

QUEL RÔLE JOUE LA CHIMIE POUR LES MATÉRIAUX STRATÉGIQUES ?

Eric Bausson

LES MATÉRIAUX STRATÉGIQUES : QUELLES ALTERNATIVES OFFRE LA CHIMIE POUR RÉPONDRE À LEURS ENJEUX ?

Programmes spécifiques de physique-chimie pour les classes de première et de terminale Baccalauréat professionnel propres au groupement de Spécialités 5.

Le Groupement 5 rassemble les spécialités de baccalauréats professionnels mobilisant des compétences professionnelles qui nécessitent de solides connaissances dans le domaine de la chimie. Il réunit les spécialités de secteurs professionnels variés : l'industrie chimique, la bio-industrie, la cosmétologie, la teinturerie, les textiles, la plasturgie, l'esthétique, la gestion des pollutions et la protection de l'environnement, la verrerie, les plastique et composite...

MOTS-CLÉS :

matériaux stratégiques, bauxite, aluminium, oxydoréduction, polymères, PVDF, lithium.

ANGLE CHOISI :

À travers l'utilisation de documents de nature diverse, issus du site Media-chimie, le lecteur prendra conscience, si ce n'est pas déjà le cas, de la richesse de ce site et pourra poursuivre sa quête d'informations sur les matériaux stratégiques.

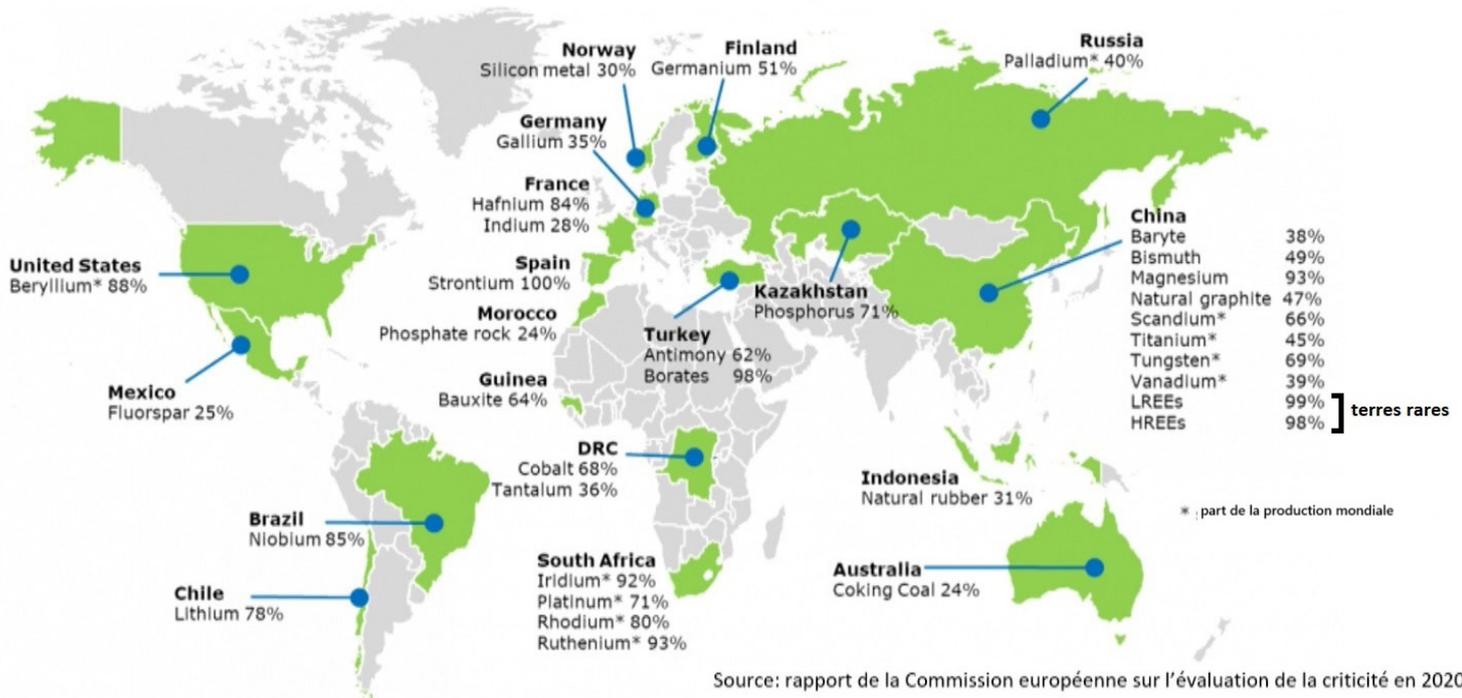


Les propriétés magnétiques de certains métaux rares justifient leurs utilisations multiples (produits high tech, imagerie médicale...)

