	17
II.2.3 Terres rares lourdes.....	18
II.3 Métaux rares stratégiques.....	18
II.4 Métaux rares critiques.....	19
II.5 Les terres rares et risques de pénurie.....	20
II.6 Propriétés.....	20
II. 6.1 Propriétés physiques et chimiques de terres rares.....	20
II.7 Applications.....	22
II.7.1 TR en applications électroniques.....	23
II.7.2 TR en applications électriques.....	24
II.7.3 TR en industrie du verre.....	24

II.7.4 TR et catalyse.....	24
II.7.5 TR et métallurgie.....	25
II.7.6 TR en industrie nucléaire.....	25
II.7.7 TR et colorants.....	25
II.7.8 TR et la fabrication d'aimants.....	25
Autres applications.....	26
Chapitre III : Terres rares dans le monde.....	28
III.1. Répartition et production mondiale.....	28
III.2. Les grands pays producteurs des métaux rares.....	29
III. 2.1 La Chine Bayan Obo.....	29
III.2.2 Les Etats Unis : Mountain Pass.....	30
III.2.3 Australie : Mount Weld.....	31
III.2.4 Le Burundi Gakara Afrique.....	31
III.3. Terres rares en Algérie.....	31
Métaux rares dans d'autres pays.....	35
Chapitre IV : Impact de l'exploitation des terres rares sur l'environnement.....	38
IV.1 Les terres rares : une industrie particulièrement polluante.....	38
IV .1.1 Le paradoxe des terres rares.....	38
IV .1.1.1 Bayan Obo.....	38
IV 1.1.2 Sichuan.....	39
IV .1.1.3 Sud de la Chine.....	39
IV.2 impact environnemental du numérique.....	41
IV.3 Les acteurs de la pollution numérique.....	42
IV.3.1 Les datas center.....	42
IV.3.2 Les fabricants des équipements des utilisateurs.....	43
IV.3.3 Le cinéma à la maison.....	44
IV.3.4 Le réseau internet lui non plus n'est pas immatériel.....	44
IV.4 La pollution sous-marine.....	44
IV.5 Le like.....	45
IV.6 Le téléphone portable ou Smartphone : impact sur l'environnement.....	47

IV.7 La voiture électrique : l'impact environnemental.....	51
IV.7.1 Avantages des voitures électriques.....	51
IV.7.1.1 Pas de polluants de l'air et pas d'émissions de CO2.....	51
IV.7.1.2 Un bel avenir.....	52
IV.7.1.3 Silencieuse.....	52
IV.7.1.4 Economique a l'utilisation.....	52
IV.7.1.5 Peu d'entretien.....	52
IV.7.2 Inconvénients de la voiture électrique.....	53
IV.7.2.1 L'impact de ses batteries.....	53
IV.7.2.2 La recharge reste une contrainte.....	54
IV.7.2.3 Le temps de recharge et la disponibilité des bornes.....	54
IV.7.2.4 Elle coute cher à l'achat.....	54
Chapitre V : Les métaux rares au cœur des conflits commerciaux.....	56
V.1 Comment la chine a pris le contrôle du marché des TR.....	56
V.2 Comment expliquer la suprématie chinoise dans la production des TR ?	56
Chapitre VI : recyclage et substitution des terres rares.....	61
VI.1. Le recyclage pourquoi recycler.....	61
VI.1.1 Le recyclage sous conditions techniques et économiques.....	61
VI.1.2 Le recyclage une réalité économique.....	63
VI.1.3 Les raison peuvent être techniques.....	64
VI.1.4 Le recyclage à l'origine de la création de nouvelle filière dans l'éolien.....	64
VI.2. La substitution.....	66
Conclusion.....	68
Références bibliographiques.....	70
Annexes	

Liste des tableaux

Tab.1. Terres rares : symbole –origine du nom – année – et nom du découvreur.....	15
Tab.2. Liste des éléments : terres rares.....	17
Tab.3. Structure électronique des lanthanides.....	21
Tab.4. Réserves mondiales en oxydes de << terres rares>>.....	29
Tab.5. Pays producteurs de minerais stratégiques.....	36
Tab.6. Répartition des impacts du numérique mondial en 2019.....	43
Tab.7. Bilan énergie primaire (EP) due principalement à la production de l'électricité, puis des équipements utilisateurs (2019)	64
Tab.8. Bilan émissions de gaz à effets de serre due principalement à la fabrication des équipements puis à la production de l'électricité. (2019)	47

Liste des figures

Fig.1. Les Terres Rares dans le tableau de Mendeleïev en présentation classique compacte.....	16
Fig.2. Les Terres Rares dans le tableau de Mendeleïev en présentation développée.....	17
Fig.3. Réserves potentielles d'oxydes de Terres.....	28
Fig.4. Production mondiale de minerai de « terres rares » en 2008.....	29
Fig.5. Un projet d'un Data-center de dimension internationale à Bouira (Algérie).....	43
Fig.6. Constitution d'un câble optique.....	45

Introduction

Depuis que l'homme a découvert le feu, notre qualité de vie, quels que soient les critères utilisés pour la mesurer : espérance de vie, santé, richesse, niveau d'éducation, a progressé la main dans la main avec notre consommation d'énergie (Rich, 2019).

La consommation d'énergie avait toujours été proportionnelle à la croissance économique.

Pour l'économiste, c'est le moteur de l'activité et de la croissance.

C'est l'énergie qui permet à l'homme de se déplacer, de se chauffer, de transformer la matière, d'usiner le produit, etc.

« *Plus, on brûlait de combustibles fossiles, plus nos vies devenaient confortables, alors, pourquoi toucher à cela ?* » (Rich, 2019).

Certes, ces énergies ont amélioré la vie du citoyen, mais, paradoxalement, plus on en consomme plus on pollue notre environnement : gaz à effet de serre, réchauffement climatique ; trou d'ozone ; etc.

Un rapport sur le charbon¹ (Pomerance, 1983, in Rich, 2019) remis au président Reagan, établissant que les combustibles fossiles risquaient d'affecter « *de manière définitive et désastreuse* » l'atmosphère terrestre, ce qui conduirait à « *un réchauffement de la planète, avec probablement des effets très sérieux* ».

Ce qui fera dire à Bruno (2021) que : « *...le réchauffement climatique n'est plus une hypothèse, c'est un fait vérifiable par tous, aujourd'hui tout laisse à penser que nous sommes à l'aube d'une sixième extinction qui arrive à une vitesse foudroyante...* ».

Malgré ce constat, la consommation d'énergies fossiles n'a cessé d'augmenter.

Pour les décideurs politiques et économiques, il faut se sevrer de cette dépendance aux énergies fossiles à l'origine des bouleversements climatiques, et mettre au point de nouvelles ressources réputées plus efficaces, plus propres, et reliées à des réseaux à haute-tension ultra-performants : les éoliennes ; batteries électriques ; panneaux solaires, etc. (*les greens tech*).

Après la machine à vapeur, après le moteur thermique, ces technologies dites vertes engagent l'humanité dans une troisième révolution énergétique industrielle. Comme les deux précédentes celle-ci s'appuie sur une ressource primordiale. Une matière tellement vitale que les énergéticiens, les chefs d'Etat et même les stratèges militaires la surnomment « *the next oil* »

¹ Rapport gouvernemental EPA-600/7-78-019

De quelle ressource s'agit-il ?

Si le pétrole a été l'élément décisif de la géopolitique du 20^e siècle ; le 21^e siècle sera marqué par une nouvelle transition énergétique, couplée à une transition numérique, réputées dira-t-on plus propres, plus sobres, plus efficaces et neutres en carbone ; qualifiées de technologies vertes grâce à l'exploitation et la consommation de substances rocheuses nommées métaux rares.

Le 21^e siècle, dira Pitron (2019) sera d'abord et surtout un siècle du métal ; siècle des terres rares et du cuivre pour les voitures à nouvelle énergie et nombre d'éoliennes. Un siècle de graphite, d'étain et d'indium pour nos vies connectées. Un siècle de la guerre de l'énergie, ... de la guerre des métaux rares, des terres rares.

Dans le contexte de notre travail qui rentre dans le cadre d'un mémoire de master, notre problématique peut être ainsi formulée : "Quel est l'apport et la place des métaux rares dans la transition énergétique et numérique et leurs effets sur l'environnement" ?

La rareté de la documentation factuelle, ainsi que le temps disponible pour la réaliser ont conditionné le contenu.

Choix du thème

Plusieurs raisons ont guidé ce choix.

Des raisons personnelles : ce sujet s'inscrit dans une thématique répondant à nos ambitions et à notre formation d'écologue en cohérence avec la carrière que nous souhaitons. Un sujet à débat qui a éveillé notre curiosité en tant qu'écologiste et nous a poussé à nous approfondir encore plus sur ce thème afin de démontrer la vraie face cachée de cette transformation du système énergétique actuel.

D'autre part, ce choix est motivé par le fait que ces éléments considérés d'abord comme ésotériques, même au sein de la communauté scientifique, font actuellement l'actualité (presse écrite, audiovisuelle, tables rondes, discours politiques, stratégies économiques, campagnes électorales ; COPs, etc.).

Un thème de grande actualité qui intéresse aujourd'hui tous les acteurs de la vie économique et surtout politique.

Objectif

Notre objectif est d'apprendre un peu plus sur ces métaux et faire progresser la connaissance en explorant un domaine encore méconnu de la majorité du grand public mais représente un pas de géant en matière technologique.

Cette transition, qu'elle soit énergétique ou numérique, serait-elle la panacée en se substituant aux énergies fossiles et bannir toute forme de pollution engendrées par ces dernières ?

Méthode de travail : sources de données

Les difficultés inhérentes à ce travail ne se limitent pas à un manque de moyens mais plutôt à un frein imposé par la situation sanitaire (La covid-19) que traverse actuellement (ou qu'a traversé) le monde.

Ne pouvons se donner les moyens de le réaliser avec ambition et dans de bonnes conditions, La présente étude a été produite à partir d'investigations bibliographiques. Nous avons mené un travail très classique à partir de sources écrites (ouvrages universitaires, articles académiques, articles de la presse nationale, articles de la presse économique, rapports publics de l'United States Geological Survey (USGS), de nombreux auteurs ; livres et toute la panoplie littéraire disponible sur le *Web*.

En s'appuyant sur ces connaissances bibliographiques acquises nous espérons combler une lacune en apportant un éclaircissement quant à l'importance de ces métaux dans les transitions énergétique et numérique.

N'étant pas en mesure de garantir l'exactitude des informations et des données citées, l'industrie des Terres Rares n'est pas toujours transparente et les données disponibles peuvent être incomplètes et/ou sujettes à erreurs, intentionnelles ou non.

Pour finir et ne pouvant traiter de tous les aspects, vu les nombreuses implications de ces métaux dans différents secteurs tels que le high-tech (téléphonie, écrans, leds, batteries électriques, etc.), le raffinage du pétrole ou encore la production du verre ; nous nous sommes limitées à faire le point sur l'implication des métaux rares dans la transition des énergies renouvelables dites « vertes ».

Structure du mémoire

L'atteinte des objectifs du mémoire s'effectue via deux parties majeures, après l'introduction où nous présentons le contexte et la problématique de l'étude,

- ✓ la première partie : Généralités : composée de trois chapitres : le chapitre I définit la notion des transitions énergétique et numérique ; dans le chapitre II, il sera question de terres rares : leur découverte, leurs propriétés, leur utilité et leur importance dans la transition énergétique et numérique ; le chapitre III traitera de la répartition des TR dans le monde.
- ✓ La deuxième partie : Les effets de la transition énergétique et numérique sur l'environnement, abordera deux exemples de l'implication des métaux rares, vecteurs des énergies nouvelles :
 - cas de la voiture électrique, considérée comme un véhicule zéro émission,

- leur implication dans la transition numérique : l'effet du numérique sur l'environnement (exemple du téléphone portable).

Enfin, nous clôturons cette synthèse bibliographique par une conclusion et des recommandations quant au rôle et l'importance des métaux rares et leur impact sur l'environnement.

Remarque : il a été arbitrairement convenu d'écrire (parfois) Terres Rares (TR) et Métaux rares (MR)

Chap. I La transition énergétique – La transition numérique

Introduction

Depuis la nuit des temps, les sociétés humaines n'ont cessé de vouloir transformer les nombreuses sources d'énergie naturelles (éolienne, thermique, solaire...) en énergie mécanique.

Aujourd'hui, l'humanité, ayant pris conscience des externalités négatives, conséquences d'une consommation accrue de charbon, pétrole et gaz, se pose la question de savoir par quelle ressource remplacer ces énergies fossiles traditionnelles, responsables en partie du réchauffement climatique et ses conséquences sur la biodiversité (pollution sous toutes ses formes : trou d'ozone ; déforestation ; etc.) ?

Pour Pitron (2019), à la question de savoir par quelle ressource remplacer le pétrole et le charbon pour embrasser un nouveau monde plus vert, personne ne sait vraiment quoi répondre. Il dira, «...au XXI^e siècle nous ne savons même pas qu'un monde plus durable dépend en très grande partie de substances rocheuses nommées métaux rares».

Ce n'est, depuis les années 1970 que les hommes ont commencé à tirer parti de ces métaux rares, formant un sous-ensemble d'une trentaine de matières premières dont le point commun est d'être souvent associés dans la nature aux métaux les plus abondants (Pitron, 2019).

1. La transition énergétique

1.1. Les sources d'énergie

Une source d'énergie est une source à partir de laquelle l'énergie exploitable peut être extraite ou récupérée, soit directement, soit au moyen d'un processus de conversion ou de transformation.

Selon Rich (2019), il en existe deux types :

- ✓ **les énergies primaires** : utilisées directement, telles qu'elles apparaissent dans l'environnement naturel et comprennent les combustibles fossiles (pétroles, gaz naturel et charbon), l'uranium, le vent, l'eau courante, la biomasse et l'énergie radiante du soleil ;
- ✓ **les énergies secondaires** : elles dérivent de la transformation des sources d'énergie primaires pour produire une forme d'énergie secondaire à l'utilisation plus pratique et incluent l'essence et carburants liquides, les biocarburants raffinés, l'électricité, l'hydrogène et la chaleur.

1.2. Historique.

Evolution de la transition énergétique au fil des siècles : du feu aux métaux rares

Pendant quatre cent mille ans, l'humanité n'a connu que le feu, l'impétuosité des vents et des torrents, son ardeur au travail et celle de ses cavaleries pour voyager. L'histoire a souvent avancé à petits pas (Pitron, 2019).

Ainsi le XIX^e siècle voit l'arrivée de la première transition énergétique de l'histoire : l'invention de la machine à vapeur, cette transition se fondait sur l'exploitation d'un combustible fossile, le charbon.

Le XX^e siècle, une autre innovation a vu le jour : le moteur à combustion interne également appelé moteur à essence. Cette technologie a permis d'accroître la puissance des véhicules, des bateaux, des chars et de nouveaux engins : les avions. C'est la deuxième transition énergétique fondée sur l'extraction d'une autre ressource fossile : le pétrole. (Pitron, 2019).

Le XXI^e siècle inaugure la troisième révolution énergétique, industrielle, qui vient se substituer aux énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz) pour embrasser (semble-t-il) un nouveau monde plus vert, plus durable.

Comme les deux précédentes celle-ci s'appuie sur une ressource que les énergéticiens, les chefs d'Etats et même les stratèges militaires surnomment « *the next oil* », le pétrole du XXI^e siècle, il s'agit d'une multitude de métaux rares, contenus, dans de faibles proportions dans les roches terrestres dans des proportions bien moindres et dotées de fabuleuses propriétés magnétiques, catalytiques et optiques.

1.3. La transition énergétique définition.

La transition énergétique ou transition écologique possède plusieurs définitions.

- ✓ C'est le passage d'une civilisation humaine construite sur une énergie essentiellement fossile, polluante, abondante, et peu cher, à une civilisation où l'énergie est renouvelable, rare, chère, et sûrement moins polluante.
- ✓ C'est l'ensemble des transformations du système de production, de distribution et de consommation d'énergie effectué sur un territoire dans le but de le rendre plus écologique.
- ✓ C'est un ensemble de politiques énergétiques modifiant structurellement les modes de production et de consommation d'énergie, avec un objectif : lutter contre le réchauffement climatique, et limiter les émissions de CO₂ dans l'atmosphère.

En conclusion, la transition énergétique implique donc une optimisation de l'utilisation quotidienne d'énergie, une diminution drastique des combustibles fossiles au profit des énergies

renouvelables, et un changement des modes de vie, plus écologiques et respectueux de l'environnement.

Elle a pour but de transformer en profondeur les systèmes de production, de distribution et de consommation d'énergies pour en réduire l'impact environnemental et favoriser un modèle énergétique plus durable.

Elle est en cela partie prenante des stratégies de développement durable et de lutte contre le réchauffement climatique.

1.3.1. La transition énergétique : un impératif

La transition énergétique est devenue un sujet politique important pour de nombreuses raisons. Parmi ces raisons on peut notamment citer : les problèmes écologiques et notamment climatiques, les questions de santé publiques ou encore la question du prix de l'énergie et de la croissance économique.

1.3.2. La transition énergétique et climat

L'un des objectifs les plus fondamentaux de la transition énergétique est de lutter contre le réchauffement climatique. En effet, à l'heure actuelle, le réchauffement climatique est l'une des plus grandes inquiétudes. Le réchauffement climatique a déjà des conséquences sur la météo, en transformant les écosystèmes atmosphériques. Il a des conséquences sur l'économie car les modifications du climat affectent les activités humaines.

Les conséquences du changement climatique se font aussi sentir sur l'agriculture. Et le principal responsable de cette situation, c'est le CO₂ que les activités humaines émettent dans l'atmosphère

Or une grande partie du CO₂ que nous émettons provient de l'énergie que nous consommons. En effet, produire de l'électricité pour consommer du pétrole émet beaucoup de CO₂. Pour réduire ces émissions, il est donc nécessaire de changer notre modèle de production électrique. On sait par exemple que les énergies renouvelables comme le solaire ou l'éolien, ou même les énergies hydrauliques émettent moins de CO₂ que les centrales à charbon ou à gaz.

Le nucléaire est également une énergie qui émet peu de CO₂.

En faisant une transition énergétique (l'exploitation des métaux rares) on espère donc réduire notre impact sur le climat, sur les nouvelles mobilités (véhicules électriques), la téléphonie...

1.3.3. La transition énergétique et écologie

La transition énergétique, utilisant les métaux rares, vise aussi à réduire notre impact écologique global. Par exemple en réduisant la pollution.

Notre énergie ne produit pas que du CO₂. Les centrales de production d'électricité au charbon par exemple émettent des particules fines, tandis que les centrales nucléaires produisent des déchets nucléaires et consomment beaucoup d'eau. Les centrales à gaz, émettent du méthane.

Globalement, la production d'énergie pollue et utilise beaucoup de ressources. Même les énergies renouvelables nécessitent beaucoup de ressources émettent des polluants.

En changeant notre façon de produire et de consommer de l'énergie, on peut réduire ces pollutions et cette consommation de ressources. C'est pourquoi la transition énergétique est souvent qualifiée de « transition énergétique et écologique », car elle permet de réduire notre impact sur l'environnement.

1.3.4. La transition énergétique : santé et sécurité

La transition énergétique a aussi un objectif sanitaire. On sait que la pollution de l'air a des conséquences sur notre santé, notamment sur notre santé pulmonaire. La pollution affecte aussi notre cerveau, ainsi que notre risque de développer des maladies ou des cancers. Réduire la pollution, en utilisant comme nouvelle ressource (les métaux rares) c'est donc améliorer notre santé.

Mais c'est aussi une question de sûreté. Les centrales thermiques et le nucléaire peuvent être assez dangereux pour les communautés, notamment en cas d'accident (Tchernobyl, Fukushima). C'est pourquoi certains estiment qu'il est plus sûr d'effectuer une transition énergétique, notamment vers des énergies renouvelables et décentralisées.

1.3.5. La transition énergétique et la réduction des déchets

En matière de déchets, la transition énergétique a aussi un rôle à jouer. D'abord, car elle permettrait à terme de réduire les déchets issus des productions d'énergie fossiles et nucléaires. Mais aussi, car elle permet de mieux valoriser certains types de déchets qui aujourd'hui sont jetés ou gaspillés. Par exemple, les déchets ménagers compostables peuvent être valorisés dans le cadre de programmes de biométhanisation ou d'incinération, où ils servent à produire de l'électricité, de la chaleur ou de l'énergie.

1.3.6. La transition énergétique pour la « croissance verte »

Certains partisans de la transition énergétique estiment qu'elle serait à terme un moyen de relancer la croissance. En effet, les énergies fossiles sont de plus en plus chères globalement, car exploiter les gisements de pétrole ou de gaz devient plus compliqué au fur et à mesure que les réserves s'épuisent. Et puis elles coûtent beaucoup d'argent à cause de leurs conséquences

environnementales. Or une énergie chère est un frein à la croissance. En faisant la transition vers des formes d'énergie plus accessibles comme le renouvelable, il serait en théorie possible de relancer la croissance. Cette transition permettrait également de créer de nombreux emplois dans des secteurs nouveaux et sur de nouvelles technologies.

Cependant, d'autres estiment que la transition énergétique doit au contraire être une opportunité pour faire une transition vers la décroissance et la réduction de la consommation.

La croissance étant généralement liée à la croissance de la consommation énergétique, il peut en effet apparaître contradictoire l'idée de faire une transition énergétique tout en poursuivant des objectifs de croissance économique.

2. La transition numérique : définition

La transition numérique, appelée aussi transformation digitale ou e-transformation, correspond à une transformation induite initialement par les progrès combinés de l'électronique et de l'informatique, et plus tard, par ceux des télécommunications.

Phénomène de mutation lié à l'essor du numérique et d'Internet. Cette notion vise à conceptualiser l'influence de ceux-ci sur les organisations (Geoffron, 2017).

