



La transition énergétique : un boom pour l'industrie minière ?

« La vérité est rarement douce à entendre ; elle est presque toujours amère. »

Alexandre Soljenitsyne, HARVARD, discours du 8 Juin 1978

Jean-Louis CARDINI

Ingénieur géologue, ENSG, Nancy
Master of Sciences, Mackay School of Mines, Reno, Nevada, USA

D'après une conférence à l'[Association Philomathique d'Alsace et de Lorraine](#) en Janvier 2019
A retrouver dans le Bulletin, tome 48, 2018-2019-2020, ISSN 0750-6856

SOMMAIRE

- 1- Que signifie pratiquement le terme « transition énergétique » ?
- 2- Rappel de quelques lois physiques et chimiques et de quelques faits démontrés.
- 3- Quels sont les produits issus du sous-sol qui vont être les plus impactés par la transition énergétique ?
- 4- Quelques notions simples d'économie minière.
- 5- Comment allons-nous analyser chaque produit minéral impacté par la transition énergétique ?
- 6- Le gaz naturel.
- 7- L'uranium.
- 8- Le lithium.
- 9- Le graphite.
- 10- Les terres rares.
- 11- Le silicium pour cellules photovoltaïques.
- 12- Conclusions.

Annexe



La « transition énergétique » fait les beaux jours de nombreux politiques, journalistes et acteurs économiques depuis quelques années déjà.

Mais qu'y a-t-il derrière ce terme générique de « transition énergétique » ?

Serait-ce un processus qui va nous faire économiser les ressources de notre planète tout en réduisant nos émissions de gaz à effet de serre ?

Derrière cette apparence quelles en sont les conséquences, chez nous mais aussi au niveau mondial ?

Peut-on faire n'importe quoi sous prétexte de « transition » ?

Les matières premières issues du sous-sol vont-elles être impactées ?

Quelles seront les plus impactées et cet effort sera-t-il durable dans le temps ?

Les rapports de force géopolitiques, essentiellement axés autour du pétrole et du gaz naturel depuis de nombreuses années risquent-ils d'être modifiés ?

Dans cet article nous allons essayer d'expliquer la réalité des faits et de donner une vision géologique et minière, de manière que chacun puisse se forger sa propre opinion.

1- Que signifie pratiquement le terme « transition énergétique » ?

La transition énergétique concerne essentiellement la production et l'utilisation d'énergie sous toutes ses formes.

Avant d'aller plus loin il est important de savoir que le problème de l'énergie n'est pas un problème Franco-Français mais qu'il doit être envisagé au niveau mondial. La France avec moins de 1% de la population mondiale est un « petit » pays. En fait cette « transition énergétique » recouvre de nombreux domaines très différents les uns des autres mais avec un but ultime qui est de réduire les émissions anthropiques de gaz à effet de serre et essentiellement de CO₂ :

- La réduction des consommations énergétiques est une problématique des pays « développés » essentiellement. Les pays en voie de développement ont une envie légitime à consommer plus d'énergie.

- La production d'énergie électrique.

- L'utilisation directe ou indirecte d'électricité pour remplacer, à terme, les carburants issus de l'exploitation du pétrole et du gaz pour les véhicules de transport terrestres, maritimes voire aériens.

2- Rappel de quelques lois physiques et chimiques et de quelques faits démontrés.

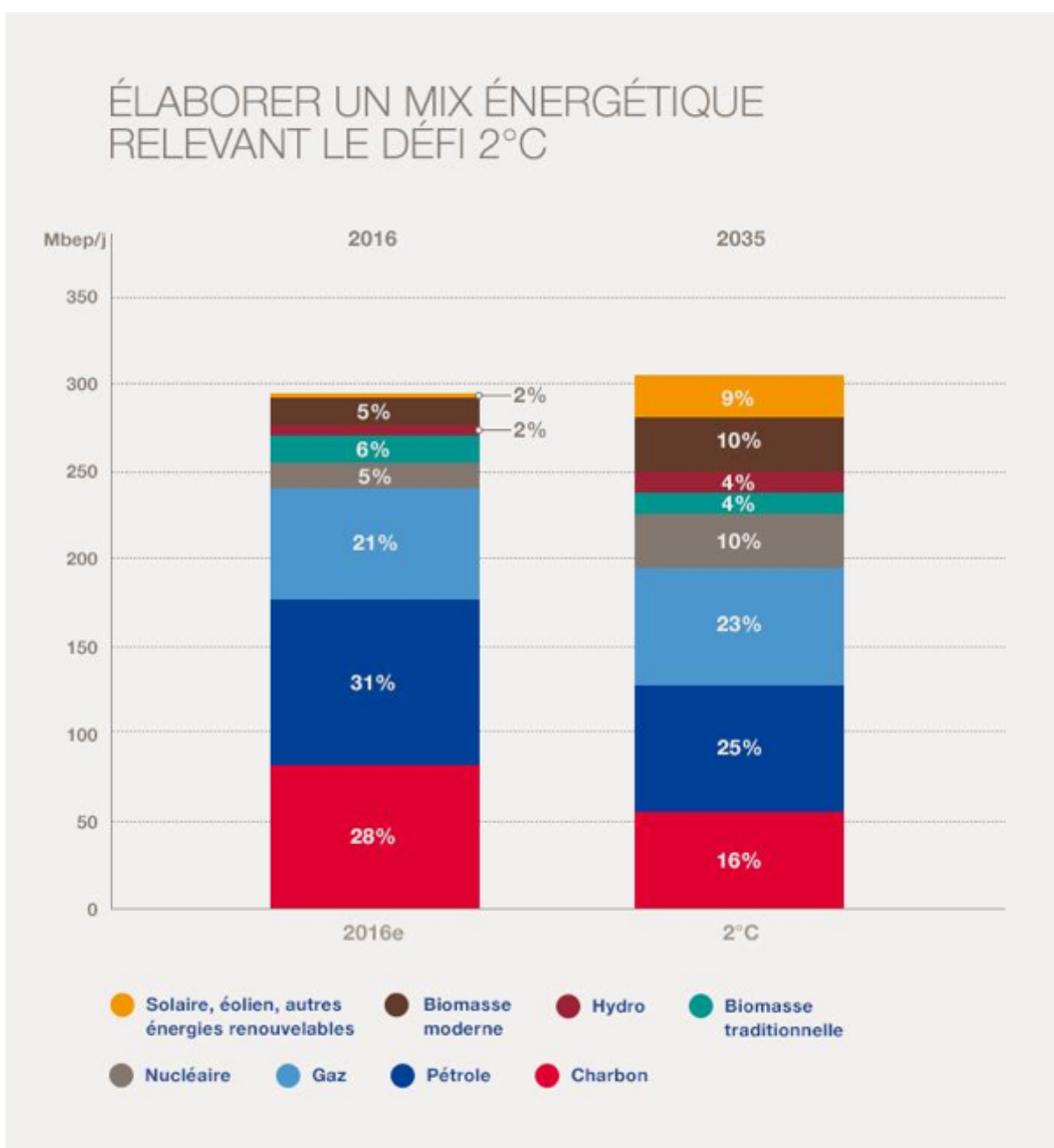
Voir en Annexe



3- Quels sont les produits issus du sous-sol qui vont être les plus impactés par « la transition énergétique » ?

3-1 Le « mix » énergétique visé.

Le groupe TOTAL a publié en 2017 une étude définissant ce que devrait être le mix énergétique pour la production d'électricité, en 2035, pour rester dans le cadre des accords de Paris (COP21) et contenir l'évolution climatique à une augmentation de 2°C seulement. Cette étude, résumée par le graphe suivant, exprime les variations en pourcentage. Cette approche est très intéressante mais ce n'est pas en pourcentage qu'il convient de comparer les deux mix énergétiques mais en valeur absolue ! Et comparer à ce qu'aurait été cette évolution sans la rupture due à la « transition énergétique ».





Comme la consommation en énergie au niveau mondial varie grosso modo comme le PIB mondial et avec un PIB en croissance de 3,5%/an en 2035 on consommera deux fois plus d'énergie que en 2016.

Le tableau ci-dessous montre l'évolution, non plus en pourcentage mais en quantité des sources d'énergie à l'horizon 2035 selon qu'une transition énergétique est mise en place ou pas pour limiter les gaz à effet de serre. Ces valeurs ont été calculées par l'auteur à partir du document TOTAL ci-dessus.

valeurs: TEP	Année 2016	Année 2035	
		sans transition	avec transition
Charbon	28	56	32
Pétrole	31	62	50
Gaz naturel	21	42	46
Nucléaire	5	10	20
Biomasse tradi	6	12	8
Hydraulique	2	4	8
Biomasse moderne	5	10	20
Solaire/Eolien	2	4	16
TOTAL	100	200	200

Dans ces conditions on constate les faits suivants avec la transition énergétique :

- Le charbon : on consommera toujours du charbon en 2035 en quantité légèrement supérieure. Mais la croissance sera quasiment bloquée.
- Le pétrole : la consommation de pétrole sera nettement supérieure en 2035, moins toutefois que ce qu'elle aurait été sans la transition énergétique.
- Le gaz naturel : on consommera beaucoup plus de gaz naturel en 2035, et significativement plus que ce que l'on aurait consommé sans la transition énergétique.
- Le nucléaire : la quantité d'énergie produite dans les centrales sera multipliée par 4 ce qui est une très forte augmentation.
- L'hydraulique passe de 2 à 8 contre 4 théoriquement.
- La biomasse « moderne » passe de 5 à 20 contre 10.
- Solaire et éolien passent de 2 à 18 contre 4 théoriquement.

Pour la production d'énergie électrique les gagnants sont donc

- le gaz naturel,
- le nucléaire,
- l'hydraulique,
- et surtout l'éolien et le photovoltaïque.