© Peggy Greb / US Department of agriculture / Science photo library

A. Introduction

Les matériaux stratégiques jouent un rôle clé tant sur le plan géopolitique qu'en chimie, car ils sont indispensables à de nombreuses industries de haute technologie et à la transition énergétique. Leur accès et leur contrôle sont des enjeux majeurs pour les États pouvant entraîner des tensions et des stratégies d'influence. Par exemple, les réserves et mines de terres rares, essentielles pour les aimants des éoliennes et les batteries, sont largement exploitées par la Chine comme le montre l'illustration ci-dessous, ce qui suscite des préoccupations et des tensions en matière d'approvisionnement. De même, le lithium, crucial entre autres pour les batteries des véhicules électriques, est produit principalement par le Chili. En chimie, l'optimisation des procédés d'extraction et de recyclage de ces matériaux est un défi crucial pour réduire la dépendance aux ressources naturelles et limiter l'impact environnemental. Nous allons aborder tout ceci dans ce dossier pédagogique avec quelques exemples de matériaux stratégiques.



Principaux pays fournisseurs de matières premières critiques à l'UE. © Conférence JF Gaillard

B. La notion de matériaux stratégiques

Actuellement, une grande majorité des éléments du tableau périodique de Mendeleïev est nécessaire pour les industries. Mais, pour certains d'entre eux, ils sont rares et/ou difficilement accessibles. Ils sont inégalement répartis sur notre planète mais mondialement indispensables dans des utilisations industrielles stratégiques. Plusieurs critères permettent de définir le caractère stratégique d'un matériau.

En premier lieu, s'il s'agit d'un composé issu d'un produit minéral comme un métal issu d'un minerai, celui-ci devient stratégique si la demande croît alors que la ressource est rare ou si l'accès à la matière première est difficile, soit pour des raisons techniques, soit pour des raisons géostratégiques. Mais cette notion peut être

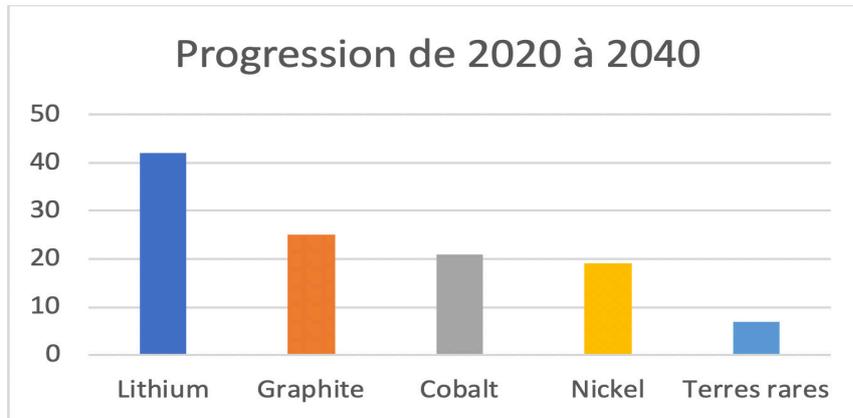
élargie à des matériaux de synthèse qui deviennent stratégiques s'ils possèdent des propriétés très spécifiques indispensables à la fabrication de certains objets en fort développement et si leurs fabrications sont le monopole d'un nombre limité de pays ou d'entreprises.

Ainsi, certains types de plastique, le carton de base pour la logistique, les composants des microprocesseurs, le cuivre indispensable à l'électrification et le magnésium nécessaire aux alliages d'aluminium, les terres rares (indispensables pour les ordinateurs, les écrans, les LED, les aimants des éoliennes, etc.), le lithium... sont actuellement en tension. Et cette liste, déjà très longue, risque de s'amplifier.

Les matériaux stratégiques sont indispensables à la stratégie économique d'un État, à sa défense, à sa politique énergétique ou à celle d'un acteur industriel spécifique (exemple : les matériaux pour la transition énergétique).

Pour réussir la transition énergétique, indispensable pour limiter à court et moyen termes l'usage des énergies fossiles, il faudra, quel que soit le scénario envisagé, augmenter considérablement l'extraction des matières premières minérales et métalliques dans le monde entier et en parallèle stocker puis recycler le maximum d'objets en fin de vie.