Depuis environ vingt ans, avec l'arrivée d'Internet, le numérique transforme notre vie quotidienne et nos modes d'accès à l'information. Peu à peu, il bouscule les positions acquises dans plusieurs secteurs économiques, comme la distribution, les loisirs, les transports ou le tourisme. (Geoffron, 2017).

Concrètement, la transformation numérique facilite une communication en temps réel ; la mobilité par la suppression des contraintes géographiques, une connaissance sans précédent des attentes des clients et du marché grâce aux données.

La transition numérique participe donc à la révolution de la gestion de l'information, notamment en termes de réactivité et d'importance de flux.

Plus précisément, la transition – ou révolution – numérique entraînera, selon France Stratégie, des transformations en profondeur de nos organisations économiques et sociales, avec des structures de production plus fluides et éclatées :

- la capacité à traiter une masse croissante d'informations va permettre une personnalisation accrue des offres de biens et services, même dans l'industrie ;
- le travail collaboratif, en dehors du cadre classique de production, est amené à se développer ;
- la technologie numérique jouera un rôle important dans la transition écologique, notamment en accompagnant l'économie collaborative ou l'économie circulaire ».

3. Les interactions entre les transitions numérique et écologique

Les transitions énergétique et numérique sont deux transformations majeures en cours. Cependant, une différence fondamentale les distingue : la transition énergétique nous emmène vers un but souhaitable, à savoir une économie et une société bas carbone. La transition numérique est, quant à elle, un outil, un moyen, qui doit être mis au service d'objectifs supérieurs, que ceux-ci soient économiques, sociaux ou environnementaux (Michel et Meheu, 2017).

Les développements récents des technologies, des politiques publiques et des initiatives privées montrent, au plan international autant qu'aux plans national et local, que la conjugaison de ces deux transitions nous offre des opportunités formidables, en particulier à travers la mobilisation et la participation de tous les acteurs : entreprises, État et collectivités territoriales, citoyens et associations.

Le numérique fournit ainsi de nouvelles possibilités à tous ces acteurs par un accès démultiplié et en temps réel à une grande masse de données, et par l'émergence de modèles plus interactifs, plus flexibles et plus décentralisés.

La transition écologique et transition numérique ont un point commun, elles décrivent toutes deux un processus de transformation au cours duquel on passe d'un régime d'équilibre à un autre (Bourg et Papaux, 2015 in Laurence. 2017).

S'agissant de l'environnement, le numérique apporte de nombreuses améliorations à sa protection, grâce à une connaissance de plus en plus fine des phénomènes en cause (données, observation, métrologie, modélisation...).

À court ou moyen terme, le numérique va faciliter la transition énergétique en améliorant l'efficacité des installations, des équipements (tant au niveau de la consommation que de la production) et des systèmes.

Son essor permet notamment de transformer la relation entre clients et fournisseurs d'énergie et il intervient opportunément pour soutenir le développement de l'éolien et du photovoltaïque de façon à mieux les intégrer aux réseaux électriques et faire face à l'intermittence de ces énergies renouvelables.

Pour les transports, le numérique est déterminant, par exemple, dans la gestion des bornes de recharge ou des batteries des véhicules électriques. Dans tous les secteurs, il permet de proposer de nouveaux services ou concepts (par exemple, des compteurs communicants/intelligents) dans la relation entre clients et fournisseurs d'énergie : smart grids, smart cities, open data, gestion dynamique de la demande d'énergie,

A la différence de la transition numérique, la transition énergétique n'est pas impulsée par le progrès technique, mais par la nécessité de transformer un modèle de croissance, qui, en vigueur depuis deux siècles, est excessivement producteur d'externalités négatives, tout particulièrement en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de dégradation de la qualité de l'air, de l'eau, de la biodiversité... Les technologies mises «en examen» ne sont toutefois pas frappées d'obsolescence : les centrales à charbon restent performantes pour produire de l'électricité, les véhicules thermiques offrent un service de transport également efficace... Mais l'utilisation de ces dispositifs techniques n'est pas soutenable à moyen ou long terme, d'où la nécessité d'une transition promouvant des technologies de substitution plus respectueuses de l'environnement (Geoffron, 2017)

Il ne fait pas de doute que la numérisation est une condition de la réalisation de la transition énergétique. La complexification des systèmes électriques par l'insertion massive de moyens de production décentralisés (éolien, photovoltaïque, biogaz...), par l'adjonction progressive de capacités de stockage, par le besoin de flexibilisation de la demande, par le développement de nouveaux usages (véhicules électriques, en particulier), requiert des moyens de pilotage faisant très largement appel aux technologies relevant du numérique.

Nous avons là deux transitions ne convergeant pas naturellement, mais présentant un large espace de convergences (Geoffron, 2017).

Chacune des deux transitions a besoin l'une de l'autre. Le numérique accompagne et décuple les effets des *green tech*. Cette convergence amorce une ère d'abondance énergétique, stimule de nouvelles filières industrielles et a déjà créé dix millions d'emplois à travers le monde (Pitron, 2019).

Chap. II Métaux rares / terres rares

Introduction

Que sont ces « métaux rares » devenus aujourd’hui des éléments essentiels de notre vie quotidienne ; considérés comme le moteur d’une nouvelle révolution industrielle ? (Perrier 2011) Il s’agit de métaux associés aux métaux abondants (fer ; cuivre ; zinc ; aluminium ; plomb) mélangés à eux dans l’écorce terrestre, mais présents dans des proportions souvent infimes ; (Pitron, 2019).

C’est grâce à la théorie quantique qu’on a pu les dénombrer et les identifier. Il en résulte qu’il y a dans la classification périodique dix-sept éléments qui sont appelés terres rares (Tableau 1).

Contrairement à ce que suggère leur appellation, ils ne sont pas des « terres » mais plutôt des métaux et ils ne sont pas « rares » car ils sont assez répandus dans l’écorce terrestre à l’égal des métaux usuels (or, argent, cuivre...).

Ils sont présents dans la nature sous forme de minéraux d’aspects terreux. Ils s’y retrouvent en quantité plus abondante que le plomb, et que l’argent mais ils sont rarement trouvés dans des concentrations rentables à exploiter (ils demeurent dilués dans la croûte terrestre). (USGS 2019).

Le mot « terres » était le nom donné par les chimistes aux oxydes métalliques supposés être des corps simples. L’épithète « rares » rappelle les difficultés rencontrées par les chimistes pour les isoler et leur concentration supposée faible dans les minerais.

Elles sont très réactives, ce qui fait qu’on ne les trouve jamais à l’état pur et que leurs minerais sont difficiles à raffiner.

Ils ne sont pas très connus, mais ils intéressent les chercheurs autant que les industriels ; les politiques. Au départ peu utilisé par l’industrie, sont aujourd’hui des métaux stratégiques, sorte de vitamines pour les technologies numériques et vertes (Bru et *al.*, 2015 ; Dushyantha et *al.*, 2020 ; Blengini et *al.*, 2020 ; in Charles et *al.*, 2021).

Ces matériaux ont même acquis le titre de “ressources stratégiques” pour de nombreux gouvernements, comme le pétrole, l’or ou l’uranium (Pitron, 2019).

La question qu’on s’est posée est : d’où vient cet intérêt ? Pour le saisir, il faut savoir que sont ces métaux rares, leur découverte, leurs propriétés, leur utilité ; etc., et leur-importance dans la transition énergétique et numérique, leur impact sur l’environnement ?

C’est ce que nous essayons de relater dans ce chapitre II.

1. Terres rares : découverte

Leur nom vient du fait qu'on les a découvertes dans des minerais (d'où le nom de « terres », utilisé à l'époque en français, langue des échanges internationaux, pour les oxydes), peu courants à cette époque ; terres rares signifiait donc « minerais rares ».

Ce sont des éléments découverts tardivement. C'est le Suédois, Carl Axel Arrhenius, qui découvre le premier une terre rare dans une carrière près de Stockholm, en 1787 (Hetzl et Bataille ; 2016 ; Pitron, 2019).

Carl Axel Arrhenius, chimiste suédois décrit pour la première fois un minéral noir et dense dans les pegmatites d'Ytterby. Envoyé pour analyse au chimiste finlandais Johan Gadolin, ce dernier découvrira en 1794 une nouvelle « terre » contenue dans ce minéral, l'yttria, qui donnera son nom à l'ytterbite, connue depuis sous le nom gadolinite.

Cependant, un minéral rougeâtre a été découvert plus tôt, en 1751, par le minéralogiste suédois Axel Fredrik Cronstedt dans la mine de cuivre de Bastnäs. Ce n'est qu'en 1803 que les chimistes suédois Jöns Jakob Berzelius et Wilhelm Hisinger isolent une nouvelle « terre » aux propriétés proches de l'yttria. Cette nouvelle terre est nommée « ceria », en référence à l'astéroïde Cérès tout juste découvert, et donnera son nom au minéral bastnäsite.

Tout au long du XIXe siècle, différents chimistes découvrent que les quelques terres isolées précédemment contiennent en fait plusieurs autres éléments chimiques aux propriétés proches. Par exemple, Carl Gustaf Mosander découvre en 1839 que l'oxyde de cérium est aussi composé d'un oxyde d'un autre élément qu'il nommera lanthane (du grec *lanthano*, être caché).

En 1843, il découvre que l'ytterbium est en fait un mélange contenant deux autres éléments, le terbium et l'erbium. Le dernier élément de TR, le lutétium, est découvert en 1907. Enfin, il est à noter que le prométhium n'étant pas un élément stable est découvert en 1947 dans les produits de fission de l'uranium du réacteur d'Oak Ridge (États-Unis).

Les TR ont donc été découvertes par séparation progressive, certaines à partir du cérium (terres cériques), les autres à partir de l'yttrium (terres yttriques).

Elles sont, la plupart du temps, présentes simultanément dans quatre environnements géologiques : les carbonatites ; les systèmes ignés alcalins, les gisements d'argiles latéritiques (adsorption ionique) et les gisements de placers contenant des minerais tels que la bastnäsite, la monazite, la loparite (niobiotitanate), l'apatite, le xénotime (orthophosphate) (USGS 2019).

Parmi les dix-sept éléments du tableau périodique (annexe I) deux sont particuliers : le scandium et l'yttrium qui ne sont pas des lanthanides. Contrairement aux quinze autres, scandium et yttrium ne sont pas trouvés dans les mêmes gisements et les lanthanides ont quelques propriétés distinctes.

À noter que le gadolinium sera identifié dans les deux types de terres.

Par ordre de découverte :

Y (1794), Ce (1803), La (1839), Er (1843), Tb (1843), Sc (1876), Yb (1878), Ho (1879), Sm (1879), Tm (1879), Gd (1880), Nd (1885), Pr (1885), Dy (1886), Eu (1901), Lu (1907) et Pm (1947). (Charles et *al.* ; 2021) (Tableau 1).

Tableau 1-Terres rares : symbole –origine du nom – année – et nom du découvreur

Nom	Symbole	Origine du nom	Année	Découvreur(s)
Cérium	Ce	Du nom de l'astéroïde Cérés	1803 1803	Klaproth Berzelius et Hisinger
Dysprosium	Dy	Du grec dysprositos, « difficile à atteindre »	1886	Lecoq deboisbaudran
Erbium	Er	D'Ytterby (Suède), lieu de l'extraction du premier minerai	1842	Mosander
Europium	Eu	De Europe	1890 1880	Lecoq deboisbaudran Demarçay
Gadolinium	Gd	Du nom de Johann Gadolin	1880	Lecoq deboisbaudran Martignac
Holmium	Ho	De la dernière syllabe de Stockholm	1878 1878	Delafontaine et Soret Clève
Lanthane	La	Du grec lanthanos « caché »	1839	Mosander
Lutécium	Lu	De l'ancien nom de Paris	1907 1907	Urbain Von Welsbach
Néodyme	Nd	Du grec, neos, « nouveau et didyme, jumeaux »	1885	Von Welsbach
Praséodyme	Pr	Du grec prasios, vert et didyme « jumeaux »	1885	Von Welsbach
Prométhium	Pm	Du nom Prométhée	1947	Marinsky, Glendenin et Coryell
Samarium	Sm	Du nom du minéral samarskite, lui-même provenant du nom du colonel Samarsky	1879	Lecoq deboisbaudran
Scandium	Sc	De Scandia pour Scandinavie	1879	Nielson
Terbium	Tb	De Ytterby (Suède), lieu de l'extraction du premier minerai contenant des terres rares	1842	Mosander
Thulium	Tm	De Thulé ancien nom de Scandinavie	1879	Clève
Ytterbium	Yb	De Ytterby (Suède), lieu de l'extraction du premier minerai (contenant des terres rares)	1978	Martignac
Yttrium	Y	De Ytterby (Suède), lieu de l'extraction du premier minerai contenant des terres rares	1794 1797	Gadolin Ekeberg

Source : Encyclopædia 2022 France

2. Définitions : terres rares, stratégiques et critiques / lourdes et légères

2.1. Terres rares (TR)

« Terres Rares » est un nom collectif donné, pour des raisons historiques et pratiques, à un ensemble de 15 à 17 éléments métalliques du tableau périodique de Mendeleïev (Annexe I).

Ils sont moins connus que les autres éléments du tableau périodique de Mendeleïev.

Figure 2 - Les Terres Rares dans le tableau de Mendeleïev en présentation développée

2.2. Terres rares légères

Dans la classification périodique de Mendeleïev, les terres rares légères sont le lanthane, le cérium, le praséodyme, le néodyme et le samarium (Tableau 2).

Les gisements de terres légères sont très nombreux, parfois très importants. Les carbonatites et les dépôts de placers sont les principales sources de production d'éléments de terres rares légères. Ils sont répartis dans un grand nombre de pays (Annexe I).

Tableau 2 – Liste des éléments : terres rares
(Les 15 lanthanides + scandium et yttrium)

Élément	Numéro atomique	Symbole	Masse atomique
Scandium	21	Sc	44.96
Yttrium	39	Y	88.90
Groupe cérique : terres légères			
Lanthane	57	La	138.91
Cérium	58	Ce	140.12
Praséodyme	59	Pr	140.91
Néodyme	60	Nd	144.24
Prométhium	61	Pm	(145)
Samarium	62	Sm	150.35
Groupe yttrique : terres lourdes			
Europium	63	Eu	151.96
Gadolinium	64	Gd	157.25
Terbium	65	Tb	158.92
Dysprosium	66	Dy	162.50
Holmium	67	Ho	164.93
Erbium	68	Er	167.26
Thulium	69	Tm	168.93
Ytterbium	70	Yb	173.04
Lutécium	71	Lu	174.97

Source : Encyclopædia 2022 France

2.3. Les terres rares lourdes

Les argiles à adsorption ionique sont la principale source de production d'éléments lourds de terres rares.

Au nombre de dix, ce sont : l'euporium, le gadolinium, le terbium, le dysprosium, l'erbium, l'yttrium, l'holmium, le thulium, l'ytterbium et le lutécium (Tableau 2).

Dans la mine, ces éléments sont trouvés à faible concentration sous forme d'oxydes. On trouve toujours des terres rares lourdes dans les gisements de terres rares légères et réciproquement.

Les gisements de terres lourdes sont rares et de petite taille. Il en découle que les terres lourdes représentent un enjeu très important, d'où leur prix plus élevé.

Les terres rares légères sont moins critiques que les terres rares lourdes car ces dernières sont produites quasi-exclusivement en Chine (Hetzl et Bataille ; 2016).

La terre rare (légère) la plus abondante est le cérium (il y en a presque autant que du cuivre).

Christian Hocquard, (in Braux *et al.*, 2012), considère indispensable cette distinction entre terres rares légères et lourdes, et souligne l'importance pour les terres rares légères du cérium et du lanthane, et pour les terres rares lourdes, du terbium, de l'euporium et du dysprosium).

Roland Masse (in Braux *et al.*, 2012), toxicologue, membre de l'Académie des technologies et de l'Académie de médecine, illustre ainsi leurs différences du point de vue d'un toxicologue : « *Les terres rares lourdes se fixent plus dans l'os, alors que les terres rares légères se fixent dans le foie, cette particularité étant associée quantitativement au diamètre ionique* ».

2.4. Métaux rares stratégiques

Un métal est stratégique quand il est indispensable à la politique économique d'un Etat (sécurité, défense, politique énergétique, etc.). De la même façon, il peut aussi être question de métal stratégique pour une entreprise ou une filière (ex. : aéronautique, défense, automobile, électronique et TIC, EnR, nucléaire...). (Une cinquantaine de métaux sont considérés comme stratégiques) (Annexe).

Aujourd'hui, les terres rares (les 17 métaux) qualifiées également de « métaux stratégiques », et de « minéraux critiques » font l'objet d'une attention particulière voire une inquiétude de la part des hommes politiques. Ces deux dernières années les métaux rares ont occupé l'agenda politique (Pitron, 2019).

Un métal stratégique se caractérise par quatre critères :

- ✓ **quantitatif** : les volumes de production des métaux stratégiques sont faibles comparés à ceux des métaux dits majeurs, comme l'acier ou le cuivre ;
- ✓ **technique** : les métaux stratégiques ne sont généralement pas des matières premières qui peuvent être extraites de mines (à l'exception des terres rares). Il s'agit essentiellement de sous-produits de l'industrie métallurgique, obtenus grâce à des techniques de pointe ;
- ✓ **économique** : à l'échelle de la planète, les cours des métaux stratégiques, généralement très élevés, peuvent connaître d'importantes fluctuations entraînant des crises et des pénuries ;
- ✓ **importance critique** : les métaux stratégiques sont en effet indispensables à l'industrie et au high tech.

2.5. Métaux rares critiques

On parle de métal critique quand une difficulté d'approvisionnement de ce métal peut entraîner des impacts industriels ou économiques négatifs.

Pour l'US National Research Council et la Commission européenne, un métal ou un minéral est critique lorsqu'il est « *à la fois essentiel dans son usage et sujet à d'éventuelles restrictions d'approvisionnement* ».

Dans la plupart des travaux internationaux, la criticité d'un métal (comme de toute substance minérale) est appréciée selon deux axes :

- les risques pesant sur l'approvisionnement (risques géologiques, techniques, géographiques, économiques, géopolitiques) ;
- et l'importance économique qui reflète la vulnérabilité de l'économie à une éventuelle pénurie, voire à une rupture d'approvisionnement, se traduisant par une envolée des cours (Barreau *et al.*, 2013).

La crise des terres rares de 2010-2011 a révélé leur criticité.

Pour Perraud (2019) : « *Les métaux critiques sont des métaux auxquels sont associées des tensions sur les approvisionnements, tant sur l'offre que sur la demande* ».

Selon France Stratégie, c'est « *un métal dont la chaîne d'approvisionnement est menacée et pour lequel une restriction d'approvisionnement serait néfaste à l'économie d'un pays* ».

3. Les terres rares et risques de pénurie

Les spécialistes alertent sur les risques de pénurie :

- ✓ d'une part, l'explosion de la demande mondiale en métaux entraîne un épuisement des gisements, ce qui a un impact direct sur la production des métaux stratégiques ;
- ✓ d'autre part, la demande en métaux stratégiques devrait exploser dans les années à venir. Selon une étude de l'institut McKinsey, il y aura, d'ici 2030, trois milliards de nouveaux consommateurs dans les classes moyennes, à l'échelle de la planète. En d'autres termes, trois milliards de nouveaux consommateurs qui auront besoin de smartphones, tablettes et autres produits high tech contenant des métaux stratégiques. Or, les métaux stratégiques ne sont pas une ressource inépuisable, certains spécialistes estiment en effet que les réserves de minerais renfermant des métaux stratégiques pourraient être épuisées d'ici quelques dizaines d'années.

4. Propriétés

Les TR possèdent certaines propriétés chimiques et physiques qui les rendent indispensables au fonctionnement de nombreuses applications de haute technologie. Elles sont largement reconnues comme étant parmi les minéraux d'importance stratégique pour la poursuite du développement d'une société technologique moderne.

Parmi les propriétés de TR, on retrouve leur haute conductivité thermique et électrique, le magnétisme, la luminosité, ainsi que leur propriétés catalytiques et optiques (Pitron, 2019).

Ce sont des métaux possédant des caractéristiques économiques et géologiques particulières :

- ✓ « technologiques » puisqu'ils sont principalement utilisés dans les nouvelles technologies appliquées à l'électronique, la défense et la transition énergétique ;
- ✓ une certaine rareté, car ce sont des métaux dont la production est faible en comparaison des métaux dits « de base » que sont le fer, l'aluminium ou le cuivre.

A titre de comparaison, presque deux milliards de tonnes de fer ont été produites en 2016 contre seulement 25550 tonnes de béryllium (Réf).

Au niveau géologique, ce sont des co-produits, c'est-à-dire qu'ils sont récupérés conjointement à d'autres minéraux parfois plus importants en termes économiques.

Propriétés physiques et chimiques des terres rares

Les TR possèdent des propriétés physicochimiques très recherchées

Elles sont essentiellement caractérisées par la présence de sous couches insaturées $5d^1$ et $4f$ et d'une sous couche $6s^2$ (tableau)

L'existence de la couche $4f$ non saturée confère aux lanthanides des propriétés magnétiques et optiques remarquables : moments magnétiques très élevés, en particulier pour Tb, Dy, Ho, Er, spectre d'absorption et d'émission à bandes fines, etc.

Ces propriétés sont à l'origine de nombreuses applications en particulier en électronique (luminescence, magnétisme). (Lévêque et Maestro, 1993) associée à la sous-couche électronique $4f$. (Lucas et al., 2015). Les TR sous forme métallique neutre ont des rayons atomiques assez proches, sauf l'euporium et l'ytterbium dont le rayon atomique plus grand explique leur plus faible densité. Leurs duretés sont variables passant de tendre (La, Nd, Yb) à dur (Ho, Er, Lu).