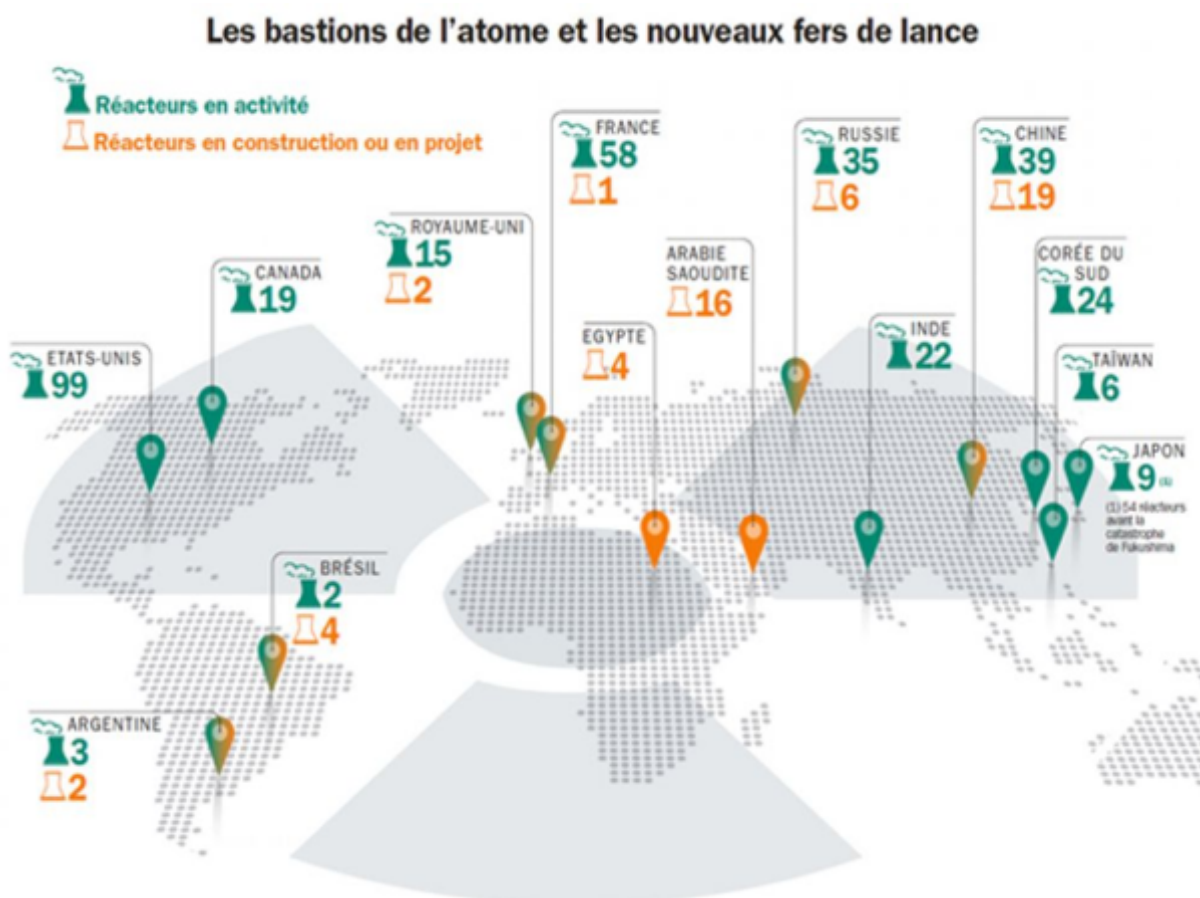
C'est peut-être la raison pour laquelle les producteurs et vendeurs de gaz naturel sont de fervents défenseurs des énergies renouvelables... et de la biomasse moderne.



3-2 Produits issus du sous-sol impactés pour la production d'énergie électrique.

3-2-1 L'uranium.

L'uranium est actuellement la forme la plus concentrée d'énergie que nous connaissons et maîtrisons. A masse équivalente un combustible nucléaire dégage un million de fois plus d'énergie que les combustibles fossiles. L'uranium devrait voir sa consommation multipliée par 4 d'ici 2040 dans le monde. Au premier janvier 2020 il y avait 442 réacteurs nucléaires en fonctionnement dans le monde dont 58 en France. De plus il y a actuellement en cours la construction de 53 réacteurs nucléaires, la plupart de forte puissance de type EPR, la Chine ayant les projets les plus ambitieux avec 12 EPR en construction.



3-2-2 Le gaz naturel.

Voir ci-dessus.

3-2-3 Le cuivre.

Les énergies renouvelables intermittentes telles que le solaire et l'éolien sont de très grandes dévoreuses de ce métal. En effet il s'agit d'une énergie dispersée et qui se trouve souvent loin des grands réseaux de distribution. C'est particulièrement le cas de l'éolien ou la production d'électricité est faite « en haut du mat ». Il convient alors de conduire cette production en « pied de mat » puis de relier les éoliennes entre elles avant de transporter cette électricité dans un réseau parfois fort loin du lieu de production.



C'est aussi et surtout le cas de l'éolien « off-shore » avec des « fermes » d'éoliennes à plusieurs dizaines de kilomètres de la côte.



Le rapide calcul ci-dessous montre que pour une même production d'électricité les quantités de cuivre nécessaires pour acheminer le courant produit au réseau principal sont considérables. Certes le diamètre des câbles en cuivre dépend, en partie, de la puissance qui circule mais l'écart est énorme. Il en est de même pour la comparaison entre photovoltaïque et uranium. A noter que les valeurs indiquées pour l'énergie nucléaire sont identiques pour l'énergie gaz ou charbon bien sûr.

Comparaison en km de câbles en cuivre entre Nucleaire et eolien			
	Nucleaire (EPR)	Eolien terrestre	Eolien off-shore
Puissance installée (MW)	1300	3	12
facteur de chage	0,8	0,22	0,35
Puissance delivrée moyenne(MW)	1040	0,66	4,2
Nombre d eoliennes		1970	310
Hauteur du mat (m)		100	200
Distance entre eoliennes (m)		200	500
km cable de la turbine au sol		197	62
km cable entre eoliennes		394	155
Liaison parc/Reseau	5	10	50
Total km de cables	5	601	267

3-2-4 Le ciment et le béton.

Le tableau ci-dessous montre que pour l'éolien terrestre classique il faut environ 6 fois plus de béton pour la même puissance disponible que pour le nucléaire. Pour l'éolien off-shore ce chiffre est beaucoup plus élevé bien sûr. La plus grosse éolienne destinée à l'off-shore, le modèle HaliadeX de General Electric a une puissance installée de 12 MW et un mat de 200 mètres de haut. Le poids de la turbine, juchée au sommet du mat fait 700 tonnes ...



Tonnes de béton nécessaire: comparaison nucléaire/Eolien				
			Nucléaire (EPR)	Eolien terrestre
Puissance installée (MW)			1600	2
Facteur de charge			0,8	0,22
Puissance disponible (MW)			1280	0,44
Nombre d'éoliennes nécessaires				2909
T de béton par unité			750000	1500
Millions de T de béton total			0,75	4,4

Rappelons qu'une cimenterie de taille moyenne a une production de l'ordre de 1 million de tonnes de ciment par an.

3-2-5 L'acier.

Tonnes d'acier nécessaire: comparaison nucléaire/Eolien				
			Nucléaire (EPR)	Eolien terrestre
Puissance installée (MW)			1600	2
Facteur de charge			0,8	0,22
Puissance disponible (MW)			1280	0,44
Nombre d'éoliennes nécessaires				2909
T d'acier par unité			40000	150
kT d'acier total			40	436

A puissance disponible équivalente il faut 11 fois plus d'acier en éolien terrestre que pour un nucléaire type EPR Flamanville. Du fait de la hauteur des mats et d'une plus grande demande d'acier de ferrailage pour béton l'éolien off-shore est plutôt autour de 20 à 30.

3-2-6 Les terres rares.

Les terres rares permettent de fabriquer des aimants permanents puissants, de petite taille et de poids faible utilisés dans les générateurs électriques en lieu et place de l'acier classique.

Si on peut s'en passer dans le cas des centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires, ce n'est pas le cas de la production d'énergie électrique par de l'éolien le générateur pouvant être fixé au sommet d'un mat qui peut atteindre 200 mètres de haut. Il convient qu'il soit le plus léger possible.

3-2-7 Le silicium

Le silicium, obtenu par réduction de la silice (quartz essentiellement) est largement utilisé depuis fort longtemps pour fabriquer des abrasifs (carbure de silicium) ou des silicones. Nous verrons plus en avant comment on fabrique du silicium pour photovoltaïque ou électronique.



3-3 Produits issus du sous-sol impactés pour la mobilité : véhicules terrestres essentiellement.

3-3-1 Le cuivre.

Une voiture électrique nécessite la mise en œuvre de 80kg de cuivre contre 20 kg pour un véhicule thermique soit 60 kg de plus par véhicule. Pour 10 millions de véhicules électriques cela représente une augmentation de la consommation de cuivre de 600 000 tonnes à rapporter à une consommation annuelle mondiale de 25 millions de tonnes... Ceci n'est pas du tout marginal. Si l'on pense que 70% de ce cuivre pourra être récupéré et réutilisé quelques années plus tard cela fait quand même une augmentation nette de 180 000 tonnes de cuivre par an... Pour se faire une idée le parc automobile Français représente 40 millions de véhicules.....et la France ne pèse que 1% de la population mondiale !

3-3-2 Les produits nécessaires au stockage de l'électricité : les batteries.

Les batteries à base de plomb couramment utilisées depuis plus d'un siècle ne conviennent pas pour la « transition énergétique ». Leur poids très élevé et leur faible capacité de stockage ne permettent pas un fonctionnement « tout électrique ». Pour les batteries Li-ion on va utiliser :

- du lithium,
- du graphite,
- du nickel et du cobalt dans une moindre mesure.

3-4 Les produits nécessaires à l'isolation thermique des bâtiments individuels et collectifs.

Il y a de très nombreux moyens pour assurer cette isolation thermique, les produits se différenciant par leur mode d'application, leurs performances techniques et bien sûr leur coût. Les principaux produits issus du sous-sol sont alors :

- la laine de verre (ISOVER ou autres),
- la laine de roche (Rockwool ou autres),
- la perlite expansée non broyée (Placo),
- la vermiculite exfoliée dans une moindre mesure.

4- Quelques notions simples d'économie minière.

Les minéraux et les métaux ne se trouvent bien évidemment pas dans leur état final d'utilisation dans la nature, encore convient-il de le rappeler. Pour les produire il faut explorer afin de trouver des gisements, estimer ces gisements, ouvrir des mines ou carrières, traiter le minerai extrait, extraire le métal, stocker les résidus, transporter les minerais, ou les concentrés métalliques sur le plus souvent de grandes distances. Toutes ces opérations sont génératrices d'importants besoins en énergie et, dans l'état actuel de la technique, fortement émettrices de gaz à effet de serre ou autres produits parfois peu sympathiques tels que métaux lourds toxiques, arsenic, produits radioactifs etc... Entre la découverte d'un gisement et sa mise en exploitation, les études, l'obtention des permis et la réalisation des investissements nécessite en moyenne une bonne dizaine d'années...quand tout se « passe bien ».



4-1 La notion de ressource et de réserve.

Cette notion fondamentale est bien souvent ignorée par les journalistes qui n'ont sans doute pas le temps d'approfondir le sujet... Pour bien comprendre ces notions suivons la démarche qui précède l'ouverture d'un gisement minéral.

-1- L'exploration géologique permet de trouver des « indices » qui sont systématiquement étudiés.

-2- Si l'un de ces « indices » montre effectivement une concentration significative en minerai de valeur et si le volume paraît important on peut dire que l'on a trouvé un GISEMENT.

-3- Les géologues vont étudier ce gisement le plus souvent à l'aide de sondages de manière à déterminer le tonnage de métal contenu en fonction de la teneur du minerai. On définit ainsi une ressource minérale dont la définition précise est la suivante : **UNE RESSOURCE EST UNE CONCENTRATION ANORMALE DE L'ECORCE TERRESTRE EN PRODUITS QUI PEUVENT AVOIR DE LA VALEUR**. La ressource est donc un objet **GEOLOGIQUE INVARIANT** dans l'espace et dans le temps !