En prenant comme référence l'année 2020, il faudrait au moins 42 fois plus de lithium en 2040 d'après les projections effectuées par l'Agence Internationale pour l'Énergie (AIE). Voici les facteurs multiplicateurs pour d'autres matériaux stratégiques toujours entre 2020 et 2040 :



Les besoins en certains matériaux seront donc colossaux et méritent l'appellation de « stratégiques », car cela doit interpeller tous les décideurs publics et privés pour anticiper leurs choix en prenant les bonnes décisions qui permettraient de préserver une souveraineté économique.

Activité 1

Voici un tableau périodique présenté sous une forme peu commune, celle en fonction de la disponibilité de chaque élément chimique.

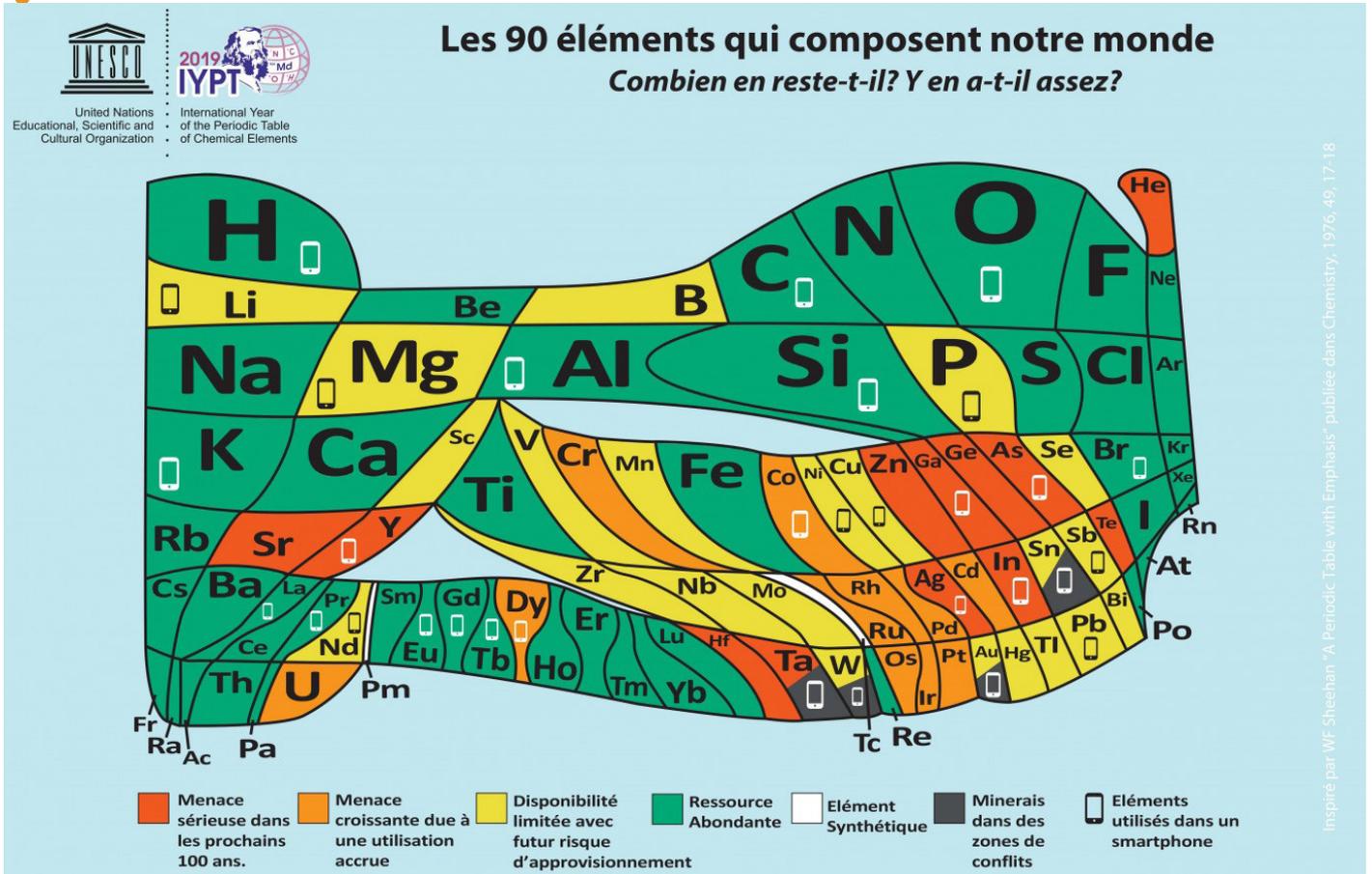


Illustration originale : © <https://explore.psl.eu/fr/le-magazine/focus/un-monde-delements-chimiques-enjeux-societaux-du-tableau-periodique>

1 Dans un smartphone, combien de dizaines d'éléments chimiques retrouvons-nous environ ?

- une
- deux
- trois
- quatre

2 Parmi ces éléments chimiques, cocher au moins un d'entre eux pouvant être considéré comme stratégique.

- strontium (Sr)
- carbone (C)
- potassium (K)
- yttrium (Y)
- zinc (Zn)
- gallium (Ga)

C. De la bauxite à l'aluminium

La bauxite est un matériau stratégique en raison de son rôle dans la production d'aluminium et de son importance pour les grandes industries modernes, notamment dans un contexte de transition énergétique.