Tab.3 Structure électronique des lanthanides

Lanthanide	Structure électronique	Ln^{3+}
Lanthane	$[\text{Xe}] 5d^1 6s^2$	$[\text{Xe}]$
Cérium	$[\text{Xe}] 4f^1 5d^1 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^1$
Praséodyme	$[\text{Xe}] 4f^3 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^2$
Néodyme	$[\text{Xe}] 4f^4 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^3$
Prométhium	$[\text{Xe}] 4f^5 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^4$
Samarium	$[\text{Xe}] 4f^6 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^5$
Euporium	$[\text{Xe}] 4f^7 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^6$
Gadolinium	$[\text{Xe}] 4f^7 5d^1 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^7$
Terbium	$[\text{Xe}] 4f^9 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^8$
Dysprosium	$[\text{Xe}] 4f^{10} 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^9$
Holmium	$[\text{Xe}] 4f^{11} 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^{10}$
Erbium	$[\text{Xe}] 4f^{12} 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^{11}$
Thulium	$[\text{Xe}] 4f^{13} 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^{12}$
Ytterbium	$[\text{Xe}] 4f^{14} 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^{13}$
Lutécium	$[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^1 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^{14}$

Les TR sont moyennement fusibles, leurs températures de fusion s'échelonnant entre 799°C (Ce) et $1\ 663^\circ\text{C}$ (Lu). Les propriétés spectrales des TR sont les plus remarquables tant en absorption (coloration) qu'en émission (luminescence) justifiant leur utilisation courante dans les luminophores et les lasers. C'est le degré de mobilité des électrons dans les niveaux d'énergie des atomes qui est à la base de cette propriété. Soumis à de puissants rayons (ex. rayons UV), un atome de TR entouré de ligands (oxyde ou molécule) va s'exciter électroniquement et la désexcitation de l'atome de TR se traduira par l'émission de lumière avec des pics d'émission de longueurs d'onde spécifiques selon l'élément de TR (ex. Y et Eu : rouge et bleu ; Tb et Tm : vert, Ce : jaune). L'autre propriété physique remarquable de certaines TR est leur magnétisme à l'origine de leur utilisation pour la confection d'aimants permanents de haute performance (aimantation et rémanence élevées).

Les TR couplées à des éléments de transition (Fe, Co) permettent la confection des aimants les plus coercitifs fabriqués à l'échelle industrielle (Sm-Co, Nd-Fe-B).

Du point de vue chimique, les TR sont des métaux réducteurs (propriété désoxydante et désulfurante). La plupart s'oxyde assez rapidement à l'air et à température ambiante en quelques jours à quelques mois (Eu, La, Ce, Pr, Nd).

Les HTR résistent plusieurs années à l'oxydation (Y, Dy, Ho, Er). Broyé finement, le Ce allié au Fe (ferrocérium) brûle à l'air. C'est l'une des premières applications des TR avec les pierres à briquet constituées de ferrocérium.

Dans les minéraux, les TR sont sous forme de cation trivalent. Bien que le rayon ionique varie d'une terre rare à l'autre, leurs propriétés chimiques demeurent remarquablement homogènes, notamment en solution.

Bien que de nombreuses substitutions entre TR se produisent au sein du réseau cristallin des minéraux, certaines espèces minérales sont plus adaptées et plus favorables à accueillir une gamme de rayons ioniques. C'est le cas des minéraux de « terres cériques », plus enclins à incorporer Ce, La, Nd, Pr, (Sm), (Eu) et (Gd) comme la monazite et la bastnäsité.

D'autres minéraux dits « terres yttriques » sont plus favorables à Y, Tb, Dy comme le xénotime et la gadolinite.

Les propriétés physiques des terres rares étant variées et des plus intéressantes (hautes conductivités thermique et électrique, magnétisme, luminosité, propriétés catalytiques et optiques), on les utilise dans une grande variété d'objets de tous les jours.

Sous forme élémentaire, les terres rares ont un aspect métallique et sont assez tendres, malléables et ductiles. Elles sont aussi généralement chimiquement assez réactives, surtout à températures élevées ou lorsqu'elles sont finement divisées.

À la différence des autres éléments du tableau périodique, les terres rares ont des électrons internes, « cachés » à l'intérieur de l'atome. Ces électrons appelés 4f sont à l'origine du phénomène appelé contraction des lanthanides. Ils donnent à chaque terre rare des propriétés physiques exceptionnelles, très différentes les unes des autres (Annexe III).

5. Applications

Les TR, groupe de métaux aux caractéristiques indispensables pour de nombreuses applications civiles et militaires, se retrouvent dans les technologies vertes ainsi que dans les technologies au cœur de notre société (téléphones portables, écrans plats).

Les lanthanides sont utilisés pour leurs propriétés luminescentes, colorantes, magnétiques, électriques, polissantes, catalytiques, réfractaires et métalliques, dans des secteurs aussi divers que l'électronique, l'industrie du verre, l'éclairage, la catalyse industrielle, la métallurgie, l'industrie nucléaire ; l'aérospatial, l'automobile ; la défense ; les technologies de l'information, etc. (Tableau Annexe I et IV) (Lucas et al., 2015).

Les applications des terres légères et des terres lourdes sont parfois différentes. À titre d'exemple, les terres rares légères ont été très utilisées dans la première génération d'accumulateurs alcalins. Les terres lourdes sont, elles, utilisées comme piège à neutron au sein des réacteurs de fission. Ce sont des poisons neutroniques, c'est-à-dire d'excellents absorbants de neutrons. (Bordier).

Il est fréquent de retrouver ces deux familles de terres rares au sein d'une même technologie, car leurs propriétés physico-chimiques sont parfois complémentaires. C'est notamment le cas pour les aimants permanents qu'utilise Siemens² et qui sont constitués de fer, de bore, de deux terres rares légères et d'une terre rare lourde, le dysprosium (Lucas et *al.*, 2015).

Les terres rares lourdes permettent notamment de garantir les propriétés magnétiques à température élevée.

L'utilisation des terres rares s'est accrue depuis la fin du XX^e siècle. Nombre de ces éléments possèdent des propriétés uniques qui les rendent utiles dans des applications très variées, à la fois par les phénomènes physiques qu'elles exploitent, et par les domaines commerciaux concernés.

La plus importante utilisation des terres rares (24%) se retrouve dans les aimants permanents qui sont une composante de nos téléphones cellulaires, nos téléviseurs, nos ordinateurs, nos automobiles, etc. (Photos 1 et 2- annexe II).

La deuxième plus importante utilisation de terres rares se retrouve dans les catalyseurs de craquage de produits pétroliers (21%).

Le nombre croissant d'applications des terres rares a entraîné une augmentation importante de la demande en ces composés purifiés.

5.1. TR en applications électroniques

Sous l'influence d'une radiation, la plupart des terres rares émettent des radiations lumineuses dans une large gamme de longueur d'onde, et souvent selon des raies étroites et très intenses.

Cette propriété de luminescence permet d'employer des composés de terres rares comme luminophores pour la télévision couleur.

Ces phénomènes de luminescence sont également utilisés pour améliorer le rendu des couleurs des tubes fluorescents, tout en augmentant considérablement leur rendement, on les utilise aussi dans le domaine du marquage des objets.

Dans le domaine de la radiographie médicale, des composés de terres rares intensifient le rayonnement X dans le visible, permettant ainsi une meilleure efficacité, et diminuant du même

² Siemens est un groupe international d'origine allemande spécialisé dans les secteurs de l'énergie, de la santé, de l'industrie et du bâtiment. Il a été fondé en 1847 par Werner Von Siemens.

coupe la dose de rayons X à laquelle le patient doit être soumis. Certains grenats de terres rares sont également utilisés dans des lasers. Ions des lanthanides sont paramagnétiques sauf La⁺, Lu⁺ et Y qui sont diamagnétiques.

On peut également les engager dans des structures où apparaîtront des composés de terres rares ferromagnétiques, antiferromagnétiques, ou ferrimagnétiques.

Ces propriétés permettent la fabrication d'aimants permanents, et l'utilisation de certains de ces composés comme réactifs de déplacement chimique en R.M.N.

5.2. TR en applications électriques

Les oxydes de terres rares sont souvent employés dans les condensateurs céramiques de qualité afin de limiter la variation de la capacité avec la température, certaines céramiques contenant des lanthanides constituent d'excellents supraconducteurs à haute température critique.

5.3. Terres rares et industrie du verre

La plupart des terres rares possédant des spectres d'absorption étroits dans un large domaine de longueur d'onde, il en résulte des couleurs assez pures et brillantes, ce qui permet de les employer pour des verres techniques ou en verrerie d'art.

Par effet de compensation optique sont également utilisés pour décolorer les verres.

Les mêmes propriétés sont utilisées également dans le domaine des céramiques et de l'émaillage. De plus des composés de terres rares non absorbants permettent d'augmenter l'indice de réfraction, ce qui est très utilisé pour les verres optiques.

Une grande quantité (12%) des oxydes de terres rares produits dans le monde sont également utilisés comme agents de polissage du verre, on utilise alors des oxydes non séparés, ou des oxydes de cérium.

5.4. TR et catalyse

Les terres rares sont aussi employées pour leurs propriétés chimiques ; c'est particulièrement le cas lors de leur utilisation comme catalyseur, principalement pour le craquage de dérivés pétroliers (25% des oxydes de terres rares). Des études portent également sur leur utilisation pour les pots d'échappements catalytiques pour automobiles. Le cérium a un effet catalytique, il transforme les gaz de combustion, du monoxyde de carbone (CO), des oxydes d'azote (NO_x) entrant dans le pot d'échappement en azote (N₂) et en oxygène (O₂).

Ces gaz toxiques et polluants ne doivent pas sortir du pot !

5.5. TR et métallurgie

Les métaux des terres rares sont employés comme additifs en métallurgie, principalement lors de la fabrication de fontes et d'aciers spéciaux dont on améliore ainsi leur résistance, on utilise alors le mischmétal, un mélange de terres rares légères.

Certains alliages de terres rares présentent également la propriété de capter l'hydrogène, ce qui présente un intérêt en vue de stocker ce gaz.

5.6. TR en industrie nucléaire

Le gadolinium présente une très grande section de capture des neutrons thermiques, il est utilisé comme poison consommable dans les réacteurs ou les unités de retraitement. L'euporium est également utilisé pour les réacteurs à neutrons rapides.

5.7. TR et colorants

Les oxydes de terre rare sont également utilisés comme pigments, en particulier pour le rouge (pour remplacer l'oxyde de chrome) et pour leurs propriétés fluorescentes, notamment dans les lampes à décharge (néons, ampoules fluocompactes), les « filets » des lampes à gaz de camping, comme photophores des écrans cathodiques ainsi que, récemment, comme dopant dans différents types de laser.

Toutefois, une part importante de la production de terres rares est utilisée en mélange.

Le mélange des métaux de terres rares appelé mischmétal est généralement riche en terres cériques. Du fait de cette importante proportion de cérium, il est incorporé dans les alliages pour pierre à briquet. On l'utilise également comme catalyseur, pour le piégeage de l'hydrogène (réservoir).

5.8. TR et la fabrication d'aimants

A partir des années 1970, les hommes se sont mis à exploiter les propriétés magnétiques exceptionnelles de certains de ces métaux (Harari, 2015) et à les manipuler pour fabriquer des aimants ultra-puissants. Les plus petits font à peine la taille d'une tête d'épingle (actionner la vitre d'une voiture, vibrer une brosse à dent ou un téléphone mobile, etc.). Le plus gros électro-aimant jamais conçu mesure 4 mètres de haut et pèse 132 tonnes.

Selon Ressources Naturelles Canada la plus importante utilisation des terres rares (24%) se retrouve dans les aimants permanents qui sont une composante de nos téléphones cellulaires, nos téléviseurs, nos ordinateurs, nos automobiles, etc.

La demande la plus importante concerne le néodyme, pour fabriquer des aimants. Chaque aimant est caractérisé par la force, avec laquelle il colle et par sa rémanence. C'est-à-dire sa durée de vie. Les aimants les plus puissants contiennent un alliage néodyme/fer. Grâce à la structure électronique du néodyme, ces aimants sont permanents.

Les aimants synthétiques sont produits par frittage d'un alliage de poudres de terres rares qui forme alors une céramique polarisée sous le champ intense d'un électroaimant. Les aimants naturels sont des oxydes mixtes de fer II et de fer III de la famille des ferrites (oxydes mixtes d'un métal divalent et de fer III).

Le néodyme, parfois considéré comme une terre rare intermédiaire, doit être considéré de manière spécifique en raison de la demande croissante d'aimants permanents de type néodyme-bore-fer.

La première application du néodyme concerne les éoliennes. Ces dernières produisent de l'électricité à partir d'électro-aimants qui tournent, grâce aux pales : à chaque fois qu'un aimant passe devant une boucle en cuivre, un courant se crée. Dans les éoliennes récentes, les aimants contiennent du néodyme. Ils ne s'usent pas, donc la production d'électricité est d'autant plus efficace. Au-dessus d'une température de 80 à 100 °C, ces aimants perdent quand même leur force d'aimantation : il faut donc utiliser une autre terre rare, le dysprosium, pour "doper" le néodyme/fer ! Utilisé en très petite quantité, il permet de remonter la température d'utilisation des aimants. Mais le dysprosium est vraiment très rare. L'autre application concerne les voitures électriques. Les moteurs électriques à base de néodyme/fer, très petits, sont très puissants.

Autres applications

Certaines terres rares sont luminescentes. C'est une propriété très originale. Des barreaux laser contiennent du néodyme, qui est rose, et servent pour la radiométrie. Le laser à l'ytterbium, plus récent, est un laser à fibre, flexible. Il sert à découper les tôles, dans les usines de voitures, par exemple. Ce laser est en train de tout envahir. L'erbium est utilisé dans l'amplification optique des télécoms.

Cette luminescence est utilisée par ailleurs en médecine. Mais également pour l'éclairage. Le cérium transforme la lumière bleue, émise par les leds, en lumière "visible", blanche. Les leds utilisent désormais cette terre rare, qui absorbe le bleu et émet dans plusieurs longueurs d'onde. Mais on utilise très peu de cérium dans les applications liées à la luminescence.

Par contre, 15 à 20 % du cérium est utilisé pour le polissage du verre, qu'il rend beaucoup plus efficace. C'est pour cela que le cérium, qui est abondant, est très demandé. Un autre de ses marchés est la-catalyse automobile.

Chapitre III « Terres rares » dans le monde

1. Répartition (Gisements) et production mondiale

Les « terres rares » sont relativement abondantes dans la croûte terrestre. (0,08 %).

Il y a des réserves mondiales partout, du Groenland à l’Australie (Chen, 2011).

On en trouve : en Amérique (quatre pays) ; en Asie (14 pays), en Afrique (10 pays dont l’Algérie), en Europe (six pays).

Deux minerais représentent l'essentiel des réserves mondiales de « terres rares » : la bastnaésite, orthophosphates de « terres rares », essentiellement en Chine et aux États-Unis ; la monazite, fluorocarbonates de « terres rares », essentiellement en Australie, au Brésil, en Chine, en Inde, en Malaisie, en Afrique du Sud, au Sri Lanka, en Thaïlande et aux États-Unis.

Jusqu’en 1948, la plupart des sources de « terres rares » provenait de dépôts de sable en Inde et au Brésil.

Durant les années 1950, l’Afrique du Sud est devenue le principal producteur après la découverte d’immenses veines de « terres rares » (sous forme de monazite) à Steenkampskraal.

Mais, les concentrations exploitables sont moins courantes que pour la plupart des autres minerais rares. (USGS, 2019).

Selon un panorama établi par le BRGM, la production minière mondiale de « terres rares » avoisinait, en 2014, quelques 144.000 tonnes pour une consommation d’environ 120.000 tonnes et un marché qui pesait près de 3,2 milliards d’euros (Bru et al, 2022).

Fin 2018, les réserves mondiales en oxydes de « terres rares » étaient estimées par l’Institut d’études géologiques des États-Unis à 120 millions de tonnes, détenues à 37 % par la Chine, devant le Brésil (18 %), le Viêt Nam (18 %), la Russie (10 %), l’Inde (6 %), l’Australie (2,8 %), les États-Unis (1,2 %), etc. Ces réserves réparties de façon inégale à travers le monde font de la Chine un leadership incontesté et incontestable. (Tableau4. et figure3).



Fig. 3 - Réserves potentielles d’oxydes de Terres Rares (en millions de tonnes)
Source : Mineral Commodity Summaries, U.S. Geological Survey.

Tableau 4 - Réserves mondiales en oxydes de << terres rares>> (estimation en tonnes. 2018)

Source : "Rare Earths", Mineral Commodity Summaries, U.S. Geological Survey, February 2019, p. 133.

RANG	ÉTAT OU TERRITOIRE	RÉSERVES D'OXYDES DE TERRES RARES (t)	
		2018	
1	Chine	44 000 000	36,67
2	Brésil	22 000 000	18,33
3	Viet Nam	22 000 000	18,33
4	Russie	12 000 000	10,00
5	Inde	6 900 000	5,75
6	Australie	3 400 000	2,83
7	États-Unis	1 400 000	1,17
8	Malaisie	30 000	0,03
-	Autres États	4 400 000	3,67
-	Burundi [1]	n.c.	-
-	Myanmar (Birmanie) [1]	n.c.	-
-	Thaïlande [1]	n.c.	-

Notes

(1) Etats producteurs d'oxydes de terres rares dont les données relatives aux réserves potentielles sont indisponibles

2. Les grands pays producteurs de métaux rares

2.1. La Chine (‘oligopole’) : Bayan Obo

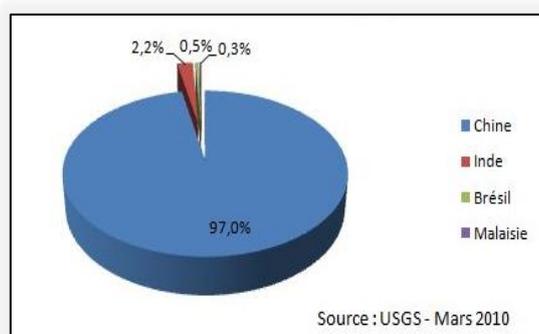
À la fin des années 1980, la Chine devient le principal producteur mondial de « terres rares ».

En 1986, elle, lance un programme de recherche visant à tirer profit des immenses réserves du pays en « terres rares ». Et entame alors une politique volontariste de développement de la filière.

Progressivement, les entreprises chinoises prennent le contrôle du marché et poussent les compagnies étrangères à abandonner leur production ou à la délocaliser en Chine (Fig. annexe).

C'est encore le cas aujourd'hui avec une position hégémonique, grâce à l'exploitation de gisements gigantesques tel que Bayan Obo (Le plus important site au monde) dont les réserves en oxydes de << terres rares>> sont estimées à au moins 48 millions de tonnes (Drew, *et al.*, 1990) ; mais surtout grâce au savoir-faire concernant la séparation des « terres rares ».

Toute la gamme des « terres rares » est extraite, principalement en Mongolie Intérieure, environ 97 % de la production mondiale (fig.4).

**Fig.4** - Production mondiale de minerai de « terres rares » en 2008 (%)

Les principaux autres gisements sont Weishan (Shandong), Maoniuping et Dalucao (Sichuan) et les argiles ioniques du sud-est de la Chine (Jiangxi, Guangxi, Guangdong, Hunan), appauvries en cérium et souvent enrichies en « terres rares » lourdes. (Bru, *et al.*, 2015).

Les Chinois ont pratiquement toute la panoplie des « terres rares », notamment les plus critiques comme le néodyme. Ils exploitent des mines gigantesques dans deux ou trois sites, surtout à Baotou, autoproclamée « capitale mondiale des « terres rares ». (Branton, 2020).

Il se trouve également en Chine, dans la région de Nanling, des éléments de « terres rares » présents dans les argiles latéritiques (ion adsorption). Les teneurs de ces gisements sont très faibles (entre 0.05 et 0.2%), par contre l'extraction et le traitement sont faciles.

Il existe également une importante production illégale de « terres rares » en Chine, alimentant un marché noir estimé pouvoir représenter 40 % de la production officielle chinoise et sur lequel les informations quantitatives sont rares.

Notons, que partout où il y a des « terres rares », comme en Afrique (Algérie, RDC, Tanzanie), les Chinois investissent.

Selon Pitron (2019), les Chinois détiennent aujourd'hui le leadership, voire le quasi-monopole d'une kyrielle de métaux rares indispensables aux énergies bas carbone et au numérique, deux piliers de la transition énergétique.

En 1992, Deng Xiaoping (numéro un de la Chine de 1978 à 1992) aurait dit de façon prémonitoire, « *Le Proche-Orient a son pétrole, la Chine a ses « terres rares »* ».

2.2. Les Etats-Unis : Mountain Pass

Le second site mondial de ressources en « terres rares » est le site de Mountain Pass, situé près de la frontière entre la Californie et le Nevada. Les réserves confirmées d'oxydes de « terres rares » se montent approximativement à 28 millions de tonnes.

Exploitées de façon anecdotique dans les années 1950-1960 au sein de placers à minéraux lourds, leur attrait grandit et les Etats-Unis, avec leur gisement de Mountain Pass, deviennent le producteur principal des années 1970 à 1980.

Toutefois, la production minière a chuté à 5000 tonnes avant une fermeture en 2002 pour des raisons environnementales liées à l'usage de solvants pour extraire les « terres rares ».

Après une complète réhabilitation et une mise aux normes environnementales actuelles, les Etats-Unis ont ainsi décidé en 2013 de réactiver la mine de Mountain Pass (Drezet, 2012).

2.3. Australie : Mount Weld

Mount Weld en Australie est classé troisième site dont les réserves estimées en minerai s'élèveraient à 917000 tonnes avec la Bastnaésite comme principal minéral. Pour des raisons environnementales, l'extraction de « terres rares » a dû être arrêtée à partir de la monazite (associé aux sables de plage titanifères) sur son site de La Rochelle (Hocquard, 2010)

La reprise de l'exploitation a été annoncée officiellement en Août 2011(Réf)

On trouve également en Australie des sables de minéraux lourds contenant des « terres rares » largement présents sur les côtes australiennes. Ces sables renferment de la monazite et du xénotime.