-4- Les géologues et les mineurs vont étudier plus finement cette ressource afin de déterminer les zones qui peuvent être exploitées avec profit c'est-à-dire pour lesquelles la valeur récupérée sera supérieure aux coûts totaux. On définit ainsi une réserve : **UNE RESERVE EST LA PARTIE DE LA RESSOURCE QUI PEUT ETRE EXPLOITEE AVEC PROFIT**. Une réserve est donc un objet **ECONOMIQUE VARIABLE** dans l'espace et dans le temps.

4-2 Comment sont fixés les prix des métaux et des minéraux ?

Le prix des métaux de base tels que le cuivre, le fer, le nickel, le cobalt etc. est fixé dans des « bourses » internationales telles que le London Metal Exchange. Il en est de même pour le prix de l'uranium qui est coté à New York ou de l'étain à Kuala Lumpur. Dans ces bourses c'est la loi de l'offre et de la demande qui fixe les cours qui peuvent donc varier considérablement dans le temps. Les cours du nickel sont particulièrement sensibles et il fut une année où le cours était de 2,8 \$US par livre en janvier et de 12 \$US en septembre.... Lorsque les cours augmentent durablement les réserves augmentent et lorsque les cours diminuent elles fondent parfois très rapidement. De la même manière avoir des coûts qui augmentent entraîne une diminution des réserves. Elles augmentent mécaniquement en cas de baisse pérenne des coûts. Le prix des minéraux tels que le graphite, le lithium ou bien encore les terres rares est un prix négocié entre vendeurs et acheteurs sans valeur de référence. Lorsqu'un vendeur domine outrageusement le marché comme par exemple la Chine dans les terres rares il n'a pas intérêt à augmenter inconsidérément ses prix sous peine de voir des concurrents entrer sur le marché. De la même manière si un fournisseur « pèse lourd » sur le marché il peut avoir tendance à baisser ses prix significativement pour « tuer » ses concurrents et/ou empêcher le développement de projets concurrents

Le prix du baril de pétrole est globalement fixé par une association de fournisseurs comme par exemple l'OPEP bien connu. Le prix du gaz naturel suit les évolutions du prix du pétrole.



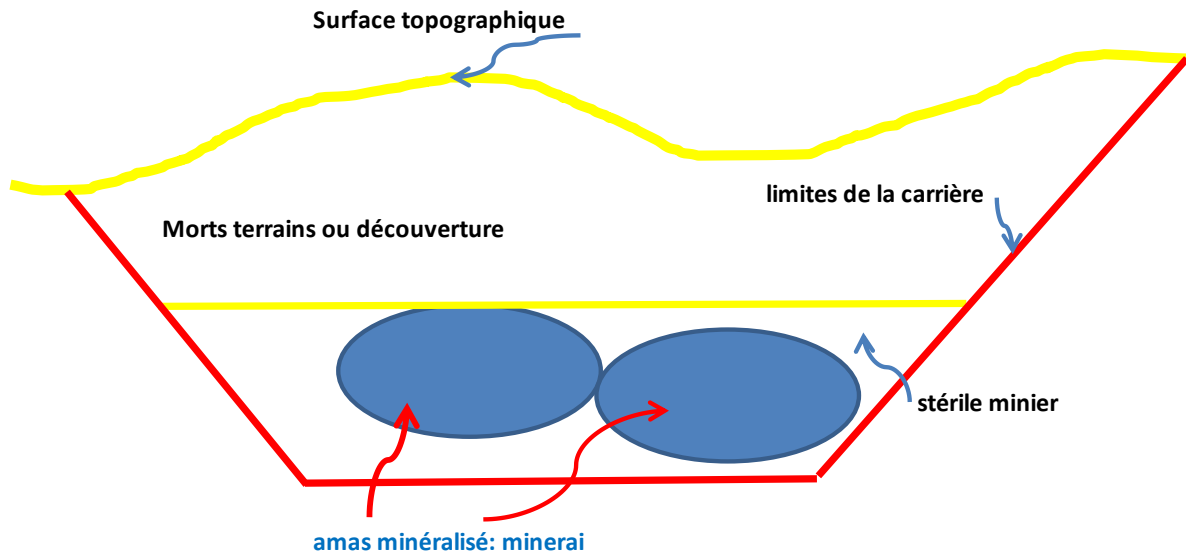
4-3 La notion de « ratio minier ».

Lorsque on exploite une mine il faut :

- enlever les terres ou roches qui recouvrent le gisement dans le cas d'une exploitation en carrière,
- éliminer ensuite les parties du gisement qui sont à une teneur trop faible pour être exploitées avec profit.

C'est ce que l'on appelle les stériles miniers.

- extraire ensuite le minerai.



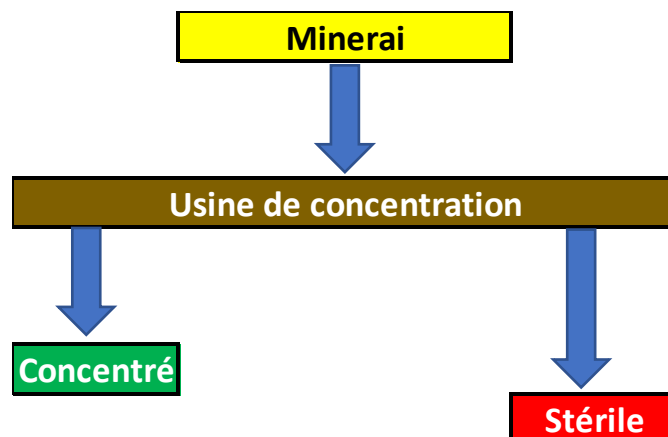
On définit le ratio minier comme suit :

$(\text{Tonnes de minerai} + \text{tonnes de stériles minier} + \text{tonnes de découverte}) / \text{Tonnes de minerai}$

Dans l'industrie minière un ratio de 3 à 5 est fréquent.

Mais l'aventure ne s'arrête pas là. Le minerai est généralement envoyé dans une usine, aussi proche que possible de la mine, qui va séparer le minerai en deux fractions :

- un concentré,
- un stérile de traitement qui doit être stocké de manière sûre.

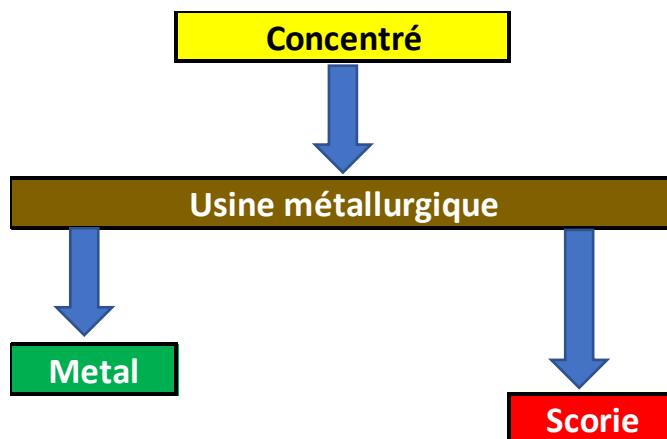




Lors de cette opération on va définir :

- un rendement poids qui est égal au poids ce concentré divisé par le poids du minerai entrant,
- un rendement métal qui est le rapport entre la quantité de métal contenu dans le concentré divisé par la quantité de métal contenu dans le minerai entrant.

Mais un concentré, s'il a une valeur, n'a aucune utilité ; il faut donc en extraire le métal, qui lui, est utile.



Dans l'exemple suivant nous avons regardé une mine de cuivre exploitant un minerai à 0,7% cuivre, ce qui est la teneur moyenne des minerais exploités dans le monde à ce jour, et fait un bilan matière complet des opérations. On constate que pour produire une tonne de cuivre métal il faut manipuler 940 tonnes au total : mine + usine d'enrichissement + usine métallurgique. Et l'essentiel des tonnes manipulées, c'est-à-dire, l'essentiel de la dépense énergétique est sur mine dans la plupart des cas. Ce facteur est le plus souvent oublié dans les calculs soit d'empreinte carbone totale soit de bilan énergétique total d'un produit donné.

Bilan total minerais de cuivre sous forme de chalcopirite

Teneur minerai %	0,7	0,6
production de cuivre métal T	1	1
rendement métal metallurgie	99	99
T cuivre entrant metallurgie	1,01	1,01
teneur Cu du concentré	25	25
tonnes de concentré nécessaires	4,04	4,04
usine de concentration		
teneur stérile	0,07	0,07
rendement poids en concentré	2,5	2,1
tonnes de minerai nécessaires	160	190
tonnes de stériles	155,8	186,0
ratio minier	4	4
tonnes manipulées mine	623	744
total tonnes à manipuler	939	1120



Si, du fait de la transition énergétique la demande en cuivre augmente anormalement cela se traduira par une augmentation du prix du cuivre et une baisse des teneurs moyennes par exemple de 0,7% à 0,6%. Dans ce cas, Il faudra donc manipuler 20% de minerai en plus donc consommer 20% d'énergie en plus entre la mine et le métal... Mais il est possible que la teneur doive être encore plus basse bien sûr. La mine de cuivre de Aitik en Suède exploite déjà un minerai à 0,5% de cuivre.

5- Comment allons-nous analyser chaque produit minéral impacté par la transition énergétique ?

Dans les chapitres suivants et pour chaque minéral analysé nous allons regarder :

- comment se sont formés les gisements ?
- quelles sont les applications industrielles ?
- quelle est la composition du « minerai » extrait du sous-sol ?
- quel est le niveau des ressources connues à ce jour au niveau mondial ?
- quels sont les procédés qui permettent d'arriver au produit final ?
- qui sont les principaux acteurs au niveau mondial et comment est organisé le marché ?
- quelles sont les principaux aspects géopolitiques ?

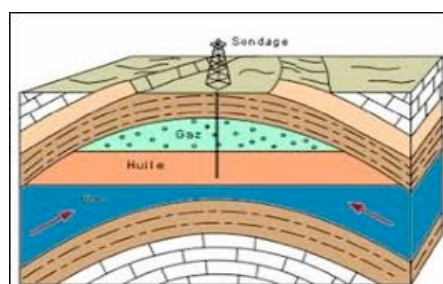
Bien évidemment nous ne pourrons pas passer en revue la totalité des minéraux impactés et nous contenterons :

- du gaz naturel,
- de l'uranium,
- du lithium,
- du graphite,
- des terres rares,
- du silicium.

6- Le gaz naturel.

6-1 Comment se forment les gisements de gaz naturel ?

Tout comme le pétrole, le gaz naturel est issu de plancton et d'algues qui ont sédimenté au fond des océans et qui sous l'effet de la pression et de la température se sont transformés. Ces produits ont migré vers la surface depuis la roche « mère » (ci-dessous colorée en bleu) pour être stockés dans des roches perméables en raison de la présence de couches imperméables sus jacentes : le piège.