Pierre Berthier, chimiste français venu chercher dans la commune des Baux-de-Provence du minerai de fer, découvrit, en 1821, la bauxite (d'où son nom!), servant notamment à produire de l'aluminium. Son extraction en France au gisement des Canonnettes (ci-contre) s'arrête en 1990 en raison de la concurrence mondiale. Les principales réserves mondiales de bauxite sont dorénavant situées dans un nombre limité de pays (Guinée, Australie, Brésil, Chine, etc.).



Alpilles, gisement des Canonnettes
© Lithothèque de l'académie
d'Aix-Marseille

La bauxite contient de 40 à 60 % d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) hydraté mélangé à de la silice (SiO_2) et à de l'oxyde de fer III (Fe_2O_3). C'est ce dernier qui donne sa couleur rouge caractéristique à la bauxite. Quatre tonnes de bauxite sont nécessaires pour obtenir deux tonnes d'alumine (Al_2O_3) et au final une tonne d'aluminium. L'aluminium issu de la bauxite est indispensable dans des secteurs clés comme l'aéronautique, l'automobile, la construction, l'électronique et l'emballage. L'aluminium est un matériau léger et recyclable, très prisé pour réduire la masse des objets.

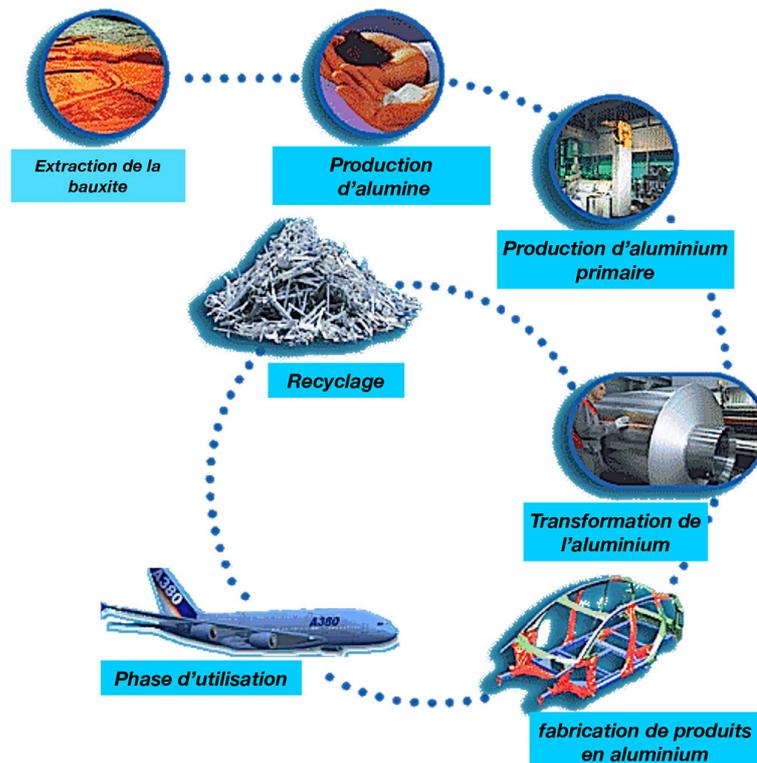


Schéma de production et recyclage de l'aluminium © N.F.I.

Activité 2

À haute température dans un bain d'électrolyse, on considère, pour simplifier, que l'alumine (Al_2O_3), contenant des atomes d'aluminium (Al) et d'oxygène (O), se dissocie en ions monoatomiques.

H 1 hydrogène						He 2 hélium	
Li 3 lithium	Be 4 béryllium						
Na 11 sodium	Mg 12 magnésium	B 5 bore	C 6 carbone	N 7 azote	O 8 oxygène	F 9 fluor	Ne 10 néon
		Al 13 aluminium	Si 14 silicium	P 15 phosphore	S 16 soufre	Cl 17 chlore	Ar 18 argon

X	— <i>symbole chimique</i>
Z	
NOM	

numéro atomique

1 Pour les éléments aluminium (Al) et oxygène (O), déterminer l'ion monoatomique favorablement formé à partir de la position de l'élément dans la classification périodique.