L'Australie est prête à reprendre l'extraction des « terres rares », mais pas à supporter le coût environnemental de leur raffinage qu'elle préfère délocaliser. En septembre 2012, la société Lynas a obtenu le droit d'ouvrir son usine de traitement de « terres rares » de Kuantan, dans l'Etat de Pahang en Malaisie pour une période de 2 ans (Selger, 2012)

4. Le Burundi : Gakara (Afrique)

Le Burundi fait office de pionnier sur le continent dans la production des minerais de « terres rares », et figure en 2019 parmi les dix pays producteurs des « terres rares » au monde.

Sa production est de 600 tonnes de minerais de « terres rares » produits selon le site Statista.com. Au niveau mondial, il est en neuvième position. Au Burundi, les « terres rares » sont exploitées dans la localité de Gakara.

Selon la société Rainbow Mining Burundi, les réserves en « terres rares » sont estimées à 1,2 million de tonnes exploitables pendant au moins 25 ans. Et selon les études effectuées en 2018, les mines burundaises se classent parmi celles ayant une plus haute teneur au monde. Si la société Rainbow Mining Burundi croissait sa production et parvenait à franchir la barre de 22 000 tonnes, le Burundi se hisserait à la troisième position du classement des grands producteurs de ces joyaux tant convoités dans le monde. Il y régnerait aux côtés des deux géants mondiaux du secteur, soit la Chine et les États-Unis. La mine burundaise de Gakara est depuis 2017 la seule mine en exploitation en Afrique. (Berahino ; 2019).

En ce qui concerne l'Afrique, 10 pays possèdent actuellement des gisements de « terres rares » (Chen ; 2011). Les nations comme l'Afrique du Sud, la Namibie, la Tanzanie, ou encore l'Angola, se préparent à lancer l'exploitation de leurs mines.

4. Terres rares en Algérie

Pour l'économie algérienne, la prochaine décennie sera sans doute celle des produits miniers et, notamment, celle des « terres rares » dont le pays regorge, à en croire les informations livrées par

quelques médias qui en 2017 déjà classaient l'Algérie au troisième rang mondial des réserves disponibles. (Grim, 2020).

En effet, continuer à dépendre des seules ressources d'hydrocarbures serait suicidaire pour l'Algérie. Les baisses tendancielle de la production (l'Algérie ne produit plus que 700.000 barils/jour) et des recettes (à peine 18 milliards de dollars en 2019), s'inscrivent dans une logique structurelle imparable et le gouvernement algérien semble l'avoir bien compris.

Et c'est sans doute pourquoi le feu vert a été donné (7 juillet 2020) pour entamer l'exploitation à grande échelle de produits miniers dont le pays regorge. Il s'agit des « terres rares » disséminées à travers tout le territoire national. On s'étonne évidemment de l'intérêt tardif porté par les autorités algériennes à d'aussi importantes sources de revenus.

Selon certaines sources, le sous-sol algérien ne renfermerait pas moins de 20% des réserves mondiales de « terres rares ». Si ces informations jamais démenties, venaient à être confirmées par des chercheurs agréés, elles feraient de l'Algérie un pays qui pèsera très lourd, non seulement, sur le plan économique, mais aussi et surtout, sur le plan géostratégique, tant ces métaux rares sont indispensables à l'industrie des équipements de pointe qui, comme on le sait, connaît un essor prodigieux dans les pays les plus puissants de la planète.

La présence à une aussi grande échelle de « terres rares », serait en effet de nature à faire de l'Algérie un richissime détenteur de ces métaux précieux indispensables à la fabrication de technologies ultra modernes, que très peu de pays possèdent.

Il y a lieu de souligner, en outre, que la recherche minière en Algérie, à travers l'ex-Sonarem, dans le cadre des programmes d'exploration financés par l'Etat, avait localisé, cartographié et mis en évidence beaucoup d'indices de minerais, de gisements et d'occurrences minéralisés, dans les différents districts de recherche. Confectionnant en cela une banque de données géologiques appréciables mais non suffisantes, y compris pour les « terres rares », dont la présence des premiers indices était identifiée géologiquement dans des sites localisés au Sud du pays, mais dont la répartition au plan théorique est disséminée dans toute la croûte terrestre.

A ce niveau de connaissance, les informations recueillies ne prétendaient pas fournir une information exacte sur l'estimation des réserves, qui reste subordonnée à un processus assez laborieux de recherche et d'études d'évaluation assez poussées.

Leur niveau de maîtrise n'est détenu actuellement que par certains laboratoires mondiaux, qui ont investi depuis fort longtemps dans la recherche scientifique en général et la recherche minière en particulier.

Plusieurs chercheurs algériens ont mis en évidence, l'existence des « terres rares » à des teneurs appréciables qui ont été relevées sur le site de Djebel El Onk à Tébessa.

Selon le Dr Benyahia, consultant en Ntic, l'Algérie renferme dans son sous-sol 20% des réserves des « terres rares » dans le monde, N'est-il pas plus simple de les récupérer directement de leur emplacement originel, ne serait-ce que pour s'assurer une place dans le club des exportateurs de métaux stratégiques ou du moins en réduire les importations, par exemple des catalyseurs à base de « terres rares » pour les stations de raffinerie du pétrole. Ou doit-on toujours rester observateurs et dépendants alors que nous disposons d'un potentiel incommensurable de richesses naturelles qui n'attendent qu'à simplement être prélevées ?

On veut réussir une transition énergétique ? La valorisation des minéraux en constitue la passerelle.

Interpelé sur le sujet lors du forum de Liberté, le consultant donnera plus de précisions. Tout en se tenant à la règle Chattum house sur les noms des chercheurs, il indique, néanmoins, que ces recherches dans le sous-sol algérien remontaient aux années 1970 et que les travaux s'étaient effectués en collaboration avec les Chinois.

Concernant le volume des « terres rares » il précisera que ces réserves classaient l'Algérie en troisième position derrière la Chine et l'Afrique du Sud. Il n'omettra pas de préciser que malgré cette richesse, l'Algérie semble ne pas se préoccuper de la véritable manne qui se trouve sous ses pieds ; alors que le pays se doit de retrouver une autre source de revenus que le pétrole et de diversifier son économie. (Elisabeth, 2015).

“Je pense que le ministère de l'Industrie et des Mines n'a même pas pensé à ça”, lança-t-il avec dépit.

En janvier 2014, le président de l'agence nationale du patrimoine minier (ANPM) (in Elisabeth, S. ; 2015), indiquait pour sa part que l'Algérie disposerait de « terres rares » « nous avons des indices de la présence de ces métaux notamment dans le sud du pays » avait-il alors indiqué. Précisant qu'il s'agissait d'un potentiel en scandium, yttrium, ou cérium notamment, qu'il s'agissait toutefois de bien évaluer et de bien valoriser à terme.

Pour Tridi (2020) dans son article : ‘ *La problématique des « terres rares » en Algérie : Menace ou opportunité* ’ ces informations affichées avec précipitation par certains quotidiens, annonçant en premiers titres que l'Algérie détenait 20% des réserves mondiales des « terres rares », ont été puisées, semble-t-il, auprès de certains chercheurs de laboratoire qui doivent être, à mon sens, ramenées à leur juste mesure et mises dans leur contexte réel avant d'être livrées à l'opinion publique.

Si la presse, alimentée par certains « experts », s'est dépêchée d'alimenter la chronique en allant jusqu'à évaluer nos réserves de « terres rares » à environ 2400 milliards de dollars, aucune

précision n'a par contre été donnée sur la localisation précise des gisements disponibles. On s'est contenté de les positionner vaguement du côté Est et Sud-ouest du pays.

L'évaluation basée sur des études prospectives effectuées au début des années 70 par des ingénieurs chinois est également imprécise, ne serait-ce que du fait de l'archaïsme des instruments de détection de l'époque, que du peu de moyens déployés pour la circonstance sur un aussi vaste territoire.

Le ministère de l'Industrie a tout récemment reçu ordre de recruter un maximum d'ingénieurs et géologues pour faire l'inventaire des actifs miniers de l'Algérie. Ce n'est qu'à l'issue de cette prospection à grande échelle qu'on connaîtra avec suffisamment de précision la nature des gisements miniers, leurs consistances et leurs localisations précises. On peut toutefois commencer par exploiter des gisements déjà répertoriés parmi lesquels de possibles de Cobalt.

Les enjeux financiers sont en effet colossaux. Ils le sont pour le minerai de fer de Gara Djebilet qui offre le privilège d'être facilement exploitables et intarissables durant au minimum un demi-siècle.

Ils le sont aussi pour la mine de zinc d'Amizour qui peut rapporter gros du fait de l'envolée des cours de ce minerai qui tend à manquer sur le marché mondial. (Tridi, 2020).

Mais ils le sont surtout pour les « terres rares », dont la demande mondiale avait explosé avec l'industrie électronique (ordinateurs, Smartphones, équipements médicaux etc.). Et progresse encore plus aujourd'hui, avec l'industrie de la voiture électrique qui requiert des quantités gigantesques de Lanthane, Cérium, Néodyme, Yttrium, mais aussi et surtout, de Cobalt pour réaliser les batteries Lithium et le matériel électronique qui équipera les dizaines de millions de véhicules écologiques qui sortiront prochainement en masse de pratiquement toutes les usines d'automobiles du monde.

C'est le cas du Cobalt que seuls quelques rares pays possèdent. Le plus important d'entre eux est sans aucun doute le Congo qui détient les deux tiers des réserves et produit environ 100.000 tonnes par an (Tridi, 2020).

Retenons, que c'est la première fois que les autorités algériennes évoquent la possibilité d'extraire cette catégorie de métaux rares particulièrement prisée par les industries de pointe. On ne trouve d'ailleurs nulle part trace d'initiatives allant dans ce sens. Bien au contraire un mystérieux « blackout » bloque depuis des années toute information relative à cette filière que les nouvelles technologies ont subitement propulsée au-devant de la scène. S'il y a effectivement traces d'appel d'offres pour l'exploitation des gisements de fer et de zinc des mines de Gara Djebilet et d'Amizour, on ne trouve par contre aucune initiative de ce genre en ce qui concerne la prospection et à l'exploitation de gisements de « terres rares », ce qui paraît étonnant au regard des gros revenus

que pourraient générer à court terme ces richesses notamment en cette période de déclin des recettes d'hydrocarbures.

Au niveau du ministère de l'Industrie, on explique le retard à promouvoir l'extraction et le raffinage des « terres rares » par l'importance du coût des investissements et par l'absence de savoir-faire qui contraindra l'Algérie à extraire et valoriser ces métaux en partenariat avec des entreprises étrangères qui maîtrisent le mieux les technologies de l'extraction et du raffinage des « terres rares ».

Notre source nous informe que l'industrie des « terres rares » doit se déployer avec beaucoup de précautions car les risques de pollutions irréversibles sont réels, sans doute même, plus importants que ceux qui résultent de l'extraction d'hydrocarbures de schistes. *Mais on n'en est pas encore là !* Car si l'intention d'ouvrir officiellement la voie à l'exploitation des « terres rares » est excellente en soi, il reste beaucoup à faire pour donner effectivement corps à cette industrie toute nouvelle pour l'Algérie.

De nombreuses questions se posent dès lors : qui exploitera les gisements de « terres rares ».

Si c'est directement l'Etat algérien, faudra-t-il créer pour ce faire une société nationale ? Si partenariat avec des firmes étrangères il y aura, quels seront ces partenaires ? Y aurait-il comme pour le pétrole, des firmes (américaines et françaises notamment) plus privilégiées que d'autres ? Le privé algérien sera-t-il autorisé à exploiter des gisements de « terres rares » ?

Les « terres rares » seront-elles raffinées en Algérie ou exportées à l'état brut ? Comment préserver l'environnement de cette industrie polluante ? L'Algérie cherchera-t-elle à développer en aval de l'exploitation de « terres rares », une industrie électronique qui prendrait avantages de la disponibilité du cobalt et autres métaux destinés à ce type d'industrie ? Autant de questions auxquelles il est important de réfléchir dès à présent.

Même, en supposant que la recherche minière mettrait en évidence des réserves prouvées, et un potentiel exploitable en « terres rares » ; le secteur minier algérien n'a, en l'état actuel de ses moyens humains et matériels, et en l'absence de capacités de traitement et de transformation, aucune possibilité d'investir ce créneau ni de maîtriser les risques qui impliquent la mobilisation de moyens importants et des techniques lourdes d'extraction. Compte tenu de la présence des « terres rares », à un infime pourcentage dans la roche mère. Leur production serait estimée en quintaux, voire même en kilogrammes (Grim, 2020).

Métaux rares dans d'autres pays ?

Dans le reste du monde (tableau) les principaux gisements exploités sont Lovozero (Péninsule de Kola, Russie), des sables de plage à monazite en Inde (Odisha, Andhra Pradesh) et au Brésil. De

nouveaux projets sont en préproduction (Dong Pao, Vietnam, Ulba Tailings, Kazakhstan), et plusieurs dizaines d'autres gisements ont été découverts ou évalués au cours des années 2010-2014, en Afrique (Malawi, Kenya, Tanzanie, Namibie, Afrique du Sud, Madagascar), en Amériques (États-Unis, Canada, Brésil), et en Europe (Suède, Groenland, Portugal) et en Australie. Nombre de ces projets, encore actifs récemment, ont été mis en sommeil avec la poursuite de la chute des prix des « terres rares » en 2014 et 2015, ayant des difficultés à trouver des financements. Seuls quelques-uns ont encore une probabilité significative d'être développés dans les prochaines années.

Tableau 5 - Pays producteurs de minerais stratégiques : compilation de données,

Minerais	Pays producteurs %
<< terres rares >>	Chine (95), Australie (3)
Antimoine	Chine (89), Australie, Turquie, Tadjikistan
Béryllium	USA (91) Chine (8)
Cobalt	RDC (61) ; Russie (6) Canada (4)
Gallium	Chine (70), Allemagne (10), Kazakhstan (6)
Germanium	Chine (65), Finlande (14) la Russie (4)
Graphite	Chine (75), Inde (8), Brasil (4)
Indium	Chine (60), Japon (8), Corée du Sud (8), Belgique (4)
Lithium	Australie (33), Chili (33), Chine (3), Argentine (2)
Magnésium	Chine (89), Russie (4)
Niobium	Brésil (92), Canada (7)
Platinoïdes	Afrique du sud (61), Russie (27), Zimbabwe (4)
Silicium	Chine (56), Brésil (11), France (6)
Tantale	Rwanda (44), Brésil (8) RDC (19), Chine (5)
Tungstène	Chine (85)

Source bureau des ressources géologiques et minières (BRGM) et United states Geological Survey (USGS) (chiffres de 2014)

L'Indonésie est également une grande puissance minière qui regorge d'étain. Tous ces pays veulent s'inspirer de l'exemple chinois et capter la valeur ajoutée des métaux rares. Plus aucun Etat ne veut reproduire le schéma néocolonialiste selon lequel les pays en développement produisent le minerai brut, le vendent une poignée de dollars aux Occidentaux ; et ces derniers le valorisent avec quelques brevets pour le revendre dix fois plus cher.

Au-delà des ambitions, c'est très dur à mettre en place car ça veut dire ouvrir des routes, installer des lignes électriques, faire venir des savoir-faire. En 2015, l'Indonésie a tenté un embargo sur l'exportation de minerais brut. Derrière, elle n'avait pas un tissu industriel suffisamment

développé pour transformer la ressource. Elle a dû faire marche arrière deux ans plus tard. Seule certitude, les Occidentaux doivent accepter de partager le gâteau technologique auquel toutes les nations aspirent.

La Russie, l'Australie, Cuba et le Maroc comptent également se lancer dans l'aventure des « terres rares » mais ils ne pourront produire au total que 116.800 tonnes de Cobalt alors que le marché mondial en demande 200.000 tonnes aujourd'hui et, sans doute le double, dans les dix prochaines années.

Même si son prix a beaucoup régressé (il est passé de 90.000 dollars la tonne en décembre 2018 à 28456 dollars la tonne en août 2020), le Cobalt reste encore suffisamment rémunérateur aujourd'hui sur le marché mondial. Lorsque l'économie sortira de la paralysante pandémie de Coronavirus, les perspectives en la matière promettent d'être encore plus optimistes, vu l'écart qui existera entre la demande qui explosera avec le boum de l'industrie de la voiture électrique et l'offre de cobalt qui demeurera à des niveaux toujours bas.

Chap. IV Impact de l'exploitation des terres rares sur l'environnement

1. Les terres rares : une industrie particulièrement polluante

Le paradoxe des terres rares

La construction de nouvelles technologies dites « propres » : éoliennes, panneaux solaires, voiture électrique, portable, internet, a permis de se défaire, de se délivrer de la dépendance des énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole) dont la consommation effrénée n'a fait que porter atteinte à la biodiversité. (Voir annexe 2).

Pitron (2019, 2021) s'est intéressé aux conséquences environnementales et géopolitiques de l'extraction de ces métaux rares. Durant son enquête, il a découvert que l'extraction de ces métaux rares génère d'importants impacts environnementaux. Les processus d'extraction et de séparation nécessitent beaucoup d'énergie, de produits chimiques et d'eau.

En prenons l'exemple de la Chine, acteur mondial principal dans le domaine des terres rares, exploitant plusieurs grandes mines ainsi qu'une importante quantité de petites mines (partiellement illégales), nous relatons ici un rapide tour d'horizon des principaux impacts de l'exploitation des TR sur l'environnement relevés dans ce pays :

– **Bayan Obo** : extraction de surface d'un mixte bastnaesite-monazite contenant des terres rares légères et du thorium ; problèmes environnementaux sévères et risques pour la santé dans l'extraction, la concentration et les processus suivants :

- durant la phase de broyage du minerai, 61,8 t/an de poussières contenant du thorium sont émises ; l'exposition prolongée aux poussières de thorium conduisent à une augmentation significative des décès dus au cancer du poumon parmi les travailleurs de la région de Baotou (Chen *et al.*, 2004, in Drezet, 2012) ;
- de plus, les étangs de stockage des déchets ont causé une pollution des nappes phréatiques qui affecte les puits des villages environnants, l'élevage, l'agriculture et la santé des habitants (Buckley, 2010 in Drezet, 2012) ; sur 100 000 t de concentrés de terres rares traités par an, on estime qu'environ 200 t d'oxyde de thorium sont présents dans ces boues ;
- l'utilisation d'acide sulfurique dans la production d'1 t de concentrés de terres rares peuvent libérer dans l'atmosphère entre 9600 et 12000 m³ de gaz contenant fluorures, SO₂, SO₃ et des poussières pour finir, 75 m³ d'eaux usées acides et 1 t de résidus radioactifs sont générés par tonne de concentrés de terres rares.

– **Sichuan** : autre mine à ciel ouvert produisant des terres rares légères à base de bastnaesite (contenant du thorium également).

La méthode de lixiviation à l'acide chlorhydrique est ici actuellement la plus communément adoptée ; ce traitement produit des effluents et des déchets solides contenant des fluorures et du thorium ;

– **Sud de la Chine** ; mines à adsorption d'ions produisant des terres rares lourdes ; la technique employée, la lixiviation in situ, consiste à forer des trous dans la couche de minerai et y injecter une solution ; on pompe ensuite la solution contenant le minerai dissous puis on effectue le traitement ; cette technique est jugée moins nocive pour l'environnement par les autorités, cependant elle n'est pas contrôlable hydro-géologiquement ;

– on estime qu'environ 20 000 t de minerai de terres rares ont été illégalement extraits de Chine ; l'essentiel de ces mines illégales n'ont probablement aucune technologie de protection de l'environnement ; de graves dommages environnementaux et des risques pour la santé ont été rapportés (Bork 2010, Zajec 2010).

– au cours des opérations d'extraction, de séparation et de raffinage des terres rares, de nombreux produits chimiques sont employés, conduisant à des quantités très importantes de rejets gazeux, d'eaux usées et de déchets solides toxiques ; la plupart des installations n'ont pas de systèmes de traitement suffisants et quelques petites installations de séparation des terres rares n'ont aucun système de protection de l'environnement.

Selon Pitron, (2019), les énergies dites « propres » nécessitent le recours à des minerais rares dont l'exploitation est tout sauf « propre ». C'est même un cauchemar environnemental où se côtoient – pour ne citer qu'eux – rejets de métaux lourds, pluies acides et eaux contaminées, dont les conséquences n'ont épargné aucun écosystème (Annexe V).

Autrement dit, pour faire du propre il faut faire du sale. Mais nous feignons de l'ignorer, puisque nous refusons d'apprécier l'ensemble du cycle de fabrication des éoliennes et des panneaux solaires. « *Il ne faut plus se contenter d'apprécier les produits finis qui sont verts, sains et non polluants, mais examiner si le processus d'extraction de leurs composants et celui de leur fabrication industrielle sont respectueux ou non de l'environnement* » (Ma Jun, in Pitron, 2019).

Ces mêmes énergies qu'on appelle renouvelables se fondent sur l'exploitation de matières premières, qui elles ne sont pas renouvelables. Encore qualifiées de « vertes » ou de « décarbonées » car elles nous permettent de nous désaccoutumer des énergies fossiles-reposent en réalité sur des activités génératrices de gaz à effet de serre.

Selon Pitron (2019 ; 2021), il faut des quantités considérables d'énergie issues des centrales électriques pour exploiter une mine, raffiner les minerais, puis les acheminer vers un centre de production ou ils seront incorporés dans une éolienne ou un panneau solaire. N'y a-t-il pas une ironie tragique à ce que la pollution qui n'est plus émise dans les agglomérations grâce aux voitures électriques soit simplement déplacée dans les zones minières. Où l'on extrait les ressources indispensables à la fabrication de ces dernières ?