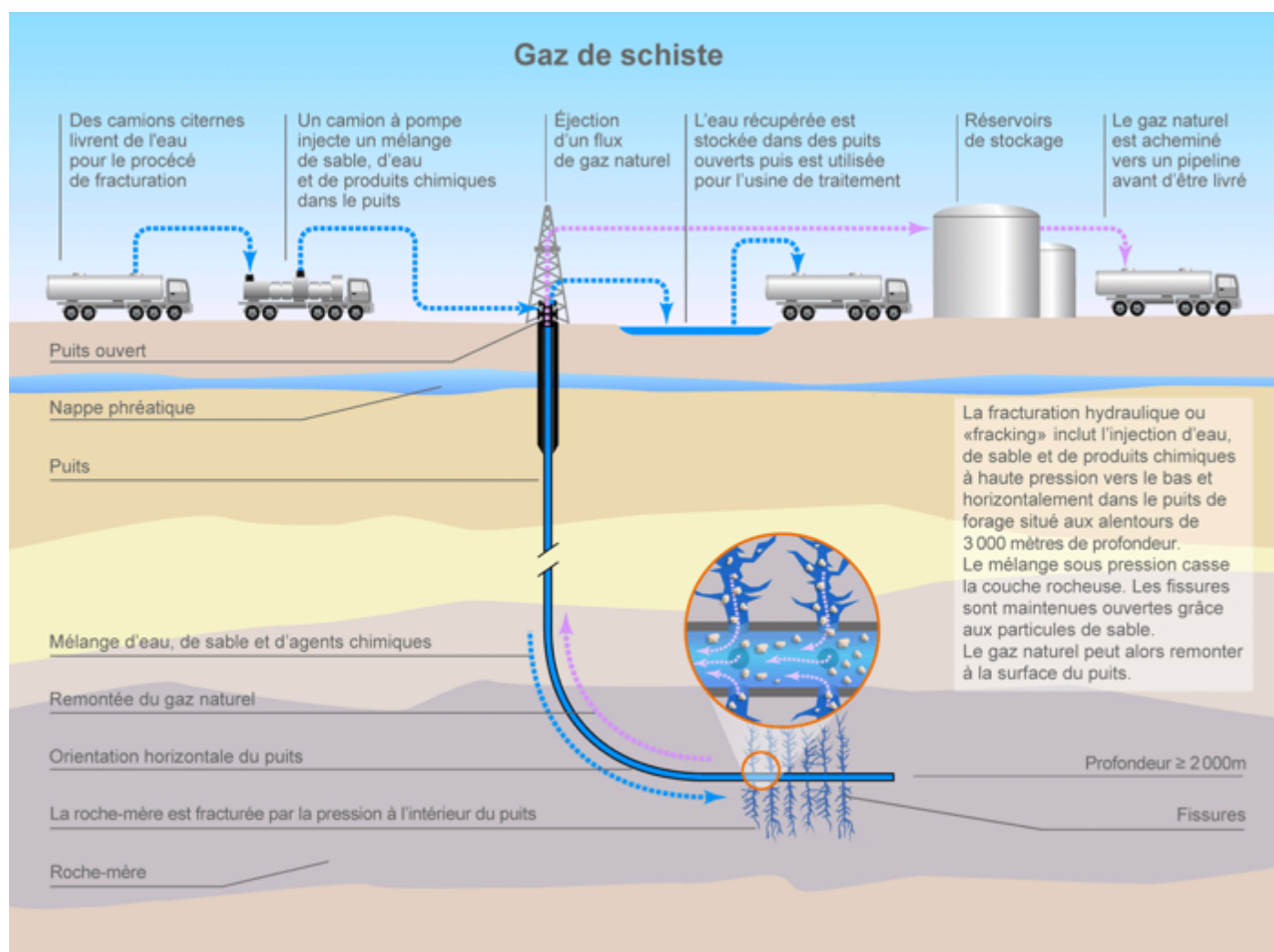




L'extraction, comme pour le pétrole se fait par le fonçage de puits parfois très profonds, plus de 1000 mètres, qui dans les niveaux supérieurs vont traverser les nappes phréatiques. Lorsque ces puits sont forés selon les règles « de l'art » par des sociétés professionnelles il n'y a pas de problèmes de pollution, les techniques pour étancher parfaitement les puits étant connues et pratiquées depuis fort longtemps.

Le cas particulier des gaz « de schiste ».

Le gaz de schiste est un gaz directement obtenu à partir de forages profonds dans la roche mère. Comme la vitesse de circulation du gaz dans la roche mère est extrêmement lente en raison de sa faible porosité on va pratiquer, au fond du puits une fracturation hydraulique en injectant de l'eau sous très forte pression. Pour éviter que la roche, sous l'effet de son propre poids ne se referme, on va injecter des produits durs de petite taille (de 200 à 500 micromètres) : pour ce faire on utilise du quartz obtenu à partir de gisements de sable ou des céramiques particulières appelées « proppants ».



La même technique est couramment utilisée dans les puits de pétrole depuis plus de 50 ans... C'est ce qui a permis d'améliorer de manière considérable la récupération du pétrole. Dans certains cas on est obligé d'ajouter des agents chimiques tensio-actifs qui vont diminuer la viscosité du pétrole brut.



6-2 Que contient le gaz naturel extrait du puits et qu'en fait-on ?

C'est un mélange de différents produits qui doivent être séparés et éliminés :

- du méthane CH₄,
- du CO₂ en quantité variable parfois importante,
- des gaz dits « acides »,
- de l'hélium (pas toujours),
- des gouttes de pétrole,
- parfois du soufre (exemple du gaz de Lacq en France).

Le gaz de chaque puits est alors transféré vers des installations industrielles fixes qui vont assurer la séparation. Le CO₂ est émis dans l'atmosphère. Les gaz « acides » essentiellement de l'hydrogène sulfuré (H₂S) sont envoyés dans l'atmosphère lorsqu'ils sont en faible quantité. Lorsqu'il y a beaucoup de H₂S ce gaz est alors traité pour en récupérer le soufre dont c'est la source principale dans le monde. Les gouttes de pétrole sont en fait peu importantes mais elles sont généralement stockées avant expédition vers une raffinerie ou alors brûlées sur place dans des torchères.

Le gaz naturel ainsi purifié est alors comprimé avant envoi dans des gazoducs sur de grandes distances ou liquéfié avant expédition par navires méthaniers. Mais les gazoducs qui peuvent faire plusieurs milliers de kilomètres ne sont pas parfaitement étanches et certains estiment par exemple que les pertes entre la Sibérie et l'Europe occidentale sont de l'ordre de 10%. Ces fuites se répandent alors dans l'atmosphère où elles concourent à l'effet de serre, le méthane étant un gaz à effet de serre infiniment plus puissant que le CO₂ (pour les lecteurs intéressés le site de l'Institut Français du Pétrole IFP Energies nouvelles donne des informations plus détaillées).

Si le gaz naturel est une énergie plus propre que le charbon ou le pétrole au moment de sa combustion on ne peut pour autant affirmer que c'est une énergie « verte » ...

6-3 Quel est le niveau des ressources en gaz naturel connues à ce jour ?

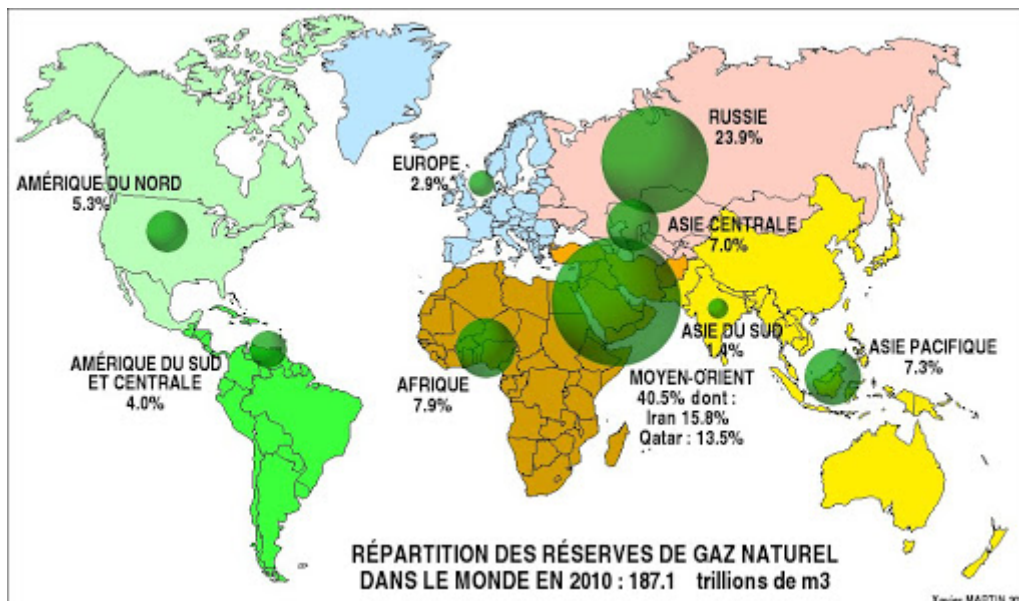
6-3-1 Les ressources en gaz conventionnel.

Elles sont mal connues et en tout cas il y peu de publications par les sociétés exploitantes qui préfèrent parler de réserves exploitables économiquement à un instant donné. D'après une étude faite par BP et publiée par Gazprom par exemple on estime les réserves en 2020 à 200 milliards de m³ soit 5 milliards de plus qu'en 2019. D'après EDF ceci correspondrait à 63 ans de réserves. Les ressources quant à elles sont vraisemblablement plus importantes et correspondent sans doute à plus de cent ans. Il faut noter que lorsque les cours sont bas les sociétés pétrolières et gazières réduisent leurs dépenses d'exploration ...

Cependant pour le gaz naturel les réserves sont très inégalement réparties sur la planète ce qui incite les pays consommateurs sans réserve sur leur sol à diversifier leurs approvisionnement. Ainsi la France achète :

- 25% de gaz Russe,
- 45% de gaz Norvégien,
- 10% de gaz Algérien.