.....

.....

.....

2 Que doit subir l'ion aluminium pour devenir de l'aluminium métallique ? Écrire la demi-équation électronique correspondante.

.....

.....

.....

3 L'aluminium liquide étant plus dense que les autres composés chimiques présents, comment peut-on le récupérer ?

.....

.....

.....

D. Les polymères, un autre exemple de matériaux stratégiques

Parmi les matériaux stratégiques nécessaires, nous avons un polymère, nommé « polyfluorure de vinylidène (PVDF) ».

Voici ci-contre quelques objets en PVDF :

Ce matériau est très intéressant car il combine plusieurs propriétés, à savoir une bonne résistance à différentes agressions chimiques (acides, bases, etc.) et à des températures élevées. Il s'agit aussi d'un très bon isolant électrique. Pour ces raisons, on retrouve le PVDF dans bon nombre d'applications, parmi lesquelles :

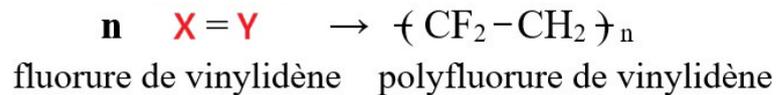
- dans l'industrie chimique : revêtements de cuves, tuyaux, pompes
- dans les énergies renouvelables : films pour cellules photovoltaïques (grande stabilité aux UV et aux intempéries);
- dans les domaines médical et pharmaceutique : filtres, membranes pour purification et les biotechnologies;
- dans l'aéronautique et l'automobile : isolation de câbles et gaines à haute performance.



Objets en PVDF © Diplatech

Activité 3

Voici l'équation de la polymérisation avec deux groupements d'atomes X et Y séparés par une liaison double dans le monomère (fluorure de vinylidène) :



1 Parmi les propositions ci-dessous, lesquelles correspondent à X et Y ?

X	Y
<input type="checkbox"/> CF	<input type="checkbox"/> CH
<input type="checkbox"/> CF ₂	<input type="checkbox"/> CH ₂
<input type="checkbox"/> CF ₃	<input type="checkbox"/> CH ₃

2 En déduire la position du (des) atome(s) de fluor dans le monomère.

.....

3 Écrire l'équation de polymérisation du polyfluorure de vinylidène.

.....

.....

4 Quelle est la formule chimique du polyfluorure de vinylidène ?

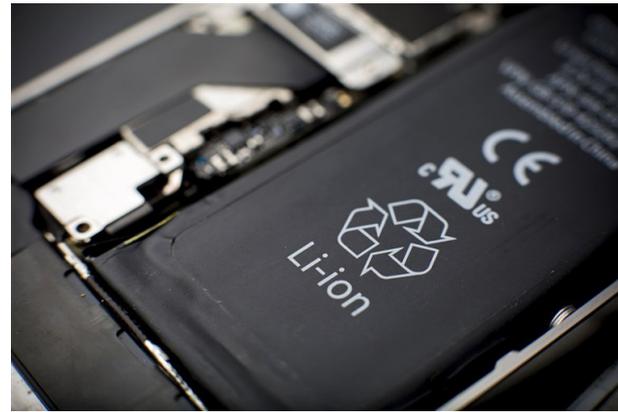
.....

.....

E. Le lithium, un dernier exemple de matériau stratégique

Le lithium est très présent dans bon nombre de nos objets nomades (smartphone, écouteurs sans fil, etc.) et bien sûr dans les voitures électriques ! L'approvisionnement en lithium est donc très important pour les industries technologiques. Les batteries au lithium sont de plus en plus perfectionnées pour pallier les problèmes de sécurité, le plus important d'entre eux étant l'embrasement et l'explosion d'une batterie.

« La plus simple » d'entre elles est la batterie lithium métal où l'électrode négative est composée de lithium métallique. Mais le lithium métallique étant très réactif avec l'air humide, il ne faut pas qu'il soit en contact avec lui. L'électrolyte, initialement liquide, présente des risques au cours des cycles charge-décharge. Pour pallier ce risque, l'électrolyte liquide peut être remplacé par un gel polymère empêchant la formation de dendrites de lithium. Comme exemple de polymère utilisé dans les batteries au lithium, nous pouvons retrouver le polyfluorure de vinyli-dène (P.V.D.F.), étudié précédemment.