Pitron (2019) conclue que la transition énergétique et numérique est une transition pour les classes les plus aisées : elle dépollue les centres villes les plus huppés, pour mieux lester de ses impacts réels les zones les plus miséreuses et éloignées des regards.

Toujours selon cet auteur, notre nouveau modèle énergétique est donc terriblement pernicieux : autant les acteurs de l'économie du carbone ne pouvaient nier qu'ils polluaient, autant la nouvelle économie « verte », tout en salissant, se cache derrière le discours vertueux de la responsabilité envers les générations futures.

« Je suis conscient que la réouverture des mines nécessite un immense courage politique et beaucoup de pédagogie. La transition énergétique a besoin de sauts de conscience et pas seulement de sauts technologiques. Nous nous sommes enfermés dans l'idée qu'avec quelques technologies de plus nous allons tout résoudre » (Pitron, 2021).

Il affirme que les engagements pris à l'issue de la 21^e conférence sur le climat de Paris (COP21), le 12 décembre 2015, comprenant, entre autres, le développement des énergies dites « vertes » comme l'éolien, le solaire, l'hydraulique... Et des mobilités décarbonées, basées sur les véhicules électriques, hybrides ou utilisant des biocarburants. Une avancée saluée comme historique à l'époque, s'est avéré une hypocrisie, un leurre aussi destructeur pour l'environnement que le charbon et les hydrocarbures.

De manière résumée, l'impact des technologies sur l'environnement : salinisation, acidification, érosion ou désertification des sols. Contribution au changement climatique et production de smog au-dessus des villes. Affectation de la biodiversité, provoquent une diminution de la variabilité génétique.

Au nom de la sobriété, du moindre impact de l'homme sur l'environnement, nous creusons toujours plus. Les plus productivistes pensent déjà aux océans et aux astéroïdes où le potentiel minier serait gigantesque. Les grandes puissances sont en train de s'approprier des endroits que la communauté internationale s'était juré de laisser à l'abri des appétits industriels. En 2015, Barack Obama a autorisé les citoyens américains à devenir propriétaires d'astéroïdes pour exploiter des gisements de métaux rares. C'est en rupture totale avec l'idée que l'espace est un bien commun de l'humanité.

Il y a lieu de rappeler qu'en 1998, les Etats-Unis ont été contraints de fermer la mine à ciel ouvert de Mountain Pass, en Californie, après que des milliers de litres d'eau radioactive aient été déversés dans la nature. En Mongolie intérieure, la radioactivité mesurée dans les villages près de la mine de Baotou serait 32 fois supérieure à la normale (contre 14 fois à Tchernobyl).

Le marché de l'extraction des terres rares est souvent pointé du doigt pour le manque de responsabilité sociale et environnementale des entreprises qui y sont actives.

Il va sans dire que pour l'Algérie qui prône la voie de l'économie verte n'a aucun intérêt à se lancer dans une aventure décriée actuellement par beaucoup de pays occidentaux du fait que l'extraction et le traitement des terres rares restent des activités à hauts risques, très polluantes et hautement radioactives pour l'environnement et très nocives pour la santé humaine et animale.

Les pays développés n'extraient pas de terres rares chez eux, car les dégâts environnementaux seraient considérables et les conditions de travail très difficiles et inacceptables pour l'opinion publique. Alors pourquoi l'envisager pour l'Algérie ? D'ailleurs, c'est précisément une des raisons qui avaient poussé ces pays à abandonner ces activités à la Chine qui contrôle actuellement 95% de la production des terres rares dans le monde.

2. Impact environnemental du numérique

Le numérique commence dans une mine, toute vie virtuelle procède d'abord par une entaille dans le sol (Pitron ; 2021)

On croit que le numérique n'a aucun impact matériel sur la planète, **c'est totalement faux. La pollution digitale est considérable, c'est bien pire que le trafic aérien** ; car elle représente 4% des émissions de gaz à effet de serre dans le monde. Et ce chiffre risque de doubler d'ici à 2025 ; mais que veut dire une pollution numérique ?

On parle d'impact environnemental pour désigner les effets produits par les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTICS). Aussi appelées pollution numérique, cet impact environnemental tente de prendre en compte la consommation d'énergie, l'extraction de minerais, le coût du transport...etc. jusqu'à la phase de recyclage d'un produit numérique. Cette évaluation se nomme "impact environnemental", qu'il soit positif ou bien négatif.

La pollution numérique désigne toutes les formes de pollution engendrées par les nouvelles technologies : émissions de gaz à effet de serre, pollution chimique, érosion de la biodiversité, production de déchets électroniques. Le gros de cette pollution a lieu en amont au moment de la fabrication du matériel. Lutter contre la pollution numérique c'est donc d'abord utiliser moins d'objets informatiques, et les faire durer plus longtemps. (Berthoud, 2017).

En général, le secteur numérique pollue. Enormément. Compte tenu notamment de sa consommation d'eau, d'énergie et sa contribution à l'épuisement des ressources minérales non renouvelables, ce secteur génère, une empreinte équivalente à deux ou trois fois celle d'un pays comme la Grande-Bretagne ou la France (Bordage, 2019).

Sur le volet énergétique, les TIC consomment environ 10% de l'électricité mondiale (Berthoud, 2017), soit l'équivalent de 100 réacteurs nucléaires. Si le numérique était un pays, il se classerait au troisième rang des consommateurs d'électricité derrière la Chine et les Etats unis (Pitron, 2019). En effet la consommation électrique du numérique augmente de 5 à 7% par an, et par conséquent, celui-ci pourrait solliciter 20% de l'électricité mondiale en 2025 (Lafage, 2019, in Pitron, 2021). Et le récent avènement de la 5G ne va pas faire redescendre la pression. On s'attend au contraire à un boom de certains usages, dont une grande partie pose la question entre un gain minime de confort et une facture énergétique qui explose.

Quant à la part des TIC dans les émissions globales de CO₂ elle pourrait doubler au même horizon. « *Nous ne nous rendons pas compte à quel point l'impact du numérique est énorme, c'est monstrueux, c'est grave !* » souligne Frédéric Bordage, fondateur de GreenIT.fr.

3. Les acteurs de la pollution numérique

Parmi les acteurs de cette pollution numérique, on retrouve :

3.1. Les data center

Un data center, ou data centre, (Fig.5) ou encore centre de données en Français, est une infrastructure physique sécurisée où sont réunis un ensemble d'éléments : du matériel informatique (comme des ordinateurs, des serveurs, des unités de stockage...), des équipements réseaux et de télécommunication (câbles, racks), ainsi que des systèmes de contrôles et de sécurité (climatisation, incendie) permettant le bon fonctionnement de l'ensemble. (Voir annexe 4 pour plus de détails sur les Data center).

D'après datacentermap.com on compte plus de 4800 data centers à travers le monde, répartis dans 127 pays dont plus de 1800 aux États-Unis. (Voir carte Data center dans le monde (Annexe 5).

Étant les garants du stockage et de la bonne transmission de l'information à travers le monde, les data centers ont leur part de responsabilité et sont pointés du doigt pour leur aspect énergivore. On estime qu'un centre de données de taille moyenne consomme autant qu'une ville de 40 000 habitants et cette électricité provient en grande majorité du charbon, les rejets de CO₂ des centres data sont donc conséquents

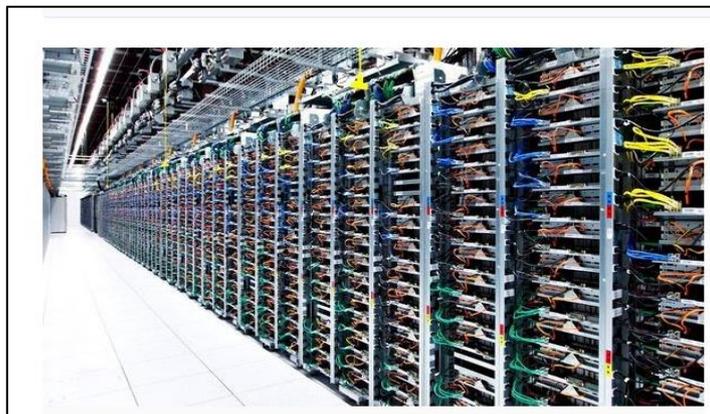


Fig.5 Un projet d'un Data-center de dimension internationale à Bouira (Algérie)
(Source : Google, 2022)

3.2. Les fabricants des équipements des utilisateurs

Les équipements des utilisateurs constituent la principale source d'impacts environnementaux, totalisant de 59 % à 84 % du total des impacts selon l'indicateur environnemental observé. Viennent ensuite le réseau et les centres informatiques. (Fig.5)

Avant d'arriver dans des magasins, les smartphones, ordinateurs et autres terminaux numériques ont parcouru des milliers de kilomètres et ont connu une chaîne de fabrication qui « Carbure aux énergies fossiles » : l'extraction minière de composants ; l'assemblage du produit fini à des milliers de kilomètres et leur transport vers le lieu de vente (Tableau 6).

Tableau 6- Répartition des impacts du numérique mondial en 2019

%	 Énergie	 GES	 Eau	 Élec.	 Ressources
Utilisateurs	60%	63%	83%	44%	75%
Réseau	23%	22%	9%	32%	16%
Centres informatiques	17%	15%	7%	24%	8%

Quel que soit l'indicateur observé, l'étape de fabrication des équipements utilisateurs est toujours la principale source unitaire d'impacts, suivie par leur consommation électrique. On note ensuite systématiquement, par ordre décroissant d'importance, la consommation électrique du réseau, puis des centres informatiques. Concernant la consommation d'eau et la contribution à l'épuisement des ressources abiotiques (hors énergie fossile), elle est très majoritairement (respectivement 83 % et 75 %) associée à la fabrication des équipements utilisateurs.

3.3. Le cinéma à la maison

Les vidéos en très haute définition aggravent la pollution numérique à deux niveaux : elles incitent à faire l'acquisition d'écrans plus grands et plus complexes (donc plus polluants) et demandent plus d'énergie pour être lues (car plus lourdes).

- ✓ Un épisode de 20 minutes de votre série préférée représente environ 230 MB.
- ✓ Attention, en HD, on passe à 1GB.
- ✓ Une heure de streaming vidéo équivaut à 14geq CO₂.

3.4. Le réseau internet, lui non plus, n'est pas « immatériel »

Il est composé d'une multitude d'équipements informatiques (ordinateurs, câbles, antennes, etc.), qui permettent de stocker et de transférer des données (vidéos, photos, e-mails, pages web, etc.) vers nos terminaux domestiques. Toutes ces technologies numériques doivent être fabriquées et alimentées, générant un coût écologique important (Fig. ci-dessus).

4. La pollution sous-marine

La longue histoire des technologies sous-marines

Le monde est entièrement connecté via des câbles sous-marins de différentes tailles, par lesquels transitent la plupart des télécommunications. Ceux-ci permettent une rapidité bien plus importante que les transmissions par satellite, et il est intéressant d'observer leur composition.

Nous nous connectons aujourd'hui à internet grâce à des câbles sous-marins, (Fig. 1 et 2) enfouis au fond de tous les océans et mers du globe. Et les chiffres donnent le tournis : 406 câbles sous-marins fonctionnaient début 2020, le plus court faisant 131 kilomètres, le plus long près de 20 000 kilomètres, en partant de Malaisie pour arriver en Californie. (Voir carte annexe carte mondiale des câbles sous-marins + Câbles). Selon l'ADEME, 28% des émissions de gaz à effet de serre émis par notre consommation du numérique

Le site submarinemap.com référence l'ensemble de l'infrastructure sous-marine nécessaire au bon fonctionnement d'Internet. Attention, c'est assez addictif. Installer de tels câbles nécessitent, comme on peut l'imaginer, de l'équipement lourd, et notamment des bateaux, qui n'avancent malheureusement pas avec la seule force du vent.

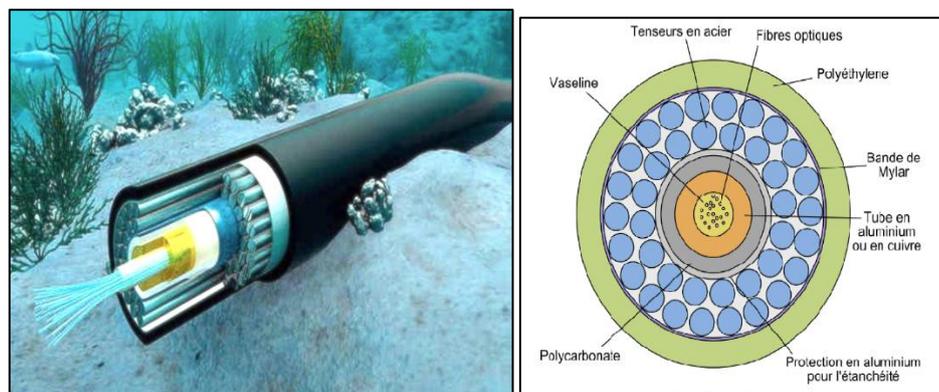


Fig. 6- Constitution d'un câble optique (Source : Science Post)

Les réseaux sociaux pour rester connecté avec Facebook, Instagram, Twitter ou TikTok : Ils sont devenus les incontournables pour regarder un film ou une série que ce soit sur notre ordinateur ou sur notre mobile : YouTube, Netflix, Amazon Prime, Disney Plus... Le streaming vidéo consomme plus que le streaming musical car en plus d'obtenir le son, nous avons l'image.

A savoir : « un utilisateur passe en moyenne 2 à 3 heures sur son smartphone et 20% de ce temps, connecté à des applications de messagerie et de communication ».

L'impact carbone d'un utilisateur de réseaux sociaux serait de 280 gEq CO₂ par utilisateur et par jour soit l'équivalent de 2,5 km en véhicule léger soit 102 kgEq CO₂ par an (914 km en voiture).

5. Le like

Du verbe anglais "like" introduit dans le champ lexical informatique il est beaucoup utilisé sur les réseaux sociaux pour dire que l'on apprécie quelque chose. Il est question « d'efficacité énergétique des infrastructures digitales », « de centres de données à très grande échelle » de « réseaux à fibres optiques à grande distance », d'« informatique en périphérie », des mots n'évoquant rien pour la majorité d'entre nous ; et pourtant sans eux, le quotidien de milliards d'humains serait bouleversé. En d'autres termes nous ne pourrions plus envoyer chaque jour des milliards de *Like* (le fameux pouce en l'air) sur Facebook, You Tube ou LinkedIn

Le *Like* est un petit peu le symbole de nos vies connectées. Pour que mon courriel ou message arrive au récepteur, Il suffit de Liker comme on dit dans le jargon numérique. Et le Like commence son voyage à travers les sept couches de fonctionnement d'internet (Fig.). La septième couche correspond au terminal de l'émetteur (ordinateur par exemple). Puis le message s'enfonce dans les strates intermédiaires du Net (couche liaison, couche réseau, couche transport, etc., (Annexe 6) jusqu'à atteindre la première couche physique d'Internet composée notamment de câbles sous-marins. Entre les deux, le message a emprunté l'antenne 4G d'un opérateur mobile ou un box internet (ou Wifi local), glissé le long des parties communes de l'immeuble pour atteindre les tuyaux de cuivre enfoui 80 centimètre sous les trottoirs. Puis parcourt les câbles qui filent le long

des grandes voies de communication (autoroutes, fleuves, chemin de halage, voies ferrées...) pour rejoindre d'autres Like dans les locaux techniques de l'opérateur. Puis c'est la traversée des mers et transit par un centre de données. Des tréfonds du Net, le Like a pris le chemin inverse jusqu'à la septième couche : le téléphone de notre correspondant qui était 'Liké'. Et même si ce collègue se trouve à deux mètres de nous, le message a en réalité voyagé sur plusieurs milliers de kilomètres.

Pour Pitron (2021), il existe bien une géographie du Like. En réalité, il a fait tout ce chemin-là, grâce à une infrastructure absolument colossale pour avoir des vies censément dématérialisées.

Quant à notre messagerie Gmail, elle sera stockée dans six endroits différents de la planète, dans six data centers pour que nous soyons proche d'un data center au monde où nous nous connectés. Et puis, pour qu'il y ait des centres de données qui assurent la continuité de service parce que si jamais il y en a un qui tombe en panne, ce serait insupportable d'attendre trois secondes de trop. Précaution, il va falloir tout redonder. Et donc tout cela, naturellement, c'est de la matière, encore des infrastructures à construire qu'il faut brancher au réseau. Et puis, il faut naturellement les refroidir puisque ça chauffe. Donc pour ça, il faut des systèmes de climatisation qui consomme de l'électricité. D'où vient l'électricité ? Il y a un coût énergétique, (Tabl. 2) un coût électrique et donc, forcément, un coût en termes de gaz à effet de serre. (Tab.3)

Tableau 7-Bilan énergie primaire (EP) due principalement à la production de l'électricité, puis des équipements utilisateurs (2019)

 Bilan EP	Fabrication	Utilisation	Total
Utilisateurs	30%	30%	60%
Réseau	3%	20%	23%
Centres informatiques	2%	15%	17%
	35%	65%	

Tableau 8 – Bilan émissions de gaz à effets de serre due principalement à la fabrication des équipements puis à la production de l'électricité. (2019)

 Bilan GES	Fabrication	Utilisation	Total
Utilisateurs	40%	26%	66%
Réseau	3%	16%	19%
Centres informatiques	1%	14%	15%
	44%	56%	

Il y a actuellement plus de 3 millions de data centers sur la planète qui consomment de l'eau pour les refroidir et de l'électricité. Nous produisons des quantités absolument astronomiques de déchets électroniques. 5.000 Tours Eiffel de déchets électroniques sont produites chaque année. L'énorme enjeu va être de savoir comment on recycle tout ça ?

Que peut-on retenir sur l'impact du numérique sur l'environnement ? Ça ne s'arrête pas aux émissions de gaz à effet de serre. Le numérique participe également à la pollution et à la destruction des écosystèmes. Des rivières détruites par l'exploitation de mines au Brésil. Des décharges à ciel ouvert remplies d'appareils numériques usagés au Congo. Ou encore des « villes-cancer » en Chine.

Les autres principaux impacts du numérique au sens large sont d'abord concentrés dans la phase d'extraction des matières premières et de leur transformation en composants électroniques qui jouent sur l'épuisement de ressources abiotiques qui sont toutes les ressources naturelles non renouvelables qui ont été fabriquées géologiquement il y a des centaines de millions d'années.

Après, on a tous les impacts liés au processus de transformation des matières premières en composants électroniques. Ça va être l'eutrophisation, le changement climatique, tout un tas d'impacts qui vont avoir un effet délétère sur la biodiversité et donc sur l'environnement.

Il n'y a pas que l'environnement qui est touché par l'extraction de ces ressources : Les ressources naturelles notamment les minerais sont de plus en plus rares. Aujourd'hui, les diamants de sang ont été remplacés par les minerais des conflits qui sont devenus des pierres rares qui permettent malheureusement de financer les guerres civiles, notamment en Afrique.

Pour conclure, reprenant cette sentence de Guillaume Pitron : *« C'est important de dire j'ai suivi la route du like au sens littérale du terme au sens propre du terme, je peux vous dire que l'IPad part à tel endroit du monde y passe par tel endroit du monde il ne suffit pas de dire le numérique pollue, mais j'ai senti cette pollution, j'ai goûté cette pollution, j'ai touché cette pollution ».*

6. Le téléphone portable (ou Smartphone) : impact sur l'environnement

Petit téléphone, gros dégâts

Le téléphone portable, sorte de mini radio qui envoie et reçoit des signaux UHF (ultra haute fréquence) de très faible puissance en utilisant de l'énergie, a révolutionné notre vie quotidienne en nous permettant de communiquer sans fil, partout où il y a un réseau de téléphonie mobile. (Voir la prédiction de Nicolas Tesla 1926 (Annexe VI).

Il est devenu un compagnon omniprésent dans notre quotidien. Comme tout produit industriel, un appareil a besoin de beaucoup de matières pour sa conception. En particulier dans le numérique. Le smartphone fait partie du quotidien. De plus en plus connectés, nous ne savons plus nous en passer pour téléphoner, mais surtout pour naviguer sur Internet, partager des informations sur les réseaux sociaux, prendre des photos, écouter de la musique, être guidé par GPS... Chaque année est marquée par l'arrivée de nouveaux smartphones, toujours plus à la pointe de la technologie : agenda électronique, appareil photo, navigateur Internet, baladeur, console de jeux, enregistreur vidéo et son, télévision, etc. Dans l'avenir, nouvelles fonctionnalités de localisation automatique (guidage pour piétons et informations locales), des systèmes de paiement (porte-monnaie électronique déjà utilisé au Japon) et devenir de véritables "couteaux suisses numériques" cumulant une multitude de fonctions.

Mais avons-nous déjà pensé aux impacts des smartphones ?

De sa fabrication à sa destruction en passant par son utilisation, ce petit bijou technologique à peine 60 grammes, très gourmand en énergie et en matériaux rares (Fig.) épuise autant de matières premières que l'extraction de 7,4 kg de cuivre, consomme autant d'énergie qu'un avion volant sur 57 km, dégage autant d'effet de serre qu'une voiture moyenne qui parcourt 85 km. Chaque téléphone nécessite pour sa fabrication de l'or, du cuivre, de l'argent et d'autres métaux précieux qui, s'ils ne sont pas recyclés, doivent être extraits du sol.

Un renouvellement trop rapide. Nous changeons notre téléphone en moyenne tous les deux ans. Pourquoi ?

► Effets de mode, publicités, offres promotionnelles... Nous sommes sans cesse incités à acheter un équipement neuf qui nous propose de nouvelles fonctionnalités et un nouveau design. ► Batteries collées ou soudées, absence de pièces de rechange, utilisation de systèmes d'exploitation exclusifs... Dans la plupart des cas, les smartphones ne sont pas conçus pour être réparables, compatibles et évolutifs dans le temps. ?