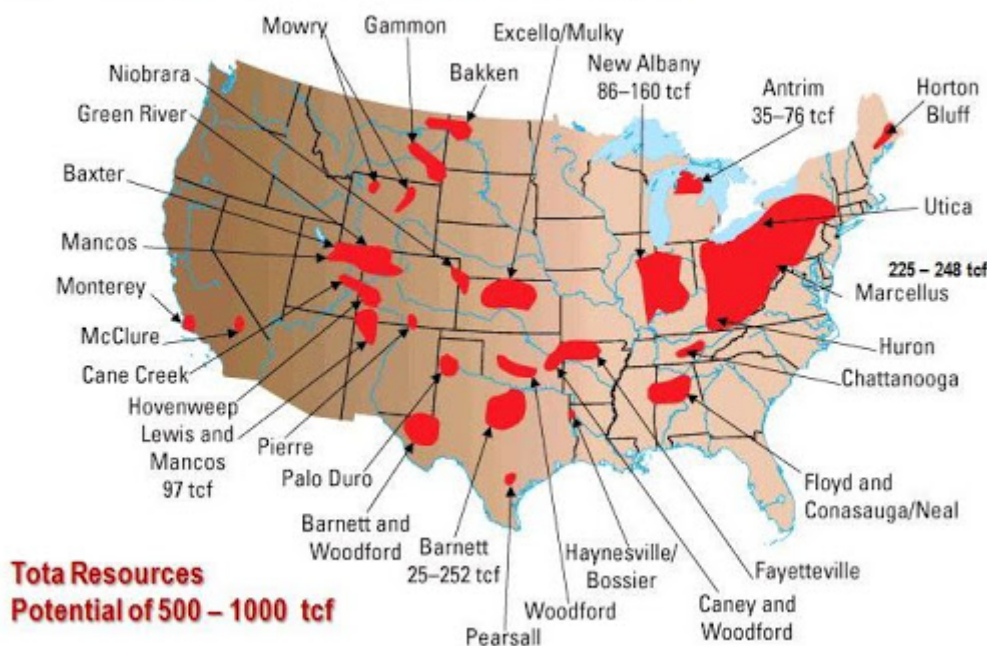
Ci-dessous la carte des réserves en gaz naturel dans le monde qui montre l'inégale répartition au niveau mondial des réserves en gaz conventionnel et la part très importante du Moyen Orient et de la Russie.



6-3-2 Gaz non conventionnels ou gaz de schistes.

A part aux USA où les gaz de schiste sont exploités depuis plusieurs années les ressources sont mal connues. Ces ressources pourraient être significativement supérieures à celle des ressources dites « conventionnelles ». Cette exploitation a permis aux USA de devenir exportateurs de gaz naturel alors qu'auparavant ils importaient du gaz naturel. Toutefois, en dessous d'un prix du baril de pétrole de l'ordre de 75 \$US (le cours du gaz est indexé sur le cours du pétrole) les gaz de schiste ne sont pas ou peu exploités mais ...la ressource subsiste.

Shale Gas Basins In The United States





7- L'Uranium

7-1 Comment se forment les gisements d'uranium ?

Tout comme les autres métaux, l'uranium fait partie de la constitution primitive de la terre telle que on la pressent à ce jour. C'est le résultat du bombardement, il y a 4,5 milliards d'années, de notre planète par des corps célestes qui contenaient entre autres de l'uranium. Contrairement à une idée fausse, hélas largement répandue, l'uranium n'est pas une source d'énergie fossile comme le pétrole, le gaz naturel ou le charbon.

L'Uranium est abondant sur terre, beaucoup plus que l'or ou l'argent. On va donc trouver de l'uranium un peu partout car c'est un élément facilement soluble dans l'eau sous certaines conditions d'oxydo-réduction. Par exemple l'eau minérale Badoit contient, à sa source environ 58 µg/litre d'uranium ... contre moins de 10 pour « l'eau du robinet » en milieu calcaire. Lorsque les conditions d'oxydo-réduction changent cet uranium va alors « précipiter » et former des concentrations anormales. Les principaux gisements d'uranium vont donc se présenter :

- sous forme de filons hydrothermaux en périphérie des massifs granitiques où le minéral associé est la pechblende :



C'est ce type de minéralisation qui a permis, en France le développement de l'industrie nucléaire avec la découverte et la mise en exploitation des gisements du Limousin, de Vendée. Les gisements de Saint-Hyppolyte dans le Bas-Rhin et de Trougemont dans les Vosges sont de ce type.

- associé à des oxydes de fer et à des argiles comme par exemple le gisement de Coutras en France ou d'Imouraren au Niger,
- associé à des minerais phosphatés ou la teneur peut aller de 200 ppm pour les gisements de Floride à plus de 2 000 ppm pour le gisement de phosphate de Itataia au NE du Brésil, gisement qui n'est pas exploité à ce jour.

Les minerais d'uranium étant radioactifs il est aisé de les trouver en mesurant la radioactivité naturelle au sol avec des compteur « Geiger » pour autant que ces gisements soient peu profonds : moins de 100 mètres.

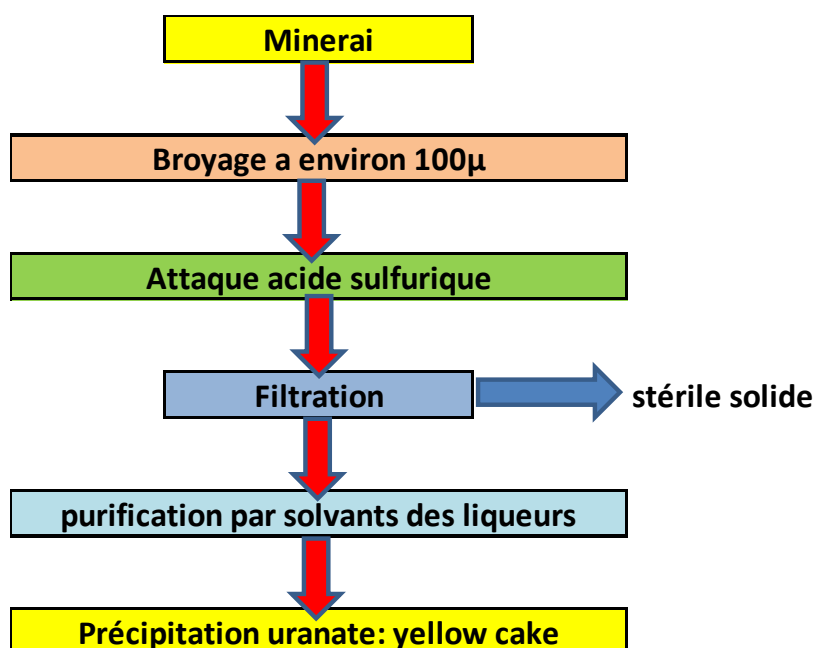


Pour les gisements plus profonds il n'y a plus d'activité en surface et seul un raisonnement géologique permet de les trouver comme par exemple le gisement de Cigar Lake au Nord Saskatchewan au Canada. La teneur moyenne des gisements d'uranium est très variable :

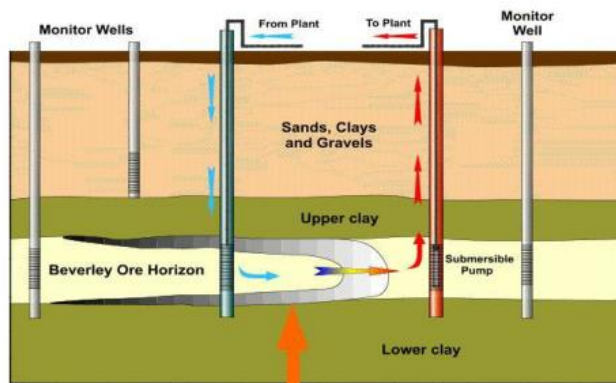
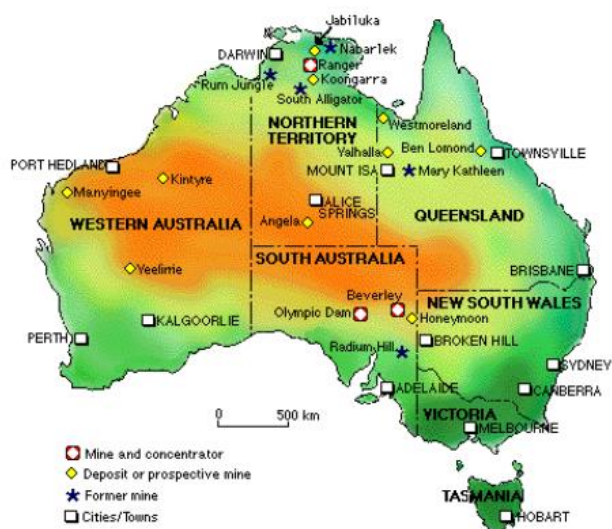
- de 1 à 4/5 kg par tonne pour beaucoup de gisements,
- plus de 200 kg/tonne pour les gisements du Canada par suite de la découverte par des géologues Français de Cogema/Imétal du gisement de Cluff Lake qui contenait 350 kg par tonne !

7-2 Comment récupère t'on l'uranium à partir des gisements existants ?

La technique la plus répandue est la suivante après extraction du minerai en souterrain ou en carrière :



Dans certains cas géologiquement favorables on va pouvoir faire une lixiviation « in situ » par injection de solutions acides directement dans le gisement comme pour certains gisements au Kazakhstan ou en Australie par exemple.



Uranium Deposit
Documents World Nuclear Association



Les liqueurs pompées sont alors traitées par solvants comme pour les minerais en roche avant précipitation du « yellow cake ». Ce « yellow cake » est alors traité dans des usines spécifiques. Par diffusion gazeuse ou ultra centrifugation on va pouvoir séparer les isotopes de l'uranium et fabriquer le combustible.

7-3 Ressources et réserves.

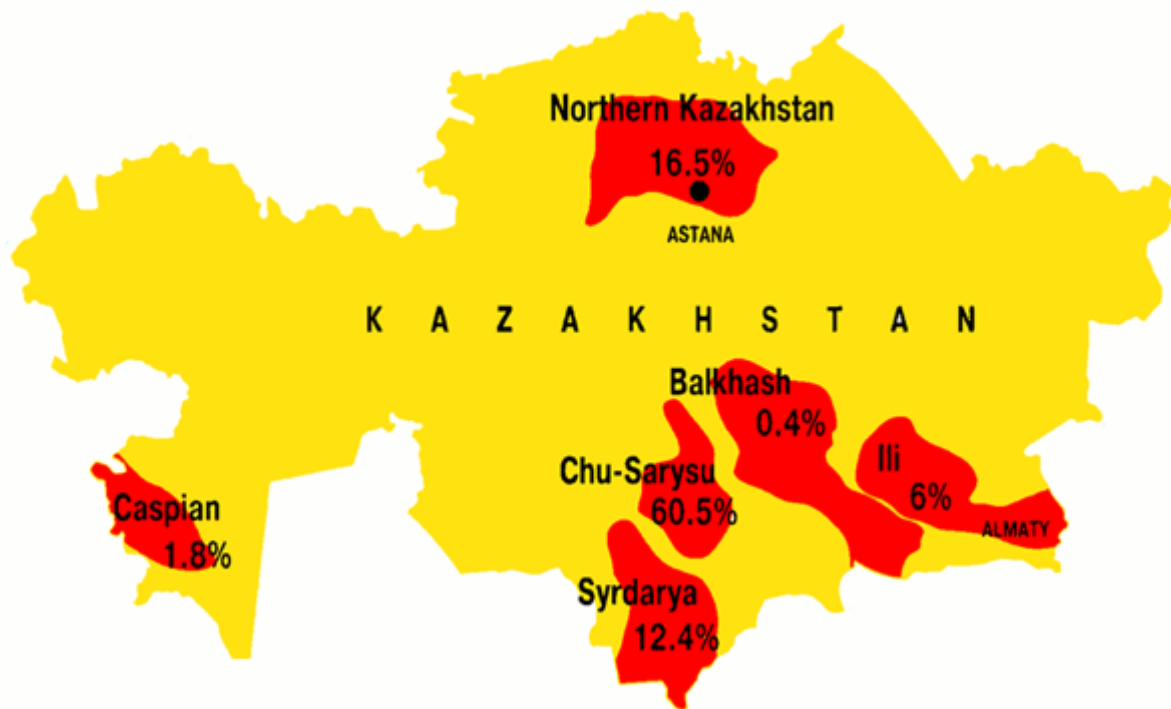
Les ressources sont considérables et mal connues à ce jour mais tous les pays qui ont dans leur sous-sol des massifs granitiques sont susceptibles de contenir des gisements d'uranium. Les phosphates sont également une importante ressource. Les Etats Unis en Floride pourraient produire à partir des phosphates l'équivalent de la consommation de la France soit 10 000 tonnes/an. Le gisement de Itataia au Brésil, qui n'est pas en exploitation à ce jour, contient à lui seul plus de 500 000 tonnes d'uranium... Au cours actuel, pratiquement inchangé depuis les années 2010 de 30 \$US/lb les réserves connues en 2013 sont les suivantes :