Batterie lithium-ion de smartphone
© Dignited

Activité 4

1 Quel est la formule chimique du lithium métallique ?

- Li^+
- Li^{2+}
- Li
- Li_2

2 Quelle proposition ci-dessous rend compte de ce qui se passe au niveau de l'électrode négative avec le lithium métallique ? Justifier.

- $\text{Li}^{2+} + 2 e^- \rightarrow \text{Li}_2$
- $\text{Li}_2 \rightarrow \text{Li}^{2+} + 2 e^-$
- $\text{Li}^+ + e^- \rightarrow \text{Li}$
- $\text{Li} \rightarrow \text{Li}^+ + e^-$

Justification :

.....

.....

3 S'agit-il d'une oxydation ou d'une réduction ? Justifier.

.....

.....

.....

F. Conclusion

Les matériaux stratégiques jouent un rôle crucial dans les industries de haute technologie, la transition énergétique et la défense, ce dernier point étant très présent dans notre actualité en 2025.

Leur disponibilité est de plus en plus incertaine en raison de tensions géopolitiques, de la concentration des ressources dans quelques pays et de l'augmentation de la demande mondiale. Face à ces défis, le recyclage, l'innovation dans les matériaux de substitution et la diversification des sources d'approvisionnement deviennent essentiels. Les gouvernements et les entreprises devront développer des stratégies de stockage et investir dans la recherche. Enfin, une coopération internationale accrue sera nécessaire pour garantir un accès durable et équitable à ces ressources, tout en limitant leur impact environnemental. Les défis sont donc nombreux et très importants !

Pour en savoir plus :

- Conférences du colloque [Chimie et matériaux stratégiques](#) du 09/11/2022 :
 - [Comment définir le périmètre des matériaux stratégiques ?](#) – J.- F. Gaillaud.
 - [Polymères stratégiques sensibles pour l'industrie : bioressources, recyclage, quelles stratégies ?](#) – Denis Bortzmeyer (directeur scientifique Arkema) et Patrick Maestro (directeur scientifique Solvay).
- [Mise au point d'un PVDF renouvelable par la société Arkéma](#) – article de *L'Usine Nouvelle* (01/09/2021).
- [La transition énergétique, un accélérateur de notre dépendance aux métaux stratégiques](#) – Patrick d'HUGUES | Directeur du programme scientifique « Ressources minérales et Économie Circulaire », BRGM.
- [Le lithium, un élément chimique indispensable pour notre mobilité actuelle](#) – E. Bausson – Mediachimie.
- Réaction en un clin d'œil : [Comment faire des casseroles avec de la bauxite ? L'électrolyse](#) – J.-Cl. Bernier.
- Vidéo [Pourquoi recycler ses canettes en aluminium ? Un bel exemple d'économie circulaire !](#) – R. Blareau et F. Brénon.
- Question du mois : [Pourquoi ne faut-il pas jeter son smartphone hors d'usage ?](#) – F. Brénon.
- Vidéo [La chimie cachée du smartphone](#) – R. Blareau et F. Brénon.
- Vidéo : [Accumulateur « Lithium-Ion » : une révolution technologique portable !](#) – R. Blareau et F. Brénon.

Activité 1

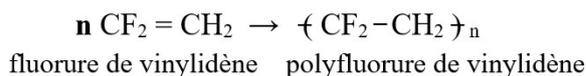
1. Dans un smartphone, nous retrouvons environ trois dizaines, soit une trentaine, d'éléments chimiques.
2. Parmi ceux proposés, nous pouvons citer comme élément chimique stratégique : Y et Ga.

Activité 2

1. Les atomes d'aluminium (Al) et d'oxygène (O) doivent tous deux acquérir la stabilité du gaz noble le plus proche d'eux. Il s'agit pour eux du néon (Ne). Pour y parvenir, l'atome d'aluminium doit perdre trois électrons pour former l'ion Al^{3+} et l'atome d'oxygène doit en capter deux pour former l'ion O^{2-} .
2. Pour que Al^{3+} devienne Al, l'ion Al^{3+} doit être réduit (subir une réduction) suivant la demi-équation électronique $\text{Al}^{3+} + 3 \text{e}^- \rightarrow \text{Al}$
3. L'aluminium liquide étant plus dense que les autres composés présents, il sera au fond de la cuve. Il faut donc y prévoir un écoulement contrôlé par une vanne.

Activité 3

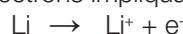
1. X : CF_2 et Y : CH_2
2. Les deux atomes de fluor (F) sont liés au même atome de carbone (C).
3. L'équation de la polymérisation du polyfluorure de vinylidène est :



4. La formule chimique du polyfluorure de vinylidène est $(\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2)_n$.

Activité 4

1. Il s'agit de Li.
2. Comme cela se passe à la borne négative, les électrons en sortent. La seule équation possible avec une perte d'électrons impliquant le lithium Li est :



3. Il s'agit d'une oxydation car le lithium Li est un réducteur qui devient un oxydant Li^+ .

ET APRÈS LE BACCALAURÉAT PROFESSIONNEL ?