Quels impacts ?

Tout au long de son cycle de vie (de l'extraction des matières premières, en passant par sa fabrication, son transport, son utilisation et sa fin de vie), un smartphone a des impacts sur l'environnement, auxquels s'ajoutent des impacts sociaux et sanitaires. Les principaux impacts environnementaux des smartphones sont l'épuisement des ressources, les atteintes à la biodiversité dues aux rejets toxiques dans l'environnement et l'émission de gaz à effet de serre. La fabrication d'un smartphone (de l'extraction des minerais à l'assemblage final) est responsable d'environ trois quarts de ces impacts, qui sont en grande partie imputables à l'écran et aux composants

électroniques complexes (microprocesseurs, etc.). La distribution et l'utilisation du smartphone ont moins d'impacts. Ils sont essentiellement liés à l'énergie consommée pour le transport et la production d'électricité. L'étape de la fin de vie a des impacts variables selon que le smartphone est recyclé ou non. En utilisant notre smartphone le plus longtemps possible, nous évitons la production de nouveaux appareils et nous préservons l'environnement et les populations.

L'empreinte environnementale des smartphones est principalement due à l'extraction des minerais que l'on retrouve sous la forme de métaux dans les téléphones (Annexe VII).

L'exploitation des mines conduit notamment à la destruction d'écosystèmes et à de multiples pollutions de l'eau, de l'air et des sols.

Les activités métallurgiques et électroniques sont aussi très impactantes et énergivores. La fabrication des smartphones pose également problème d'un point de vue social et éthique. Les conditions de travail sont bien souvent déplorables et violent les droits humains fondamentaux. L'extraction des « minerais de sang » (étain, tantale, tungstène et or) conduit à alimenter des conflits armés aux dépens des populations locales. (Annexe VII).

En Chine, l'exploitation du néodyme, utilisé dans les aimants des smartphones, génère des rejets d'eau acide et des déchets chargés en radioactivité ainsi qu'en métaux lourds. Au Chili, en Argentine et en Bolivie, l'utilisation massive d'eau pour la production de lithium (métal présent dans les batteries des smartphones) provoque des conflits d'usages avec les populations locales, au point de compromettre leur survie. Selon l'UNICEF, plus de 40 000 enfants travailleraient dans les mines du sud de la République Démocratique du Congo, (Annexe VII) dont beaucoup dans des mines de cobalt et de Coltan, minerais stratégiques que l'on retrouve dans les batteries et les condensateurs des smartphones.

Des impacts croissants Plus la taille de l'écran d'un smartphone est importante, plus les impacts environnementaux sont élevés... Et la tendance est actuellement à des écrans de grande dimension. De plus, certaines fonctions augmentent encore l'impact environnemental : la multiplicité des modes de connexion, la haute définition de l'appareil photo et de la caméra qui sont systématiquement proposés dans un smartphone.



70 matériaux pour fabriquer un smartphone (Annexe).

Les technologies de fabrication ont beaucoup évolué ces dernières années. On sait fabriquer des téléphones extra plats et très sophistiqués, avec de plus en plus de fonctionnalités. Aujourd'hui, on trouve plus de 70 matériaux différents dans un smartphone (Annexe). Ces matériaux sont présents en petite quantité et leur alliage parfois complexe rend nombre d'entre eux difficiles à recycler. Une cinquantaine de métaux sont nécessaires pour fabriquer un smartphone, soit deux fois plus que pour un téléphone portable ancienne génération (Fig.). Or, ces métaux deviennent de plus en plus complexes à exploiter dans le monde.

Répartition du poids des matériaux dans la composition d'un smartphone

Métaux 40 à 60 %

Verre et céramique 10 à 20 %

Plastiques et matières synthétiques 30 à 50 %

80 à 85 % de métaux ferreux et non ferreux : cuivre, aluminium, zinc, étain, chrome, nickel...

0,5 % de métaux précieux : or, argent, platine, palladium...

0,1 % de terres rares et métaux spéciaux : europium, yttrium, terbium, gallium, tungstène, indium, tantale.

15 à 20 % d'autres substances : magnésium, carbone, cobalt, lithium...

Alors, que doit-on faire ? En tant que consommateur, nous pouvons agir en nous inspirant des conseils qui suivent.

✓ Ne pas se décider trop vite

- ▶ Prenez le temps de bien vous renseigner sur les offres de smartphones avant tout achat.
- ▶ Optez pour UN téléphone portable classique si vous n'avez pas besoin de naviguer sur le web et les réseaux sociaux.
- ▶ Évitez les téléphones avec de très grands écrans si vous n'en avez pas l'utilité.

✓ Acheter durable

- ▶ Achetez un téléphone d'occasion ou louez-le si vous n'en avez besoin que temporairement (par exemple pour des raisons professionnelles, dans le cadre d'un séjour à l'étranger...).
- ▶ Choisissez un modèle conçu pour durer: solide, démontable, évolutif... Assurez-vous que la batterie est remplaçable, que le téléphone dispose d'une connectique complète (port audio jack, port USB...) et d'un chargeur universel. Renseignez-vous auprès du vendeur sur la durée de disponibilité des pièces détachées et les conditions de garanties.

✓ **Prendre soin de son smartphone**

Cela peut sembler anodin, mais bien utiliser et entretenir son smartphone permet d'éviter jusqu'à 40% des pannes !

► Protégez votre téléphone avec une housse ou une coque et un film de protection pour l'écran. ► Laissez-le reposer quand il commence à surchauffer notamment après avoir utilisé longtemps un jeu ou le GPS.

✓ **Le réparer**

► Vous pouvez aussi essayer de le réparer vous-même à l'aide des tutoriels en ligne (iFixit, SOSav, Comment Réparer...) ou en participant à un atelier de coréparation comme un Repair

► Si votre téléphone a moins de 2 ans et qu'il tombe en panne, faites jouer la garantie légale auprès de votre vendeur.

► Si votre portable n'est plus sous garantie ou que les dommages ne peuvent pas être couverts, vous pouvez faire appel au SAV du constructeur ou vous rapprocher d'un réparateur indépendant. Un téléphone portable c'est beau c'est très beau un téléphone portable est-ce que qui est beau peut être sale, un téléphone est intuitif son mode d'utilisation est donc facile à utiliser, c'est pensé comme tel or ça cache toute la complexité de l'infrastructure qui elle-même et pourtant tout cela pollue tout cela a un impact écologique.

7. La voiture électrique : L'impact environnemental

Voiture électrique-ses avantages et inconvénients

La voiture électrique possède un ou plusieurs moteurs électriques, alimentés par des batteries, et se recharge chez soi ou à l'extérieur via une borne spéciale (dans la rue, des parkings, des stations-service). Moerman (2019)

Il existe également des voitures hybrides, qui possèdent un moteur électrique et un moteur thermique, ainsi que des hybrides rechargeables (ou plug-in) qui peuvent se recharger comme une voiture électrique (via une prise domestique ou une borne) et en roulant.

Est-elle le véhicule du futur ?

7.1. Avantages de la voiture électrique

7.1.1. Pas de polluants de l'air et pas d'émission de CO₂ à l'utilisation

Les voitures électriques ne rejettent pas de polluants dans l'atmosphère quand elles roulent. Pas de NO_x, particules fines, hydrocarbures imbrûlés et autre monoxyde de carbone, souvent

incriminés pour leurs impacts sur la santé. Il reste toutefois les émissions de particules venant des pneus et, dans une moindre mesure, des freins (grâce au freinage régénératif les freins sont moins sollicités que ceux d'un véhicule thermique).

Passer au véhicule électrique présente donc un bénéfice immédiat pour la qualité de l'air dans les villes et à proximité des routes.

Les véhicules électriques n'émettent pas non plus de CO₂ lors de l'utilisation. Le bilan carbone de la voiture électrique est meilleur que celui d'une voiture thermique (à essence ou Diesel).

7.1.2. Un bel avenir

- limiter le réchauffement climatique et respecter l'accord de Paris, diminution des émissions de 80 à 95 % d'ici 2050 (par rapport à 1990). Pour y arriver, il faut notamment réduire drastiquement l'utilisation des combustibles fossiles (diesel et essence) pour le transport ;

- diminuer le nombre total de véhicules en circulation et de produire l'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables (solaire, éolien...);

- le nombre de voitures électriques dans le monde (y compris les hybrides) devrait passer de 10 millions en 2020 à 150 millions en 2030 selon les politiques et mesures prévues par les États (notamment les engagements climatiques pris dans l'Accord de Paris). C'est le "Stated Policies Scenario". Un scénario plus volontariste, nommé "Sustainable Development Scenario", imagine une part de 30% de véhicules électriques parmi les véhicules neufs en 2030. Cela donnerait 225 millions de véhicules électriques (y compris les véhicules utilitaires) à cette date.

7.1.3. Silencieuse

Au démarrage et quand elle roule, elle est quasi silencieuse. Un véritable atout pour la quiétude des villes. Ce ne sont pas les habitants proches des grands axes qui le contrediront. Le hic : cela peut représenter un danger pour les piétons qui ne l'entendent pas arriver. Prudence donc !

7.1.4. Économique à l'utilisation

On sait que les véhicules actuels consomment théoriquement entre 13 et 25 kWh/100 km (cycle normalisé). Cela revient à un coût de 3,25 € à 6,25 € par 100 km (1 kWh coûte en moyenne 0,25€).

Un véhicule à essence ou diesel qui consomme théoriquement 5 l/100 km coûte quant à lui entre 6 et 7 € de carburant par 100 km.

7.1.5. Peu d'entretien

La voiture électrique demande peu d'entretien. Le système moteur est très simplifié par rapport à un véhicule thermique (essence, diesel ou gaz). Il y a cent fois moins de pièces en rotation, il n'y a pas de boîte de vitesse et pas d'huile à changer.

Grâce au freinage régénératif (on récupère une partie de l'énergie cinétique pour en faire de l'électricité), les freins sont beaucoup moins sollicités et les plaquettes doivent être remplacées moins souvent qu'avec une voiture thermique. Moerman (2019).

Par contre, il peut arriver qu'on doive changer la batterie de sa voiture électrique, après 1000 à 1500 cycles de recharge ou 8 à 10 ans. Le prix d'une nouvelle batterie est très élevé : 8100 € pour la batterie d'une petite voiture type Renault Zoe (52 kWh). Afin de limiter le coût de remplacement, certaines marques proposent de louer les batteries plutôt que de les acheter.

7.2. Inconvénients de la voiture électrique

7.2.1. L'impact de ses batteries

La production des batteries des voitures électriques pose de grands problèmes environnementaux et sociaux. On utilise de plus en plus de batteries au lithium pour les véhicules mais aussi pour leurs équipements informatiques et électroniques. Cela accroît la pression sur ce métal.

Le lithium – aussi surnommé or blanc – provient souvent d'Amérique latine. Sa production, très gourmande en eau, met à mal les écosystèmes et la survie des populations locales dans des zones où la sécheresse est déjà problématique.

Ces préoccupations restent d'actualité, même si l'efficacité des batteries évolue rapidement. Entre 2009 et 2016, elles sont passées de 100 Wh/litre à 350 Wh/litre, soit une capacité 3,5 fois plus élevée pour la même taille. Dans le même temps, leur prix a été divisé par trois. Tout indique que la performance des batteries va encore s'améliorer.

La capacité des batteries diminue au cours du temps. Quand leur capacité n'atteint plus qu'environ 75 à 80% de leur capacité, elles ne peuvent plus être utilisées dans les véhicules mais peuvent encore servir comme solution de stockage stationnaire (par exemple comme batterie domestique si on a des panneaux photovoltaïques).

Les batteries en fin de vie peuvent être un problème de gestion des déchets. Leur recyclage se développe progressivement, notamment avec Umicore en Belgique. À terme, une bonne partie des matériaux utilisés dans les batteries pourraient servir à en fabriquer de nouvelles.

7.2.2. La recharge reste une contrainte

Longtemps considérée comme un facteur limitant, l'autonomie des voitures électriques évolue de manière spectaculaire. De plus en plus de modèles proposent 300 km, voire 600 km d'autonomie avec une seule charge.

Une conduite agressive et l'utilisation du chauffage ou de la climatisation diminuent rapidement cette autonomie. Pour aller loin, il faut ménager sa monture !

Évidemment, plus d'autonomie signifie des batteries de capacité plus importante (jusqu'à 100 kWh), plus de poids, plus d'impact à la fabrication et plus de temps pour les recharger.

Une autonomie de 200 km suffit largement pour une utilisation quotidienne. Ce n'est que pour de plus longs trajets que le temps de recharge peut être handicapant, tant que le réseau de chargeurs rapides (de grande puissance) n'est pas suffisamment développé.

7.2.3. Le temps de recharge et la disponibilité des bornes

L'autonomie restant limitée, la facilité de recharge est un critère important. On peut charger sa voiture électrique à la maison via une prise normale ou sur une borne domestique, publique ou d'entreprise. Le nombre de bornes est en hausse mais reste restreint.

En ville, où l'on n'a pas nécessairement un garage, un réseau de bornes publiques facilite la recharge des véhicules.

Le temps de recharge d'un véhicule électrique moyen est très variable. Il dépend de la puissance disponible au point de recharge :

- à la maison, sur une prise classique de 3 kW il faut compter 5 à 6 heures pour recharger à 80% une batterie de 27 kWh ;
- avec une borne domestique (7 kW), la recharge prend deux fois moins de temps ;
- sur une borne de 24 kW en-dehors de la maison (parkings, supermarchés, stations-service...), la charge s'effectue en une heure ;
- avec une borne de 50 kW (mêmes types de lieux), la charge est ramenée à 30 minutes ;
- les super chargeurs de Tesla (120 kW), réservés à leurs utilisateurs, permettent une recharge de 80% en 40 minutes (la capacité des batteries est élevée, jusqu'à 100 kWh).

Le groupe Tesla vient d'annoncer que ses modèles S seraient dorénavant dotés de batteries dépassant 600 kilomètres d'autonomie et Elon Musk son patron promet, pour bientôt des batteries dotées d'une autonomie de 800 kilomètres. (Pitron, 2019).

7.2.4. Elle coûte cher à l'achat

Les constructeurs proposent de plus en plus de modèles mais le marché reste actuellement limité et les prix sont toujours très élevés par rapport à un véhicule classique.

Les voitures électriques coûtent plus de 30 000 € pour les modèles populaires en Belgique : Renault Zoe (32 600€ ou 24 400€ si l'on choisit la location des batteries), VW eGolf (33 000€), Nissan Leaf (36 500€), BMW i3 (40 700€). Seules la Smart Fortwo (24 000€), la Smart Forfour (24 500€) et la VW eUp (23 000€) descendent sous les 30 000€ !

Une voiture électrique d'occasion peut être une alternative intéressante, à condition qu'il ne faille pas changer la batterie.

Demain, tous en voiture électrique ? L'électrique : oui, à certaines conditions.

Si les émissions à l'utilisation d'une voiture électrique sont quasi nulles, on est cependant loin de la « pollution zéro ». Si l'on analyse le cycle de vie, une voiture électrique produit de 20g à 250g de CO₂/km suivant le mix énergétique utilisé pour produire l'électricité.

On ne pourra pas tous avoir une voiture électrique et rouler de la même façon qu'aujourd'hui, on ne ferait que déplacer les impacts : la voiture électrique est peu polluante à l'usage mais sa production reste problématique pour l'environnement, essentiellement à cause des batteries.

Ce type de voiture fait cependant partie des solutions. On doit diminuer la consommation d'énergies fossiles, vouées à s'épuiser et qui sont la cause principale du réchauffement climatique.

La voiture électrique a donc sa place dans une perspective de mobilité durable, mais uniquement en combinaison avec d'autres solutions telles que le vélo, les transports en commun, le covoiturage...

Chap. V les métaux rares au cœur des conflits commerciaux

Les « TR » ont suscité ces dernières années toutes les attentions des principaux pays industrialisés qui souhaitent désormais s'orienter vers la transformation digitale et la transition énergétique.

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

Rappelons que les « Terres rares » sont essentielles au développement des technologies modernes. Elles présentent des qualités naturelles exceptionnelles pour fabriquer une électricité propre et pour produire les nouvelles technologies de l'information et de la communication.

Ces productions nécessitent l'utilisation de métaux rares, la plupart de ces métaux sont mal répartis dans le monde, au grand avantage actuel de la Chine qui profite largement de cette forme de monopole pour attirer sur son territoire de nombreuses activités à fortes valeurs ajoutées dépendantes des métaux rares. Les conflits économiques, politiques, militaires peuvent surgir de cette rareté et des rapports de force entre les Etats.

1. Comment la Chine a pris le contrôle du marché des TR ?

Les technologies vertes et le numérique sont les nouveaux moteurs de la croissance chinoise, indispensables à la survie du Parti communiste. Pour assurer son avance industrielle, Pékin n'a pas hésité à s'appropriier les technologies occidentales. En échange d'un accès direct et illimité aux métaux rares, de nombreux industriels ont migré vers l'Empire du milieu. Les Chinois ont accédé à leurs laboratoires de recherche. Sous couvert de co-innovation, ils ont sinisé les brevets européens et américains. Grâce à ce chantage aux métaux, la Chine est devenue le leader mondial de la transition énergétique. Le pays est sorti de l'âge de pierre auquel les Occidentaux voulaient le cantonner.

2. Comment expliquer la suprématie chinoise dans la production des TR ?

Certains atouts ont joué en faveur de cette suprématie. Tout d'abord :

- ✓ les gisements chinois sont plus riches en TR et plus faciles à exploiter. Mais l'explication ne s'arrête pas là ;
- ✓ la recherche minière est de plus en plus onéreuse : l'ère de l'exploitation des gisements faciles est révolue ;

- ✓ les opinions publiques sont de plus en plus sensibles au respect des conditions de travail et aux impacts environnementaux engendrés par ces activités ;
- ✓ la raréfaction du crédit ne facilite pas l'investissement dans de nouvelles campagnes de prospection. Pour finir, entre le moment où on signe un contrat d'exploitation et la production du 1^{er} kg, il se passe entre 8 et 12 ans quand tout va bien (Selon Georges Pichon, PDG de Mars Métal).

En l'état actuel des choses, la Chine est le seul état capable de déplacer une main d'œuvre abondante, rémunérée selon le niveau en vigueur dans ce pays, dans des conditions sanitaires, sociales et environnementales sont totalement inacceptables dans les pays occidentaux. Ernoult (2018)

La Chine elle-même fait la chasse aux métaux rares dans le monde entier, aussi bien au Canada qu'au Pérou, mais surtout en Afrique. Elle conduit une guerre des prix qui rendent les mines concurrentes moins exploitables à court terme, ce qui conduit souvent les entreprises minières étrangères à la faillite. Ensuite, elle les rachète à bas prix, souvent grâce à des combinaisons financières difficiles à déceler. Enfin, elle s'invite dans le capital de sociétés concurrentes, notamment au Groenland, au Kirghizstan et même aux Etats-Unis. Il s'agit d'une stratégie d'entrisme, de dumping et de contrôle des terres rares peu conforme aux règles de l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC), dont on ne verra les résultats de contrôle des « Terres rares » que dans une décennie, si les autres États ne réagissent pas à temps.

Au début des années 1990, la Chine a commencé à vendre des TR à prix cassé. Les mines californiennes qui fournissaient la majorité du marché, ont dû fermer leurs portes dans les années 2000. Les autres pays qui disposent des ressources, notamment la Russie, le Groenland, le Canada, le Vietnam, les Etats-Unis, et même la France en ont abandonné ou négligé l'exploitation. Seule maître à bord, la Chine fait désormais sa loi sur le marché.

Résultat : elle concentre aujourd'hui 95 % de la production mondiale de TR, alors qu'elle n'en détiendrait que 36 % des réserves. La situation pourrait changer d'ici une décennie, car la Chine pourrait décider de réserver l'ensemble de sa production de TR à ses seules entreprises, tant la demande de son industrie est importante. Les mines d'autres pays pourraient rouvrir.

Depuis une quinzaine d'années, la Chine a mis en place une politique où elle restreint ses exportations de minerais bruts pour garder la valeur ajoutée. Elle ne veut plus de la ligne colonialiste où les occidentaux n'iraient chercher que la matière et la transformer chez eux.

La Chine met des quotas à l'exportation, mais donne un accès illimité aux entreprises qui viennent s'installer dans le pays.

Elle convoite l'aval de la filière, c'est-à-dire les industries des hautes technologies utilisatrices de TR. Elle demande à ces entreprises d'apporter les structures industrielles, les emplois, le savoir-faire, les laboratoires de recherche et développement. Et elle utilise ces connaissances pour son développement. Alors qu'à la fin de la décennie 1990 le Japon, les États-Unis et l'Europe concentraient 90 % du marché des aimants, la Chine contrôle désormais les trois quarts de la production mondiale !

Devenue productrice prépondérante de certains métaux rares, la Chine avait désormais l'opportunité inédite d'en refuser l'exportation vers les États qui en avaient le plus besoin.

Dans un rapport alarmant (sur plus de deux cents pages), le United States Geological Survey (USGS) informe que Pékin produit 44% de l'indium consommé dans le monde, 55% du vanadium, près de 65% du spath fluor et du graphite naturel, 71% du géraniums et 77% de l'antimoine, 95% pour les TR (Mineral Commodity Summaries, U.S. Geological Survey, 2017).

Sombre conclusion pour Bruxelles : « La Chine est le pays le plus influent en ce qui concerne l'approvisionnement mondial en maintes matières premières critiques ».

Dans le sillage de la Chine d'autres États appliquant une logique de spécialisation minière ont également acquis une des positions majoritaires voire monopolistique : RDC, l'Afrique du Sud, le Brésil, les États-Unis, la Russie...

Pour Pékin, cette main basse sur les MR est d'abord une question de survie. C'est le pays le plus soucieux de ses approvisionnements. Il n'est pas seulement le premier producteur de minerais de la planète, il est aussi le principal consommateur.