ng	Pays	Réserves 2007	%	Réserves 2013	%
1	Australie	725	22,0	1 706	29
2	Kazakhstan	378	11,5	679	12
3	Russie	172	5,2	506	9
4	Canada	329	10,0	494	8
5	Niger	243	7,4	405	7
6	Namibie	176	5,3	383	6
7	Afrique du Sud	284	8,6	338	6
8	Brésil	157	4,8	276	5
9	États-Unis	334	10,3	207,4	4
10	Chine	?	?	199	4
	Total 10 premiers	2 213	67,1	5 193	88
	Total monde	3 300	100	5 903	100

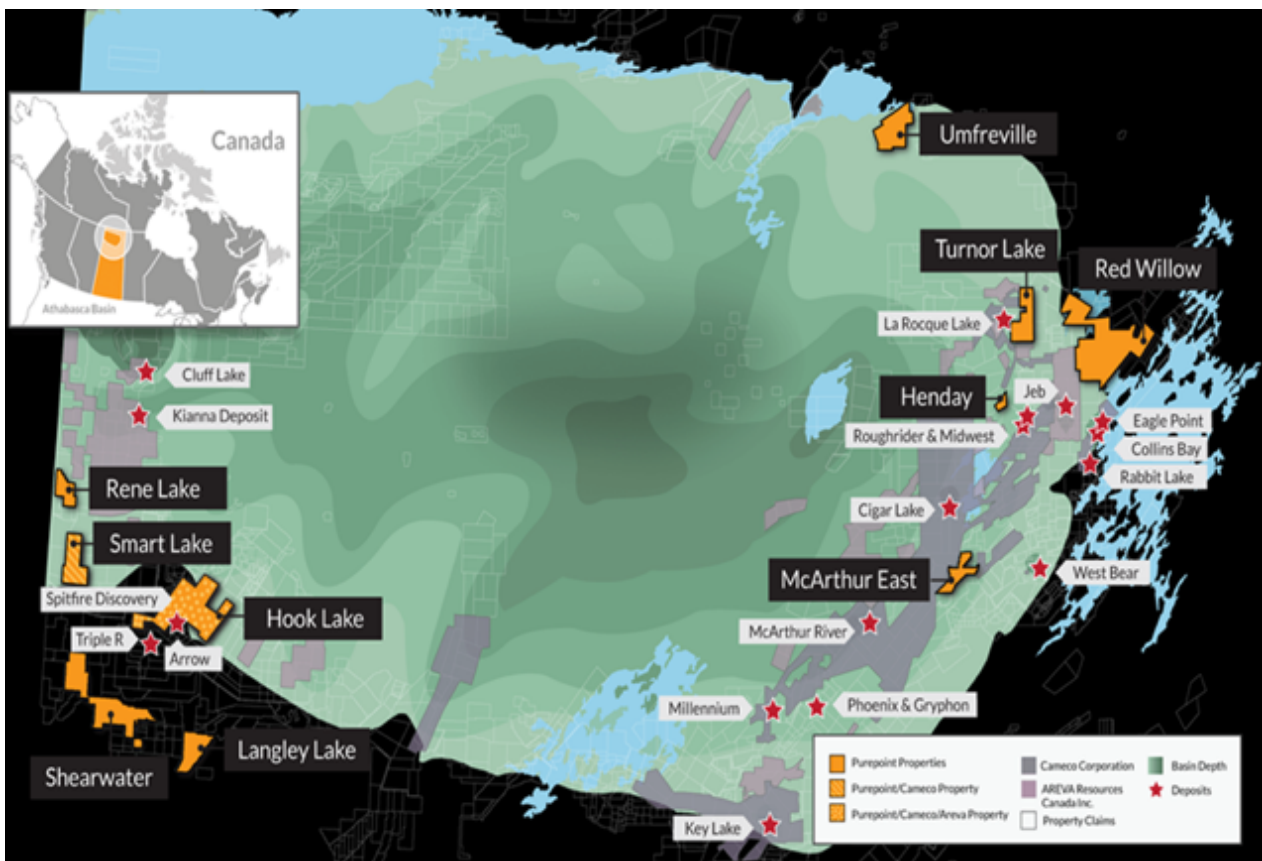
La consommation mondiale d'uranium étant actuellement de 60 000 tonnes/an les réserves, à ce cours, représentent une centaine d'années. La production mondiale est d'environ 60 000 tonnes par an. Le cours actuel de l'uranium est autour de 30 \$US/lb ce qui est un cours historiquement bas. Nul doute qu'avec le développement inévitable de l'énergie nucléaire au niveau mondial le cours va croître ce qui va dégager de nouvelles réserves.

7-4 Principaux pays producteurs.

Le premier producteur mondial est le Kazakhstan avec 38% de la production mondiale totale.



Le deuxième producteur mondial est le Canada avec 15% de la production mondiale. A noter que les gisements canadiens, quasiment tous découverts par des géologues Français de Cogema (ex Areva) sont remarquables par leur importante teneur qui excède 100 kg par tonne de minerai. Le gisement de Cigar Lake, dernier mis en exploitation, a une teneur moyenne de 250 kg par tonne de minerai et des réserves (au cours actuel) estimées à plus de 250 000 tonnes. Ce gisement produit annuellement autant d'uranium que la consommation de la France.





Le troisième pays producteur est l'Australie avec 12% de la production mondiale.



Le quatrième pays producteur est la Namibie avec 8% de la production mondiale à partir de sa seule mine de Rossing à des teneurs faibles mais à coût d'exploitation faible. Cette mine a été vendue par le groupe Anglais Rio Tinto à une société Chinoise en janvier 2019. La Chine ayant un ambitieux programme nucléaire sécurisé et anticipe ainsi son approvisionnement.



Mine de Rossing en Namibie



7-4 Risques géopolitiques et principaux acteurs.

Les principaux acteurs sont Kazak Uran (premier producteur mondial) suivi par Cameco (Canada) et Orano (France, ex Areva). Les risques géopolitiques dans l'approvisionnement sont faibles, des pays dits « sensibles » comme le Niger pesant peu dans la production mondiale. En revanche l'acceptation sociétale de l'énergie nucléaire pose des problèmes dans de nombreux pays de par le monde.

8- Le lithium

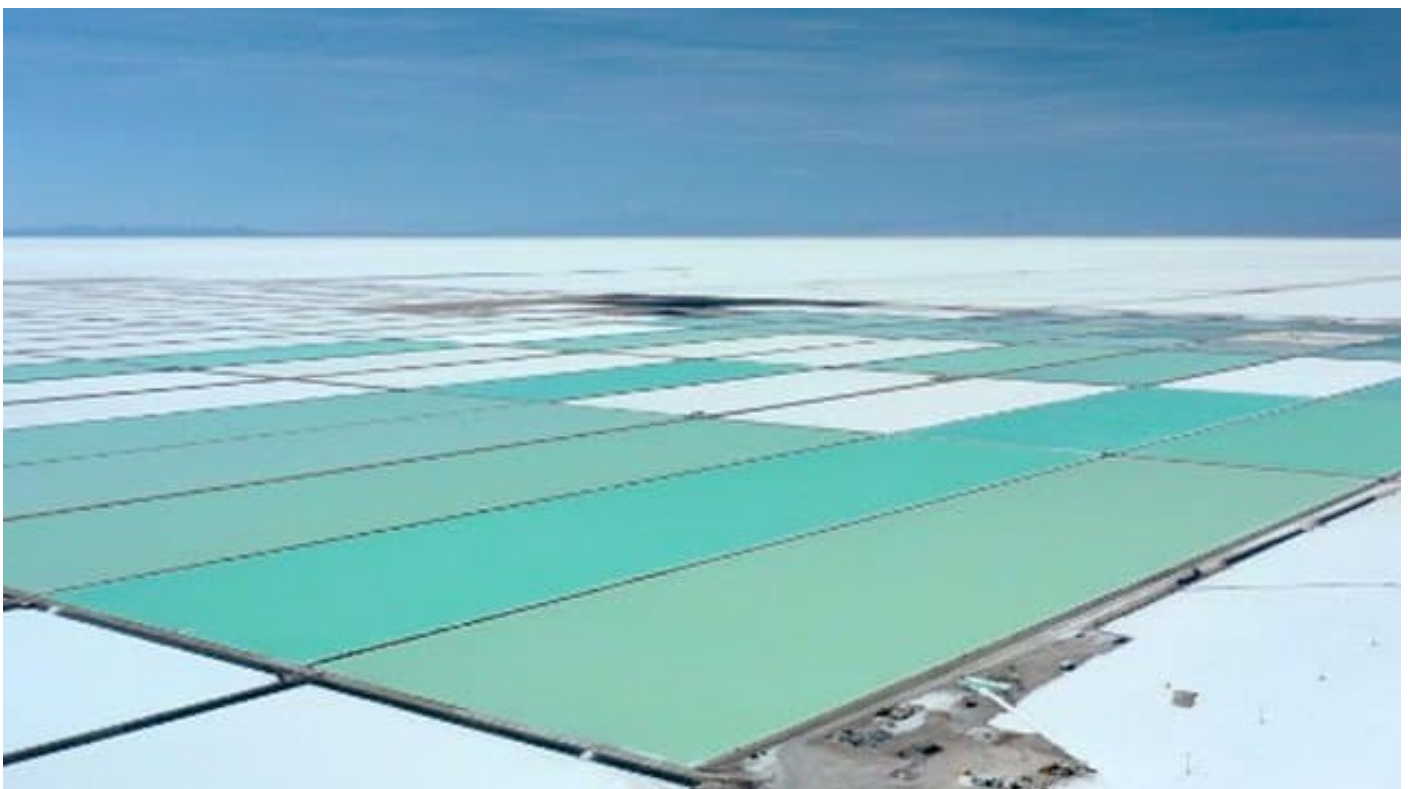
8-1 Origine et composition des minerais.