Partie orientation proposée et rédigée par Françoise Brénon
et Gérard Roussel (Maison de la Chimie)

• **Économie circulaire et matériaux stratégiques.**

Pour des raisons environnementales et de raréfaction des ressources non renouvelables, nous devons nous inscrire progressivement dans la démarche vertueuse de l'économie circulaire. Cette stratégie consiste à viser le zéro déchet dans toute activité de production et dans le traitement de tout objet en fin de vie. Pour répondre à ces objectifs, toute démarche de production devra s'appuyer sur une stratégie d'éco-conception : matières premières renouvelables, sous-produits et déchets de fabrication recyclables, produit ou objet en fin de vie réutilisable, transformable pour un usage différent ou recyclable en nouvelles matières premières. Le chimiste est très souvent en première ligne dans toutes les étapes de l'économie circulaire.

D'une façon générale, l'immense majorité des métaux dont les terres rares représente des enjeux économiques et stratégiques majeurs. Les 17 éléments qui composent les terres rares sont largement utilisés pour la fabrication d'objets de haute technologie dans tous les domaines de la communication, de l'énergie, des transports, de la santé... L'extraction de ces terres rares n'est réalisée que dans quelques régions du monde et c'est la Chine qui concentre l'essentiel de leur production. À titre d'exemple, pour l'Union Européenne, plus de 90 % des besoins sont importés de Chine, le recyclage est donc à minima une nécessité absolue. Dans le futur, les possibles autorisations d'exploitation des fonds marins dans les ZEE (Zones Economiques Exclusives) pourraient permettre de rebattre les cartes dans le domaine de l'accès aux terres rares mais ce sera un processus long, complexe et coûteux et on peut l'espérer, très encadré sur le plan règlementaire. Extraction, innovation, utilisation, recyclage... autant de domaines où l'on fait appel à l'expertise du chimiste.

Pour illustrer l'approche économie circulaire on consultera les ressources suivantes :

- [Les Chimistes dans l'économie circulaire](#) par F. Brénon et G. Roussel
- [Comment la chimie métallurgique peut-elle faire face aux besoins en matières premières stratégiques ?](#) par Sophie Le Roy - fiche lycée
- [Faire du déchet une ressource, un enjeu pour l'industrialisation des filières et des territoires](#) par Véolia, Michel Valache. Colloque Chimie et technologies de l'information

• **Matériaux stratégiques et nouvelles technologies de l'information.**

Smartphones, tablettes, ordinateurs, GPS, télévisions, satellites... autant d'objets de communication qui font appel à des matières premières organiques, minérales ou en matériaux hybrides dont nombreuses peuvent être qualifiées de stratégiques en raison de leur rareté de leur coût ou de leur difficulté d'approvisionnement.

L'innovation dans ces domaines est foisonnante, répondant à la recherche : de propriétés nouvelles, de miniaturisation, d'amélioration de performance, de nouveaux matériaux, d'économies, de robustesse... Dans chacun de ces domaines, le chimiste apporte sa contribution.

Les technologies de l'information sont consommatrices de terres rares, l'accessibilité de ces dernières et le risque d'épuisement de certains gisements peuvent conduire à des situations de pénurie. Deux solutions possibles, recycler un maximum de ces terres rares, trouver de nouveaux matériaux de substitution aux propriétés identiques. Des unités de recyclage sont en cours de construction en Europe, y compris en France.

Pour en savoir plus :

- [Les chimistes dans les nouvelles technologies de l'information](#) par F. Brénon et G. Roussel
- [Le recyclage des terres rares : une stratégie d'approvisionnement à la taille de leurs enjeux](#) (SOLVAY Lama Itani, Olivier Larcher, Renaud Rohe) - Colloque Chimie, Recyclage et Économie circulaire

• Les chimistes dans l'aventure des nouveaux matériaux

Les terres rares du fait de leurs propriétés spécifiques font incontestablement partie des matériaux clés pour le développement des nouvelles technologies. Leur rareté pour la plupart, leurs difficultés d'extraction, leur coût et leur disponibilité soumise à des considérations d'ordre économique et géopolitique ne permettent pas de construire un futur sécurisé à long terme pour ces nouvelles technologies. Alors comment faire, faut-il créer des matériaux de substitution, ayant les mêmes propriétés physico-chimiques que les terres rares ?