Les TR donnent à la Chine un énorme levier politique et économique face aux États-Unis. La guerre commerciale entre les deux géants s'est intensifiée depuis que l'administration Trump a interdit aux sociétés américaines de vendre des technologies à Huawei. Cette décision pourrait mettre en péril le numéro deux mondial des smartphones, bientôt privé d'un approvisionnement crucial en puces électroniques. En cas d'escalade des tensions commerciales entre les deux grandes puissances signifiait que Pékin pouvait, en représailles, suspendre l'exportation de TR à destination de son rival.

En lançant une guerre contre la Chine, les États-Unis courent le risque de perdre un approvisionnement en matériaux vitaux pour leur puissance technologique » (Xinhua, 2019, in Pitron, 2019). Ces menaces ont créé un vif émoi parmi les pays occidentaux. Les intimidations chinoises ont jeté la lumière sur certaines faiblesses de l'arsenal militaire américain puisque les

missiles intelligents, les chars Abrams et les jets furtifs F-35 sont truffés de ces métaux (Pitron, 2019).

Si Pékin s'était jusque-là limité à des sous-entendus, le ton est brutalement devenu plus menaçant. «Si quelqu'un veut utiliser des produits fabriqués à partir de nos exportations de TR pour freiner le développement de la Chine, alors je pense que (...) le peuple chinois sera mécontent», a mis en garde un responsable de la puissante agence de planification économique (NDRC).

Ayant pris conscience de cette « vulnérabilité stratégique pour son économie et son armée » la Maison Blanche a posé les jalons d'une diversification de ses approvisionnements. « Notre dépendance à la Chine nous coûte des emplois, fragilise notre compétitivité et nous place dans une situation désavantageuse sur le plan géopolitique ».

Même les Etats-Unis exportent des TR vers la Chine pour y être transformées. Signe de la vulnérabilité américaine, les TR devraient être exclues des prochaines hausses de droits de douane visant la quasi-totalité des produits chinois aux Etats-Unis.

Les Chinois ont bien l'intention de gagner la bataille sur l'aval de toutes les technologies du futur et cela fonctionne. Le pays est déjà le leader des technologies vertes dans le monde. Il s'agit du premier producteur d'énergies vertes au monde, du premier fabricant d'équipements photovoltaïques, de la première puissance hydroélectrique, du premier investisseur dans l'éolien et du premier marché mondial des voitures à nouvelles énergies.

L'enjeu est donc à la fois géopolitique et environnemental. La Chine est aujourd'hui incontournable pour s'approvisionner en TR. Bien qu'il existe de nombreux gisements de TR dans le monde, ils ne sont pas (encore) exploités, ce qui explique la mainmise de la Chine sur ces ressources. Or, il faut environ 25 ans entre le début d'un projet de mine et le début de son exploitation.

Le monde est donc dépendant à court terme de la volonté chinoise de le fournir en TR puisque la mise en production d'autres gisements demande un temps long et incompatible avec les cycles industriels. La Chine a aussi le quasi-monopole sur d'autres métaux rares. Elle

Impose des quotas et des embargos. Parce que leur extraction a un impact toxique sur l'environnement. Un peu comme les pétroles de schistes, mais en plus grave.

La Chine possède un levier politique et économique redoutable : les TR, des métaux indispensables à l'industrie et dont elle contrôle la quasi-totalité de l'approvisionnement

mondial. de ces métaux indispensables à de nombreuses industries, Pékin détient une arme redoutable dans sa guerre commerciale contre Washington.

Elle s'en est d'ailleurs servie comme levier de pression dans le cadre des tensions avec le Japon à propos des îles Senkaku/Diaoyu. Après un incident survenu le 7 septembre 2010 entre un chalutier chinois et un patrouilleur japonais dans les eaux de ces îles. Deux semaines plus tard en guise de représailles, les Japonais virent leur approvisionnement en TR coupé du jour au lendemain. Cela représenta une catastrophe pour l'industrie high-tech nipponne (Pitron, 2019)

« *La Chine a toujours mis en œuvre une stratégie consistant à utiliser ses ressources naturelles comme un moyen de pression politique* » assure un importateur de MR. « L'industrie nipponne était en état de panique, les TR sont les vitamines de son industrie high-tech. ». Le banal incident maritime se transformait en catastrophe pour Tokyo.

La crise prit bientôt une dimension mondiale ; les médias occidentaux s'emparèrent du sujet. Les commentateurs soulignent les « tensions internationales », le bras de fer entre la Chine et le Japon. La guerre des terres est ouverte.

Face à ce constat, pour répondre aux besoins mondiaux qui ne cessent d'augmenter et, par conséquent, atténuer les effets du monopole chinois, plusieurs compagnies minières souhaitent une diversification des sources d'approvisionnement : les Etats-Unis ont ainsi décidé en 2013 de réactiver la mine de Mountain Pass, le Canada, l'Australie et l'Afrique du Sud multiplient les projets d'extraction et de prospection, y compris dans les fonds marins du Pacifique. Groënland, le plus gros gisement hors de Chine, en attente de permis d'exploitation.

Chap. VI Recyclage et Substitution des terres rares

1. Le recyclage : pourquoi recycler ?

Recycler plutôt que produire, voilà ce que proposent de nombreux chercheurs pour faire face à l'accroissement de la demande en terres rares.

Plusieurs raisons ont fait de s'orienter vers le recyclage et la substitution. En effet l'extraction des minéraux s'est avérée à la fois économiquement onéreuse et fortement impactante sur l'environnement.

D'autant plus que le recours au recyclage des métaux demanderait plus de dix fois moins d'énergie que son obtention par extraction minière.

D'autre part la Chine venait de décréter une réduction drastique de ses exportations de terres rares, substances indispensables à l'industrie, principalement dans le domaine des technologies innovantes.

Devant la réduction des exportations chinoises, la résistance s'organise : des initiatives se multiplient pour étudier la faisabilité du recyclage des terres rares ou le recours à la substitution.

Parmi les secteurs d'activités étudiés, l'électronique est un domaine où les cycles de matières non-fermés sont courants.

Une solution serait donc de recycler les déchets électroniques pour en extraire les terres rares et les réutiliser, même si la récupération d'éléments en si faibles quantités n'est pas chose aisée.

1.1. Le recyclage : sous conditions techniques et économiques

Le recyclage dépend étroitement des conditions techniques et économiques, car il ne concernera qu'un nombre limité de produits. Son intérêt varie selon les produits et les conditions techniques et économiques.

Selon Graedel et *al.*, (2011) le recyclage des Terres Rares est encore limité. Ils estimaient que moins de 1 % des Terres Rares étaient recyclées.

La combinaison de ces facteurs techniques et économiques pèsera sur la décision de recycler. L'expérience de Solvay, présentée par Alain Rollat, montre combien les éléments techniques et économiques peuvent se combiner, et comment le recyclage, possible et souhaité à un moment donné ne l'est plus lorsque les conditions économiques ont changé.

Solvay³, qui avait commencé à recycler les poudres de luminophore qui tapissent les verres des lampes basses consommation, vient d'arrêter ce type d'activités qui ne sont pas suffisamment rentables.

Le recyclage de produits en fin de vie est rendu difficile par des quantités souvent très faibles

Selon Laurent Forti, responsable Programmes, IFP Énergies nouvelles (IFPEN), le recyclage « marche très bien quand il y a du platine ou des matériaux très chers, moins bien quand on est sur des nickel-cobalt, dont les cours peuvent varier. Investir dans un système de recyclage peut devenir économiquement rentable pendant un temps et beaucoup moins pendant un autre ».

Le recyclage n'est possible économiquement que si les prix sont suffisamment élevés pour le rendre rentable (les produits recyclés doivent être moins chers que les produits originaux de même qualité, ce qui dépend à la fois du coût du recyclage et du prix du marché des matières premières). La volonté de recycler dépend donc profondément de la valeur économique des matériaux recyclés.

En outre, il ne faut pas confondre recyclage et démantelage, comme le montre l'expérience de Solvay, qui recyclait des terres rares provenant essentiellement des véhicules automobiles usagés et des D3E (déchets d'équipements électriques et électroniques). Les pots catalytiques y étaient systématiquement démantelés pour en récupérer les métaux précieux mais la récupération des terres rares n'était pas intéressante économiquement. Les terres rares sont donc perdues pour l'industrie automobile et deviennent un déchet utilisé dans les cimenteries.

Les aimants, par contre, se collent à la partie ferreuse et suivent la filière des métaux ferreux en métallurgie, et dans la purge de la sidérurgie (le laitier).

Techniquement, il ne serait pas impossible d'envisager un recyclage des terres rares et d'avoir des concentrations suffisantes, mais le coût d'une telle opération est élevé. Il faut donc, pour Solvay des systèmes incitatifs qui n'existent pas actuellement en France.

C'est pourquoi le recyclage ne représente, actuellement, que 1 % en moyenne de la plupart des métaux rares et critiques dont les terres rares, selon le Panel international pour les ressources des Nations unies, ce faible pourcentage tient aussi à l'évolution de la demande. Si celle-ci est très forte, le recyclage n'aura qu'une importance marginale. Le recyclage sera toujours insuffisant dans une économie en croissance, ce qui relativise l'apport de la mine urbaine, comme le remarque Julienne (2022), « *ce n'est pas en recyclant une mine urbaine ou des décharges industrielles ou autres que l'on pourra subvenir aux besoins de l'industrie. D'après mon expérience, le recyclage*

³Solvay est un groupe belge de chimie fondé en 1863.

est économiquement moins intéressant qu'une mine naturelle ». « *Il faut bien comprendre qu'il y a un savant équilibre entre les prix de marché et les coûts du recyclage. Si les prix sont trop bas, le recyclage est inutile ou en tout cas non économique. Dans ce cas-là, on en revient à la mine. La mine industrielle est donc absolument nécessaire* ».

Il faut enfin que la collecte des biens recyclables soit organisée de manière suffisamment efficace pour que les produits disponibles le soient en quantité suffisante. L'exemple des éoliennes est à cet égard pertinent : elles ne sont pas encore en fin de vie. La récupération des terres rares qu'elles contiennent ne pourra donc se faire que dans plusieurs années.

Lors du boom des matières premières en 2011, Solvay a utilisé deux critères pour déterminer la faisabilité d'un recyclage des différents types de produits à base de terres rares :

- ✓ le premier concernait la concentration à laquelle on était capable d'obtenir ces produits ;
- ✓ le deuxième concernait la valeur intrinsèque et notamment, outre la concentration, le type de terres rares contenu.

À partir de ces deux critères, trois types de produits sélectionnés en tant que projet de recyclage : les aimants, les batteries Nickel Metal Hydrure en collaboration avec Umicore (Umicore traitait pour récupérer les nickels et nous en récupérons les terres rares) et, enfin, les poudres luminophores venant des lampes basses consommation ». Mais ces critères sont évolutifs. À l'époque, l'euporium et le terbium, les deux terres rares les plus chères contenues dans les poudres luminophores valaient plus de 3 000 dollars le kilo, voire à un moment donné, au-dessus de 5 000 dollars le kilo. Aujourd'hui, ces deux produits sont en dessous de 500 dollars par kilo. À ces prix, Solvay ne peut plus recycler.

1.2. Le recyclage : une réalité économique

Presque un quart des déchets d'équipements électriques et électroniques (les D3E) sont actuellement recyclés. Sur un total mondial de quarante-trois millions de tonnes, dix millions de tonnes sont traitées, dont trois millions au sein de l'Union européenne, trois millions en Chine, le reste se répartissant entre les États-Unis, le Japon et les autres pays. (Hetzel ; et Bataille, 2016).

Les sociétés sérieuses qui en sont les acteurs sont peu nombreuses : il y en a trois en Europe (Aurubis, Umicore et Boliden), quatre au Japon et une en Corée. En revanche, en Chine, « des bricolages se font dans des arrière-cours avec de l'acide. On sort un peu les métaux précieux et le reste est jeté, brûlé ou perdu ».

Selon Christian (2021), les terres rares utilisées dans les aimants permanents sont de plus en plus recyclées, notamment au Japon qui en recycle le tiers. L'or reste en conséquence la matière première la plus recyclée, du fait de sa valeur.

Dans certains cas, le recyclage est très important pendant un certain temps.

C'est le cas des lampes à base de luminophores LED, évoqué par Guyonnet (in Hetzel ; et Bataille, 2016), « qui contiennent du terbium, de l'euprium, de l'yttrium. L'évolution est très rapide. La part de recyclage peut être importante. Il a été calculé qu'à l'horizon 2020, ce qui sera recyclé pourrait représenter 50 % des besoins d'approvisionnement, parce que ces besoins baissent ».

1.3. Les raisons peuvent être techniques :

Il n'y a que quelques grammes, difficiles à isoler, dans les téléphones portables.

Pour Renault, seuls les hauts parleurs de radio et les moteurs de conduite assistée pourraient justifier un démontage préalable avant leur récupération pour recyclage des aimants permanents (Annexe voiture).

Pour les produits émanant de la mine urbaine, la complexité des systèmes et techniques en rendent le démontage difficile.

Ces difficultés sont notamment dues à la présence de plastiques organiques dans les voitures ou les appareils électroniques. Or, comme le souligne Christian (2016), « les métallurgies classiques sont absolument réfractaires aux organiques ».

Certains métaux peuvent être antagonistes. Dans certains cas, l'hydrométallurgie est inadaptée car elle entraîne une quantité de déchets ultimes très importante sans que l'on ait pu récupérer les métaux recherchés. Certains éléments sont irrécupérables, soit du fait de la miniaturisation – notamment dans les micromoteurs et les aimants permanents –, soit à cause des colles employées. Cette tendance sera aggravée par l'utilisation des nanotechnologies.

Certains métaux sont recyclés de manière quasi optimale, les produits en résultant ayant un niveau de pureté élevé.

Lorsque le recyclage est impossible du fait de données techniques, il faut trouver des technologies de rupture. Mais comme l'indique Christian (2016), il faut qu'elles soient rapides (car les métaux ont des histoires assez courtes), et qu'elles ne demandent pas des sommes considérables. « Il ne s'agit pas de partir sur des développements qui durent quinze ans, mais qui durent entre deux et cinq ans. On ne va pas investir un milliard d'euros pour accéder au tantale ou au cobalt, par exemple ».

1.4. Le recyclage à l'origine de la création de nouvelle filière dans l'éolien.

Dans l'éolien, il peut permettre la création d'une nouvelle filière. C'est l'objectif de Siemens⁴, qui entend favoriser le développement d'une filière de recyclage pour pouvoir réutiliser les terres rares

⁴ Groupe international d'origine allemande spécialisé dans les secteurs de l'énergie, de la santé, de l'industrie et du bâtiment fondé en 1847 par Werner von Siemens.

des aimants permanents de leurs éoliennes. Frédéric (2016) « *les terres rares mises en œuvre dans les éoliennes sont facilement traçables et en quantité suffisamment significative pour pouvoir développer une filière de recyclage. Des unités de recyclage sont actuellement en construction en vue de la gestion de fin de vie des aimants permanents. Nous estimons que nous pourrions atteindre un taux de 90 %* ».

Il peut être un élément de sécurisation d'une partie des approvisionnements. Pour Schulz (2016), le recyclage est un « levier de sécurisation ».

L'économie circulaire compétitive, non pas le recyclage pour le recyclage, est un des leviers essentiels pour nous aider à mieux sécuriser l'ensemble de nos approvisionnements.

Un véhicule conventionnel de Renault, essence ou diesel, contient de 11 kg à 12 kg de cuivre, un véhicule électrique 35 kg, donc des quantités importantes. En conséquence, l'industrie automobile consomme aujourd'hui environ 4 %.

Le Panel International pour la Gestion Durable des Ressources du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) s'est penché sur les stocks mondiaux de métaux dans la société et les taux de recyclage (mai 2010). Ce rapport indique clairement que, devant la pression sur les ressources naturelles grandissante, la meilleure manière de limiter l'impact environnemental de l'activité minière est de développer le recyclage en considérant les stocks de métaux comme de véritables mines hors-sol (Annexe VII).

L'intérêt du recyclage n'est plus contesté, même s'il n'est pas une panacée.

Les produits recyclés doivent être comparables aux produits originaux, ou tout au moins avoir une qualité suffisante pour leurs consommateurs. Ils doivent en outre être conformes aux normes internes des grands groupes industriels.

Le groupe Renault recycle également 70 000 pots catalytiques en France, dont plus de la moitié vient des véhicules en fin de vie, pour en récupérer le platine, le palladium et le rhodium. Il pourrait en recycler davantage, mais près d'un véhicule sur deux qui arrive dans un centre de démolition n'a plus son pot catalytique.

Dans d'autres cas, son intérêt varie selon les produits et les conditions économiques.

2. La substitution

Substituer : mettre quelque chose, quelqu'un à la place de quelque chose, quelqu'un d'autre, pour faire jouer le même rôle.

Dans le cas des technologies de la transition écologique ; de l'information et de la communication (TIC) les substitutions sont difficiles, voire impossibles : cela demanderait de revoir complètement les produits.

Ceci que fait que la substitution reste encore balbutiante et fait l'objet de nombreuses études

C'est ainsi que très tôt, l'Union européenne et la France se sont dotées d'un arsenal juridique conséquent pour obliger les industriels non seulement à recycler leurs déchets électroniques mais aussi à développer toutes les formes de substitution aux métaux rares.

Selon Hocquard, (2022), la substitution d'un métal ou d'un alliage par un autre n'est pas seulement dictée par le prix de la matière première. La mise en forme et l'assemblage avec les autres matériaux, le poids, la performance, les réglementations environnementales ou encore les risques d'approvisionnement (terres rares, antimoine, indium, etc.) sont autant de contraintes qui pèsent sur le choix de l'utilisation d'un métal.

Certaines technologies arrivent à substituer les terres rares. Par exemple, le véhicule électrique : certains constructeurs comme Toyota utilisent du néodyme dans la construction de leurs modèles électriques, tandis qu'à l'inverse, Renault est parvenu à s'en affranchir pour la Zoé.

En 2011, le Japon a annoncé la réduction significative de sa consommation de terres rares, en particulier du cérium et du lanthane servant au polissage des écrans plats, en diminuant les quantités de terres rares utilisées et en augmentant leur durée d'utilisation.

S'agissant d'installation d'éoliennes certains prévoyaient une pénurie du dysprosium en cas de développement important des grandes éoliennes (une éolienne nécessitait, jusqu'à présent, 600 kg de dysprosium par Mégawatt/heure d'énergie).

Les projets ambitieux de développement d'éoliennes se heurtaient à l'insuffisance quantitative de cette terre rare qui, contrairement à beaucoup d'autres, est véritablement rare. Or Siemens vient d'annoncer avoir trouvé une nouvelle technologie de conception des éoliennes qui ne nécessitera plus de dysprosium. Si cette technologie se répand, le marché de ce produit va en être transformé. L'intérêt de la substitution n'est pas contesté, mais elle peut se heurter à des obstacles :

- ✓ l'écoconception et la recherche de produits de substitution se posent en termes identiques pour les terres rares comme pour les matériaux stratégiques et critiques.
- ✓ la substitution est réalisable techniquement dans plusieurs cas. Mais les produits substitués ont-ils la même utilité ? Quel est le coût de cette substitution ?

Laurent Forti, (in) IFPEN, pose le problème : « *substituer ces matériaux critiques ou stratégiques ou ces terres rares par d'autres matières, mais qui sont moins performantes, est un enjeu* ».

Pour Guillaume Pitron, journaliste, membre de Global Links, il existe certains substituts aux terres rares, et notamment au cérium, utilisé pour les écrans. On peut aussi utiliser moins de néodyme dans les alliages néodyme fer bore.

Renault a choisi pour ses voitures électriques un moteur asynchrone à rotor bobiné qui utilise beaucoup de cuivre mais pas de terres rares, ce qui élimine le risque d'approvisionnement. On notera que le record de vitesse de l'automotrice à grande vitesse (AGV) d'Alstom tient à la possibilité de mettre les moteurs directement sur les bogies grâce à la réduction de taille due aux aimants permanents.

La substitution n'a cependant d'intérêt que si elle permet d'obtenir des produits de qualité suffisante et que si elle est possible technologiquement ; Elle est donc très étroitement liée à la recherche, à son financement, et à la capacité de mener cet effort de recherche dans la durée.

Conclusion

A travers nos investigations nous avons pris connaissances de ces éléments minéraux affublés de terres rares. Nous avons appris que ce sont 17 éléments du tableau de Mendeleïev dotés de propriétés magnétiques et que grâce à eux qu'on peut se défaire des énergies fossiles responsables de pollution vers une transition énergétique propre efficiente, un monde "vert" sans oublier leur transition numérique.

Ce sont en grande partie elles qui ont permis les progrès technologiques dans le numérique et les énergies renouvelables

Aucun domaine ne se passe aujourd'hui des TR, leur propriété physico-/chimiques spécifiques les rendent indispensables à la construction des smartphones, des éoliennes et des voitures électriques, sans parler des sous-marins nucléaires et des avions de chasse. Ils ne sont pas si rares, puisque l'on en trouve en Amérique, en Australie, en Asie et même en Europe. Mais dont la production est grandement contrôlée par un nombre restreint de pays dont les principaux sont la Chine, la Russie, la République Démocratique du Congo et le Brésil. Ce qui est à l'origine de crises et tension entre Etats.

Nous avons appris aussi que l'extraction minière est parfois violente et dangereuse, tant pour les êtres humains - les mines de terres rares ont causé plusieurs milliers de morts - que pour la nature, et ce pendant de très nombreuses années. Le drainage minier acide est ainsi responsable de déversements d'acide sulfurique, ayant entraîné des pollutions chroniques, ou engendré des dépenses de dépollution considérables, afin d'éviter des catastrophes encore plus graves

Les méthodes de séparation utilisées aujourd'hui font appel à 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.