Le lithium est un élément très abondant sur terre. On le trouve généralement sous deux formes :

- sous forme de chlorure de lithium dans des lacs salés actuels ou fossiles,
- associé à des silicates en particulier des pyroxènes dit spodumène ou à des micas du type lépidolite. Le minéral spodumène contient de 6 à 8% de lithium mais... tous les spodumènes ne sont pas lithinifères.

Dans les lacs salés (les « salars ») le lithium sous forme de LiCl va être associé à d'autres chlorures : Na, Mg, K, Ca parfois. Il faudra donc séparer le lithium des autres éléments. Le lithium dans les silicates va être associé au cortège de minéraux composant les roches cristallines : quartz, mica et autres feldspaths. Il faudra donc produire un concentré de silicates lithinifères.

« Salar » Chilien avec ses zones d'évaporation



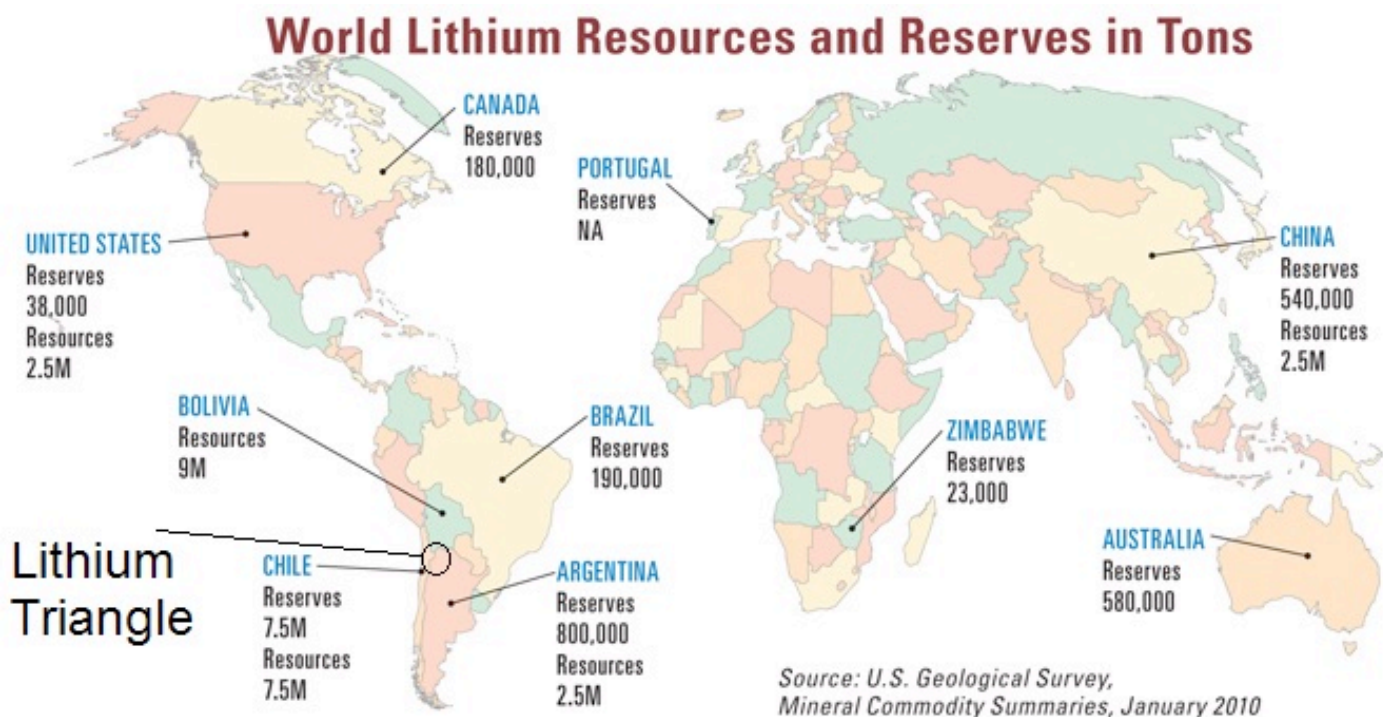


Carrière de pyroxène-spodumène Australie



8-2 Ressources mondiales en lithium.

Le lithium est très abondant sur terre et on va en trouver dans bon nombre de pays à la fois sous forme de « salars » ou d'eaux lithinifères et de silicates lithinifères. En 2010 l'USGS (US Geological Survey) estimait les ressources à plus de 4,5 millions de tonnes de lithium pour une consommation annuelle de 45 000 tonnes. Et bien des ressources découvertes depuis ne sont pas prises en compte. A noter que le lithium n'est pas recyclable pour toutes les applications hors batteries ce qui représente plus de la moitié de la consommation. Pour les batteries on ne sait pas, à ce jour, récupérer le lithium sous une forme réutilisable.

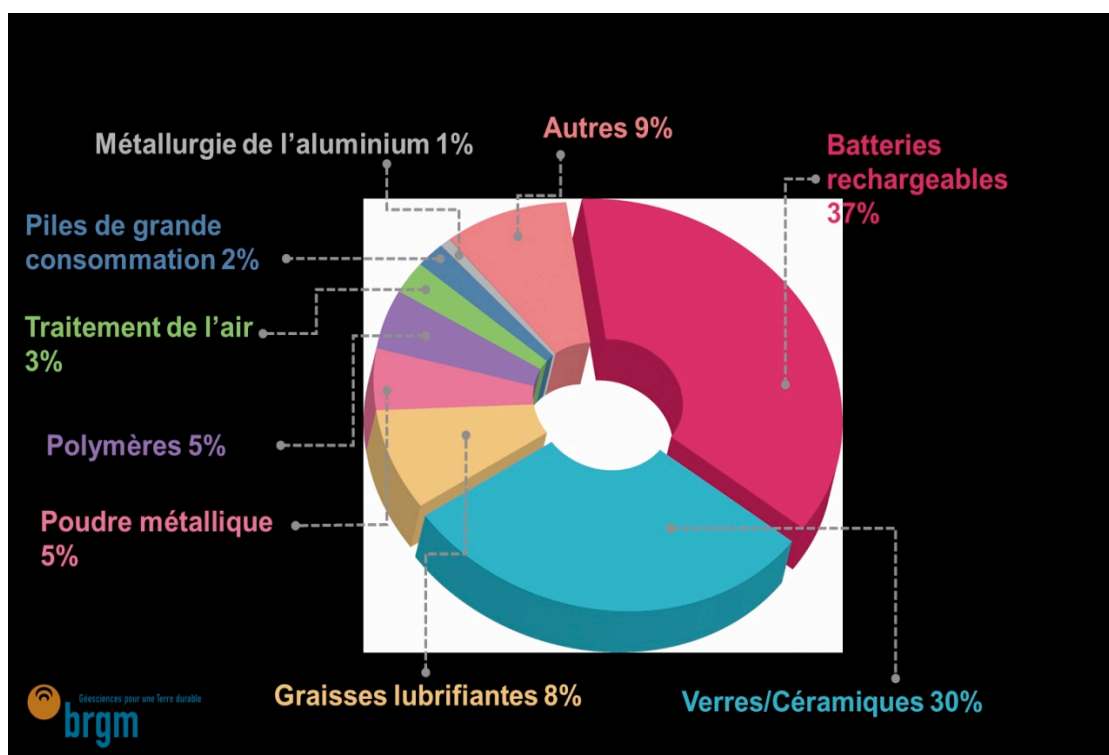


D'après ces études les ressources identifiées représentent 1000 ans de la consommation actuelle.



8-3 Quels sont les usages du lithium ?

Le lithium contenu dans les spodumènes ou certains autres minéraux lithinifères servent à baisser le point de fusion de certains minéraux. On va donc l'utiliser sous sa forme minérale dans l'industrie du verre et l'industrie de la céramique. Pour toutes les autres applications du lithium il faut isoler le lithium et produire un carbonate de lithium (ou un hydroxyde de lithium) qui va être utilisé, après transformation ou pas, dans de nombreux domaines dont les batteries Li-ion. Dans le « camembert » ci-dessous établi par le BRGM on voit que le domaine des batteries est le principal utilisateur. C'est le domaine qui croît plus vite que le PIB mondial.



8-4 Comment est récupéré le lithium à partir des gisements existants ?

8-4-1 Récupération à partir de « salars ».

Le « salar » d Uyuni en Bolivie





Un salar est un lac salé asséché en milieu désertique. La partie superficielle est une croûte de « sel » plus ou moins dure sur laquelle il est possible de marcher voire de rouler en automobile ou même camion. Cette croûte de sel comprend des chlorures divers dont du NaCl, du KCl, du CaCl₂ et parfois du MgCl₂ ou du LiCl. On pourrait exploiter cette croûte et en retirer les sels solubles mais pour cela...il faut de l'eau douce en quantité abondante. Or il n'y a pas de ressource en eau douce dans les déserts... Sous la croûte de sel il y a des saumures, mélange d'eau douce et de sels solubles. Ce sont ces saumures qui sont exploitées. La concentration en sel de ces saumures est faible et ne permet pas une séparation des cations, dont le lithium dans des conditions raisonnables techniquement et économiquement. On va donc concentrer ces saumures par évaporation naturelle jusqu'à ce que la concentration en sels dissous permette une séparation chimique classique.

Bassins d'évaporation salars de l'Atacama au Chili



L'exploitation des salars ne consomme pas d'eau douce qui pourrait servir à d'autres usages ! Lorsque la concentration est suffisante on va séparer les cations par précipitation sélective et par résines échangeuses d'ions pour fabriquer soit du carbonate de lithium soit de l'hydroxyde de lithium vendu sous forme de poudre.

Poudre de carbonate de lithium



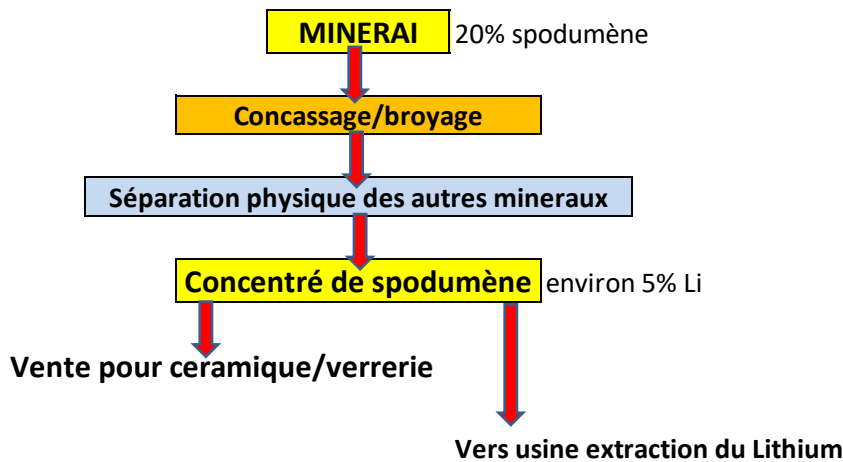


8-4-2 Le lithium à partir de silicates : spodumène ou autres.