Par chance et par nécessité tout un nouveau domaine de chimie fait l'objet de nombreuses recherches, celui des nanosciences. La chimie des nanomatériaux et en particulier celle des matériaux hybrides (combinant au sein de mêmes structures les éléments de la chimie organique et ceux de la chimie minérale). C'est encore une chimie très récente où beaucoup est encore à apprendre mais quelques exemples ont déjà montré qu'il était possible de se passer des terres rares pour l'obtention d'aimants permanent en nano-structurant un nouveau matériau composé de fer de cobalt et de carbone. Des recherches actives sont en cours dans les domaines de la micro-électronique, de la photonique, des cellules photovoltaïques, des piles à combustible...

Pour aller plus loin :

- [Les chimistes dans l'aventure des nouveaux matériaux](#) par F. Brénon et G. Roussel
- [Matériaux inorganiques et hybrides bio-inspirés](#) par C. Sanchez - Colloque La chimie et la nature

A. LES MÉTIERS

Dans une démarche d'économie circulaire, de l'éco-conception au recyclage en passant par les différentes étapes de R&D, de production, de contrôle et de mise en forme, les chimistes sont partout. Il est certain que notamment dans les domaines de la R&D l'Intelligence Artificielle jouera un rôle de plus en plus important dans l'accompagnement du chimiste.

De l'extraction du minerai à la purification du produit en passant par les différentes étapes de séparation et de contrôle, le chimiste est impliqué dans la mise à disposition de terres rares ultrapures pour les applications industrielles. Il est également partie prenante dans la synthèse ou la préparation de produits ou d'objets incluant ces terres rares. Les phases de recyclage de tous les matériaux stratégiques en s'appuyant sur leurs propriétés physico-chimiques font également appel aux chimistes. Enfin l'accès à des nouveaux matériaux constitue un vaste ensemble d'une nouvelle chimie à inventer à découvrir et à maîtriser. Dans ce domaine, l'innovation est un maître mot, cette chimie est encore pour l'essentiel dans les laboratoires de recherche. La chimie des matériaux est un domaine en pleine expansion.

Les partenaires des chimistes dans ces différents domaines peuvent être des physiciens, des géologues, des électroniciens...

Voici quelques exemples de métiers dont on pourra consulter les fiches descriptives :

[Ingénieur de recherche / Chercheur \(H/F\)](#)

[Ingénieur matériaux \(H/F\)](#)

[Technicien matériaux \(H/F\)](#)

[Ingénieur chimiste Procédés \(H/F\)](#)

[Ingénieur Génie des procédés / Génie chimique \(H/F\)](#)

[Technicien chimiste \(H/F\)](#)

[Technicien Génie des procédés / Génie chimique \(H/F\)](#)



Technicienne Génie des procédés © AMU

Ne pas oublier les métiers de l'analyse, dont par exemple :

[Responsable de laboratoire d'analyses / contrôle qualité \(H/F\)](#)

[Technicien d'analyse chimie / physico-chimie \(H/F\)](#)

B. LES FORMATIONS

Diverses formations permettent d'accéder à ces métiers.

Pour une sortie sur le marché du travail au [niveau bac](#) :

- Bac pro Traitement des matériaux

Pour une sortie sur le marché du travail au [niveau Bac + 2 / 3](#) :

- BUT chimie
- BUT génie chimique, génie des procédés
- BUT sciences et génie des matériaux
- BUT mesures physiques
- BTS métiers de la chimie (4 pôles principaux : analyse, synthèse, formulation et principes de QHSSE - Qualité, Hygiène + Santé, Sécurité, Sûreté, Environnement)
- BTS pilotage de procédés (deux pôles majeurs : le génie des procédés et les règles de QHSSE)
- BTS Traitement des matériaux, TDM, option B ou TRS : traitement de surface
- BTS physico-métallographe de laboratoire

Pour une sortie sur le marché du travail au [niveau bac + 5 / 8](#) :

- Écoles d'ingénieur(e)s chimistes et masters : spécialités matériaux inorganiques ou/et organiques, synthèse, électrochimie, métallurgie, polymères, analyse...

Toutes ces formations peuvent avoir lieu selon un cursus classique ou par la voie de l'alternance.

Consulter pour cela la fiche [Formation par l'apprentissage en chimie](#)

Et pour vous aider à trouver votre chemin parmi toutes ces filières, visionnez la vidéo de la conférence : [Les différentes filières de formation vers les métiers de chimistes pour une sortie sur le marché du travail à Bac +2/3 ou Bac +5/8](#) par F. Brénon - Village de la chimie à Paris