Les pays développés n'extraient pas de terres chez eux car les dégâts environnementaux sont considérables et les conditions de travail très difficiles et inacceptables pour l'opinion publique. C'est une des raisons qui avait poussé ces pays à abandonner ces activités à la Chine qui contrôle actuellement 95% de la production mondiale.

Cette situation paradoxale nous laisse conclure que nous sommes devant un dilemme. Il y a ceux qui peinent à l'extraction avec tous les maux qui en découlent et ceux en aval qui tirent les marrons du feu, profitons d'une énergie propre à partir de produit sales.

Il convient donc de changer de regard, en anticipant une raréfaction des métaux et en cessant d'utiliser sans retenue des matériaux dont nous savons qu'ils ne sont pas inépuisables.

Quelques mesures simples permettraient de réduire considérablement l'empreinte environnementale du numérique mondial à l'horizon 2030.

- ✓ Réduire le nombre d'objets connectés en favorisant leur mutualisation et leur substitution et en ouvrant leurs APIs
- ✓ Réduire le nombre d'écrans plats en les remplaçant par d'autres dispositifs d'affichage : lunettes de réalité augmentée / virtuelle, vidéo projecteurs LED, etc.
- ✓ Augmenter la durée de vie des équipements en allongeant la durée de garantie légale, en favorisant le réemploi, et en luttant contre certaines formules d'abonnement.
- ✓ Ne cédez pas aux sirènes de la publicité.
- ✓ Tant que votre appareil fonctionne, pas besoin d'en acheter un nouveau.
- ✓ Limiter la très haute définition des vidéos.
- ✓ Penser à tout éteindre la nuit et durant vos absences.
- ✓ Faire le mélange dans la boîte mail, en supprimant notamment les spams.
- ✓ Eviter les LED connectées qui continuent de consommer de l'énergie lorsqu'elles sont en veille.

Références bibliographiques

Barreau B ; Hossie G et Lutfalla S. 2013.

« Approvisionnement en métaux critiques : un enjeu pour la compétitivité française », France stratégie (ex-commissariat général à la stratégie et à la prospective)

Disponible sur : www.archives.strategie.gouv.fr

Berahino B. 2020

Burundi, premier producteur de terres rares en Afrique

Correspondant permanent - Afrique de l'Est 18 novembre 2020

Berthoud F. 2017

Quand les TIC rencontrent l'environnement et la santé

Bordage, F 2019

« Sobriété numérique : les clés pour agir », Buchet-Chastel, 2019

Boughriet R 2013

UE : huit métaux stratégiques sous le risque de pénurie.

<https://www.actu-environnement.com/ae/news/JRC-rapport-metaux-strategiques-terres-rares-europe-penurie-energie-19901.php4>

Braux C ; Labbé J-F ; Audion A-S ; Chrismann P ; Hocquard C ; Le Gleuher M ; Leuret P ; Uvois M. 2012

-Appui aux politiques publiques et intelligence économique pour les ressources minérales au BRGM, activité 2011. Rapport final BRGM/RP-61052-fr ? 50 P.1 fig., 1 tab. 3 ph. 1 annexe

Bru K., Christmann P., Labbé J.F., Lefebvre G. 2015.

Panorama mondial 2014 du marché des Terres Rares. Rapport publicl. BRGM/RP-64330-FR. 193 p., 58 fig., 32 tab.

Bruno D. 2021

À l'aube de la 6^e extinction. Comment habiter la Terre. Ed. Grasset. Paris. 352 p.

Charles N., Tuduri J., Lefebvre G., Pourret O., Gaillard F., Goodenough K., 2021.

Un potentiel minier remarquable mais tabou ? Sophie Decrée ; Philippe Boulvais. Ressources métalliques : cadre géodynamique et exemples remarquables, ISTE Science Publishing Ltd ; Wiley, 2021. fihal-03138953

Christian T. 2021

Récupérer les métaux précieux dans les cartes électroniques usagées : la vie aventureuse de nouveaux chercheurs d'or. Dans Le journal de l'école de Paris du management 2021/5 (N° 151), pages 16 à 23

Drew L. J., Meng Q., Sun W. 1990

The Bayan Obo iron-rare-earth-niobium deposits, Inner Mongolia, China. *Lithos*, 26 p 42-65

Edahbi M 2018

Prédiction du comportement géochimique des rejets miniers porteurs de terres rares

Département des génies civil, géologique et des mines école polytechnique de Montréal

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de philosophiae doctor (Génie minéral) P329

Ernault M. 2018

Métaux rares : «Un véhicule électrique génère presque autant de carbone qu'un diesel»

Frederik 2021

Les terres rares en Arctique, un réel enjeu stratégique ? Revue Diplomatique

Geoffron 2015

Comment transition numérique et transition écologique s'interconnectent-elles ?

Dans Annales des Mines - Responsabilité et environnement 2017/3 (N° 87), pages 17 à 19

Graedel TE ; Allwood J ; Birat JP ; Buchert M ; Hagelüken C

Que savons-nous des taux de recyclage des métaux ?

Première publication : 09 mai 2011 <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00342.xC>

Harari. YN. 2015.

Sapiens : Une brève histoire de l'humanité. Ed. Albin Michel. Paris. 512 p.

Hauet JP. 2014

Comprendre l'énergie : Pour une transition énergétique responsable Broché – 1 avril 2014

Hetzel P et Bataille D. 2016

Les enjeux stratégiques des terres rares et des matières premières stratégiques et critiques. Rapport n° 617 (2015-2016), fait au nom de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques,
<https://www.senat.fr/rap/r15-617-1/r15-617-1.html>

Julienne D. 2022

Matières premières : « Dans une guerre, il n'y a plus de grands métaux abondants ou de petits métaux critiques, puisque tous sont stratégiques »

Laurence Monnoyer-Smith. 2017

Transition numérique et transition écologique
Dans Annales des Mines - Responsabilité et environnement 2017/3 (N° 87), pages 5 à 7

Lévêque A et Maestro P 1993

Procédés industriels Terres rares | Réf : J6630 v1

Lucas J ; Lucas P ; Le Mercier T ; Rollat A ; Davenport W. 2015.

Rare earths : science, technology, production and use, Elsevier, 2015.

Michel, L et Meheut G. 2017

Numérique et transition énergétique
Dans Annales des Mines - Responsabilité et environnement 2017/3 (N° 87), pages 31 à 34

Morgane Créach. 2017

Le point de vue d'une ONG environnementale.
Dans Annales des Mines - Responsabilité et environnement 2017/3 (N° 87), pages 94 à 97

Multon B. 2018

Ressources énergétiques et énergie électrique

Pacary. C. 2020

Les métaux rares, la face noire des énergies vertes dévoilée sur Arte
Une enquête à charge prend en ligne de mire les voitures électriques, l'éolien et le solaire, gourmands en lithium ou en cuivre.

Perrier 2011

Terres rares et lanthanides

Pitron G. 2019.

La guerre des métaux rares.
La face cachée de la transition énergétique et numérique. Ed. Les liens qui libèrent. p. 314

Pitron G. 2021.

L'enfer numérique
Voyage au bout d'un Like. Ed. Les liens qui libèrent. p.345

Rabhi P.2010

Vers la sobriété heureuse. Ed. Acte Sud

Raphael Danino Perraud.2018

Face au défi des métaux critiques, une approche stratégique de recyclage Ifri 10décembre 2018

Rich, N. 2019

Perdre la Terre. Une histoire de notre temps. Ed. du sous-sol. p.233.

Schulz P. 2016

La gestion des matières premières stratégiques chez Renault Par Philippe SCHULZ Expert leader Environnement, énergie et matières premières, Renault F.F.E. | « Annales des Mines - Responsabilité et environnement » 2016/2 N° 82 | pages 105 à 109 ISSN 1268-4783 DOI 10.3917/re1.082.0105

U.S. Geological Survey, 2017

.Mineral Commodity Summaries,
Rares Earths, Mineral Commodity Summaries. February 2019 p. 133

US Geological Survey 2019

Rares Earths, Mineral Commodity Summaries. February 2019 p. 133

Zajec, O. 2011

« Matériaux stratégiques : Quelles alternatives ? », CEIS, mars 2011. [6]. C. Deming « La Chine étudie le recyclage et la substitution des **terres rares** » ...

Sites électroniques

Actu-Environnement, 02/06/10

Terres rares : "un paradoxe entre le procédé d'obtention polluant et leurs applications environnementales"
<https://www.actu-environnement.com/news/interview..>

ADEME : 2020

Terres rares, énergies renouvelables et stockage d'énergie. Publié en octobre 2020.
<https://www.ademe.fr/terres-rares-energies-renouvelables-stockage-d-energies>

Des « minerais de sang » dans vos smartphones. Publié le 25 septembre 2017.

<https://lequotidien.lu/a-la-une/des-minerais-de-sang-dans-vos-smartphones/>

Dion R. 2019

Quels risques d'approvisionnement dans les

La « guerre des métaux rares », ou la face cachée de la transition énergétique. Publié le 10 avril 2019.

<https://www.linfordurable.fr/environnement/la-guerre-des-metaux-rares-ou-les-non-dits-de-la-transition-energetique-10587>

Drezet. 2012)[

Source : www.usinenouvelle.com – Molycorp lance son concentrateur de terres rares – 28/08/2012]].

Elisabeth S. 2015

Large potentiel de terres rares en Algérie ? (Le Blog Finance) [En ligne] - Le 17/07/2015 Disponible sur.<http://le-blog-sam-la-touch.over-blog.com> > 2015/07Algérie Terres rares Ressources consulté le 03/02/2022

Fosse J. 2019.

Pénurie de terres rares : une dépendance qui interroge. .

<https://www.usinenouvelle.com/blogs/julien-fosse/penurie-de-terres-rares-une-dependance-qui-interroge.N851080>

Grim N. 2020

L'Algérie s'apprête-t-elle à devenir un pays beaucoup plus minier que pétrolier ?

<https://www.algerie-eco.com/2020/07/11/algerie-sapprete-t-elle-a-devenir-un-pays-beaucoup-plus-minier-que-petrolier>

Hocquard C 2022

« MÉTAUX RARES », Encyclopædia Universalis [en ligne], consulté le 26 juin 2022. URL : [https://www.universalis.fr/encyclopedie/metaux-rares/\(14/05/2022\)](https://www.universalis.fr/encyclopedie/metaux-rares/(14/05/2022))

Latroche M. 2019

Les terres rares et après ?

Publié le 9 mai 2019 par <https://lejournel.cnr.fr/billets/les-terres-rares-et-apres>

Les terres rares, qu'est-ce que c'est ? Publié le 8 septembre 2014.

<https://www.geo.fr/environnement/definition-terres-rares-scandium-yttrium-et-lanthanides-124433>

Les métaux rares, des éléments devenus stratégiques. Publié le 30 Août 2018.

<https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-metaux-rares-des-elements-devenus-strategiques>

Les métaux : des ressources qui pourraient manquer ?

<https://multimedia.ademe.fr/infographies/infographie-terres-rares-ademe/>

Selger.P. 2012.

Terres rares en Malaisie : le feu vert est donné à Lynas [malgré l'opposition des riverains].

[En ligne] .6 septembre 2012- Asie Info – Disponible sur <https://www.rse-et-ped.info> › [terres-rares-en-malaisie](https://www.rse-et-ped.info)
(consulté le 15-05-2022)

Surveille H et Lavergne R. 2017

Dans Annales des Mines - Responsabilité et environnement 2017/3 (N° 87), pages 8 à 10

Téléchargeable aux adresses : www.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/SNTEDD%20-

Tridi R 2016

La problématique des terres rares en Algérie : Menace ou opportunité..

<https://www.elwatan.com/edition/contributions/la-problematique-des-terres-rares-en-algerie-menace-ou-opportunit%C3%A9-30-03-2016> (14/05/2022)

Annexe I

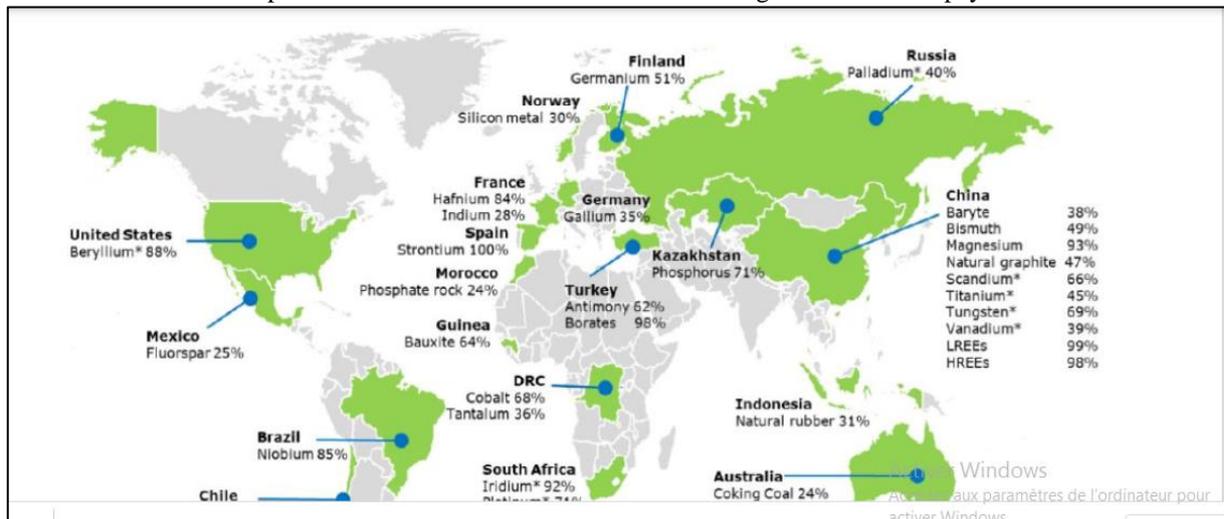
Tableau I- Les éléments Métaux rares du tableau périodique de Mendeleïev

	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII B	VIII B	VIII B	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
1																		
2	Li	Be																
3	Na	Mg											Al					
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga					
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn				
6	Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi			
7	Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh		
			* lanthanides	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
			** actinides	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

terres rares

Annexe II

Répartition des éléments de terres rares dans un grand nombre de pays



Annexe III

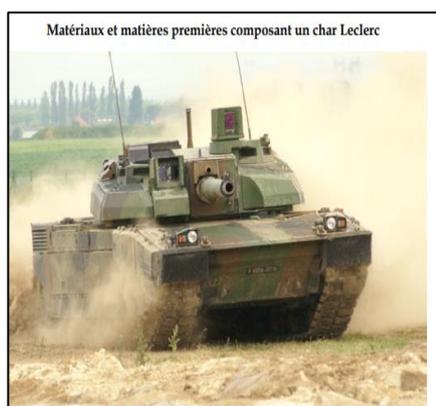
Terres rares et la configuration électronique des électrons 4f

Configurations électroniques des terres rares

Élément chimique	Série chimique	Configuration électronique
n° 21 Sc Scandium	Métal de transition	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^1$
n° 39 Y Yttrium	Métal de transition	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^1$
n° 57 La Lanthane	Lanthanide	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 5d^1 (*)$
n° 58 Ce Cérium	Lanthanide	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^1 5d^1 (*)$
n° 59 Pr Praséodyme	Lanthanide	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^3$
n° 60 Nd Néodyme	Lanthanide	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^4$
n° 61 Pm Prométhéum	Lanthanide	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^5$
n° 62 Sm Samarium	Lanthanide	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^6$
n° 63 Eu Europium	Lanthanide	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^7$
n° 64 Gd Gadolinium	Lanthanide	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^7 5d^1 (*)$
n° 65 Tb Terbium	Lanthanide	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^9$
n° 66 Dy Dysprosium	Lanthanide	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^{10}$
n° 67 Ho Holmium	Lanthanide	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^{11}$
n° 68 Er Erbium	Lanthanide	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^{12}$
n° 69 Tm Thulium	Lanthanide	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^{13}$
n° 70 Yb Ytterbium	Lanthanide	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^{14}$
n° 71 Lu Lutécium	Lanthanide	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^{14} 5d^1$

Annexe IV :

Les lanthanides dans l'armement



Char Leclerc	
Équipements	Matériaux
Communications	Arséniure et nitrure de gallium, béryllium, argent
Verres et miroirs, lentilles et fenêtres optique	Céramique de quartz
Châssis	Béryllium, alliages légers d'aluminium, aciers très dur
Blindage	Tungstène, composites, titane
Canon et accessoires	Carbone, manganèse, chrome, nickel, molybdène, vanadium
Télémetre laser	Néodyme, yttrium, aluminium, indium
Binoculaires de vision infrarouge	Mercurie, cadmium, tellure
Binoculaires de vision nocturne	Germanium, cuivre, tantale
Outil de mécanique optique (cadre)	Carbone, composites de carbone, béryllium, cuivre

Annexe V

Les aimants permanents une composante de nos téléphones cellulaire
De nos automobiles

Les voitures électriques et hybrides peuvent contenir de 9 à 11 kg¹ de terres rares
(Deux fois la quantité trouvée dans les voitures à essence)

Left side callouts:

- Additif au carburant diesel
Cérium
Lanthane
- Pile hybride NiMH
Lanthane
Cérium
- Convertisseur catalytique
Cérium/Zirconium
Lanthane
- Plus de 25 moteurs électriques partout dans le véhicule
Aimants de Nd
- Phares
Néodyme

Right side callouts:

- Pare-brise anti-UV
Cérium
- Vitres et miroirs
Poudre à polir
Cérium
- Écran ACL
Europium
Yttrium
Cérium
- Capteurs des composants
Yttrium
- Moteur et générateur électrique hybride
Néodyme
Praséodyme
Dysprosium
Terbium

¹Source : « The Race for Rare Metals », The Globe and Mail, 16 juillet 2011

Annexe VI

La prédiction de Nicolas Tesla

« Lorsque la téléphonie sans fil sera parfaitement appliquée, toute la terre sera transformée en un énorme cerveau, ce qui en fait est déjà le cas, et toutes les choses seront comme les particules d'un ensemble réel et rythmé. Nous serons en mesure de communiquer avec quelqu'un de manière instantanée, indépendamment de la distance. Et pas seulement, à travers la télévision et la téléphonie, nous pourrons nous voir et nous entendre aussi parfaitement que si nous étions face à face, même si des milliers de kilomètres nous sépareront. D'ailleurs, les instruments qui nous permettront de le faire seront incroyablement simples, en comparaison au téléphone que nous utilisons aujourd'hui. Un homme sera en mesure de les garder dans la poche de sa veste. »

1926

DALLE TACTILE + VITRE

In	Sn	Si	Al	K
Indium	Etain	Silicium	Aluminium	Potassium

ÉCRAN

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

BATTERIE

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

BOÎTIER

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

CARTE ET COMPOSANTS

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

Annexe VI (suite)



Carte des Data Center à travers le monde

Annexe VII “Les mines de sang”





Dans une mine d'extraction de terres rares de la province chinoise du Jiangxi,
(En octobre 2010. Crédits: Stinger / Libération)

Annexe VII Suite)
(Les mines de sang)





Congo : 5 million de morts [<http://www.tv/fr/faits/3696128.html>]

Annexe VIII

Le recyclage des stocks fin de vie : de véritables mines hors-sol





<p align="center">Année universitaire : 2021-2022</p>	<p align="center">Présenté par : BAKHOUCHE Maroua BELBEKHOCHE Lina</p>
<p align="center">Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Ecologie fondamentale et Appliquée.</p>	
<p>Intitulé : L'apport des terres rares dans la transition énergétique et numérique : effets sur l'Environnement.</p>	
<p>Résumé : Afin de réduire l'impact des gaz à effet de serre, une orientation vers des sources énergétiques renouvelables s'est avérée nécessaire. Ce mémoire de fin d'études avait pour ambition de démontrer l'implication des métaux rares et des terres rares dans la transition énergétique et numérique considérées comme une révolution ayant fait l'objet d'une polémique quant à leur rôle dans l'atteinte d'un avenir propre et durable, et leur impact sur l'environnement. Afin de répondre à cette problématique nous nous sommes basés sur une recherche bibliographique approfondie. Il a fallu dans un premier temps définir le concept des deux transitions préalablement mentionnées, nous avons ensuite parlé des métaux rares dans un contexte global en déterminant leur fonction et leurs domaines d'utilisation. Afin d'appuyer notre hypothèse nous avons pris comme exemple la voiture électrique et nous avons affirmé que l'extraction des MR nécessaires au moteur électrique émet presque autant de CO₂ qu'un moteur diesel. En ce qui concerne les éoliennes et les panneaux solaires on a conclu que plusieurs tonnes de néodyme et dysprosium sont utilisés dans les aimants nécessaires pour leur fonctionnement. Dans le dernier chapitre nous avons abordé le numérique, on a déduit que le téléphone portable nécessite une cinquantaine de métaux rares pour sa fabrication. Pour conclure les métaux rares, source de pollution de l'air des sols et de l'eau, ont un impact négatif sur l'environnement et sur la biodiversité. Ce travail nous a été très instructif il nous a permis à la fois d'enrichir nos connaissances, et d'éclaircir des points sur un sujet encore méconnaissable de la plupart des gens. Notre problématique est encore d'actualité et ne s'arrête pas à ce niveau la prospection reste ouverte afin d'atténuer l'impact négatif sur l'Environnement.</p>	
<p>Mots-clefs : Métaux rares ; terres rares ; Transition énergétique et numérique ; Biodiversité ;</p>	
<p>Laboratoires de recherche : Laboratoire de Biologie végétale et Ecologie..... . Université Frères Mentouri, Constantine 1</p>	
<p>Encadreur : Prof. KADEM Dhaou El Djabine</p>	<p>Université Frères Mentouri, Constantine 1</p>
<p>Examineur : Prof. SAHLI Lila</p>	<p>Université Frères Mentouri, Constantine 1</p>
<p>Examineur : Dr. TOUATI Laid</p>	<p>Université Frères Mentouri, Constantine 1</p>