La récupération du lithium à partir de spodumène est plus complexe et plus coûteuse que celle à partir des salars.

- La première étape.

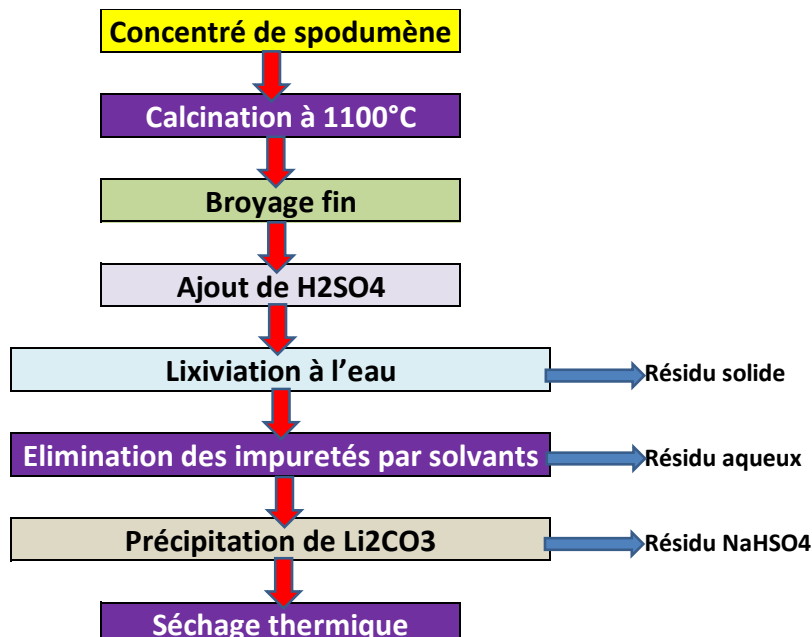
Cette étape consiste à obtenir un concentré de spodumène à partir du minerai extrait. La plus importante mine de spodumène dans le monde à Greenbush en Australie contient environ 20% de spodumène dans des pegmatites. Après concassage et broyage le minerai est soumis à des séparations physiques complexes combinant gravité, milieux denses, flottation et magnétisme afin de fournir les qualités requises par le marché verrerie et céramique.



Il faut traiter 5 tonnes de minerai pour obtenir une tonne de concentré et avec un ratio minier de 4, manipuler 20 tonnes sur mine, Greenbush produit 350 000 tonnes de concentré/an.

- La deuxième étape : pour fabriquer du lithium type chimie ou batteries.

Cette opération est plus complexe et réclame beaucoup d'énergie thermique. Elle génère des quantités significatives de déchets divers qui doivent être stockés.





Il faut 5 tonnes de spodumène pour faire une tonne de Li_2CO_3 . Soit 25 tonnes de minerai et 100 tonnes manipulées sur mine.

8-5 Production et consommation de lithium dans le monde.

Dans l'euphorie du développement des véhicules électriques la production de lithium a augmenté considérablement. Hélas la demande n'a pas été au rendez-vous le véhicule électrique se développant beaucoup plus lentement que prévus.... La production a alors été fortement excédentaire et elle l'est toujours.

Les principaux producteurs de lithium sont :

- L'Australie avec 45% du marché mondial et un seul fournisseur à partir de spodumène,
- Le Chili avec 34% et un seul fournisseur SQC à partir de salars,
- L'Argentine avec 14% à partir de salars,
- La Chine avec 7% à partir de salars.

8-6 Risques géopolitiques et autres.

Le lithium étant très répandu il n'y a pas de risques politiques majeurs. La France possède d'importantes ressources en lithium comme par exemple à l'Echassière dans l'Allier avec un gisement de lithium associé aux micas (lépidolites) qui fut étudié de très près par le BRGM et Imetal au début des années 80. Projet abandonné pour des raisons économiques. Par contre, contrairement aux métaux, il n'y a pas de cotation en Bourse du cours du lithium. Le prix se négocie de « gré à gré » entre producteurs et acheteurs. On connaît un prix moyen des échanges comme indiqué ci-dessous.

Prix de vente moyen du lithium toutes qualités



En fait en 2018 le prix de vente de l'hydroxyde de lithium a même atteint 25000 \$US/tonne et c'est la société Australienne Talison Greenbush qui a décidé en novembre 2018 de diviser son prix de vente par deux du lithium pour batteries (voir article dans l'Usine Nouvelle fin 2018). Cela n'a pas été fait pour augmenter les ventes mais d'abord pour tuer les concurrents les plus faibles économiquement et tuer dans l'œuf les innombrables projets qui fleurissaient de par le monde. Le résultat a été d'une grande efficacité : faillites et arrêts de projets se sont succédés !



9- Le graphite.

9-1 Origine et composition des minerais.

Avec le diamant, le graphite est une forme cristalline du carbone. Il ne se différencie du diamant que par sa structure cristalline. Il existe deux sortes de graphite :

- le graphite naturel,
- le graphite synthétique obtenu à partir de certains charbons ou de coke de pétrole.

Le graphite naturel est le résultat du métamorphisme : une élévation de la température et de la pression à des profondeurs moyennes (quelques kilomètres). Il peut être aussi d'origine hydrothermale.



Le Musée de Minéralogie de l'École des Mines de Paris possède assurément les plus beaux exemplaires de graphite naturel en provenance de Sibérie.

Le graphite synthétique est obtenu par « cuisson » de charbon à des températures comprises entre 2 500 et 3 000°C. En absence d'oxygène le charbon ne brûle pas sauf en périphérie des fours. La photo suivante montre l'image de l'un des fours exploités par Imerys dans son usine de Bodio en Suisse (région de Lugano). La consommation électrique est importante pour réaliser l'opération et la durée de la cuisson est de l'ordre de deux semaines.





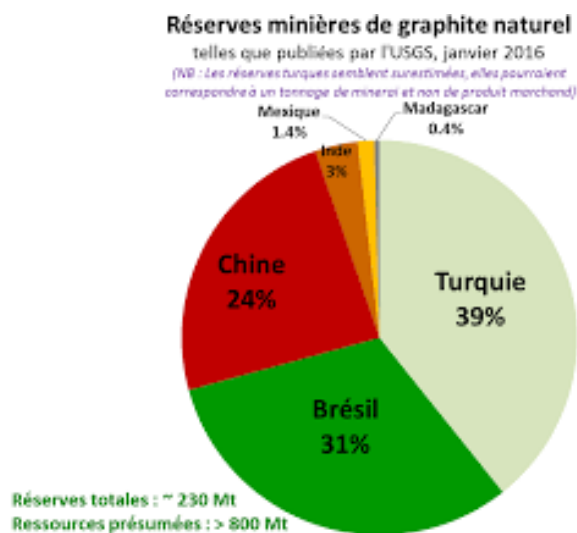
Le graphite naturel se trouve le plus souvent sous formes de paillettes de taille variable (de 50 µm à 1mm) dans un environnement de roches cristallines silicatées. On trouve souvent du graphite dans les marbres mais en quantité insuffisante pour avoir une quelconque valeur même s'il est éliminé par flottation pour le marbre destiné à l'industrie papetière. L'exploitation se fait le plus souvent à ciel ouvert dans des carrières. La teneur moyenne des gisements de graphite est de l'ordre de 4 à 7 % en poids.



Gisement de Lac des Iles (Québec), Imerys

9-2 Ressources mondiales en graphite naturel.

Nous ne parlerons ici que de graphite naturel. Les ressources pour le graphite synthétique étant celles du charbon.

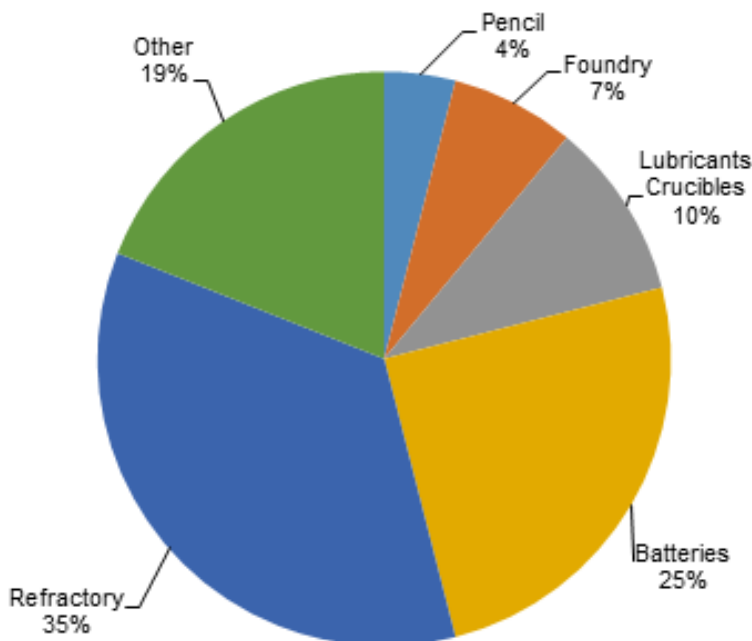


La consommation annuelle est de l'ordre de 0,8 millions de tonnes et les ressources estimées par l'USGS en 2016 sont de l'ordre de 1 milliard de tonnes soit un peu plus de mille ans. La Turquie et le Brésil détiennent à eux deux 70% des ressources mondiales la Chine venant loin derrière avec 24%. Depuis cette estimation en 2016 des ressources importantes ont été identifiées au Canada (Québec) et deux projets industriels sont en cours de réalisation : Mason Graphite (réserves supérieures à 1 million de tonnes) et Graphite du Nouveau Monde.



9-3 Quels sont les usages du graphite ?

Les usages sont nombreux mais le marché de la batterie est en forte croissance alors que les autres marchés suivent le PIB mondial.



9-4 Procédés de production.

Le procédé est relativement complexe car on ne veut pas détruire les « grosses paillettes » entre 500 µm et 1mm pour lesquelles la valeur est élevée, près du double des paillettes de taille inférieure. Après broyage ménagé sous eau à environ 1 mm le minerai est d’abord soumis à une concentration gravimétrique qui permet de « sortir » tout de suite les grosses paillettes libérées. Ensuite le minerai est rebroyé puis par flottation on récupère un concentré qui est ensuite séché et classé en différentes tranches granulométriques pour satisfaire les demandes du marché. Pour être commercialisable le produit fini doit avoir une teneur au moins égale à 98% de carbone. Les concentrés peuvent être retraités pour fournir les marchés à plus forte valeur ajoutée comme celui des batteries :

- graphite « sphéroïdal »,
- graphite « exfolié » et broyé finement,
- graphène.

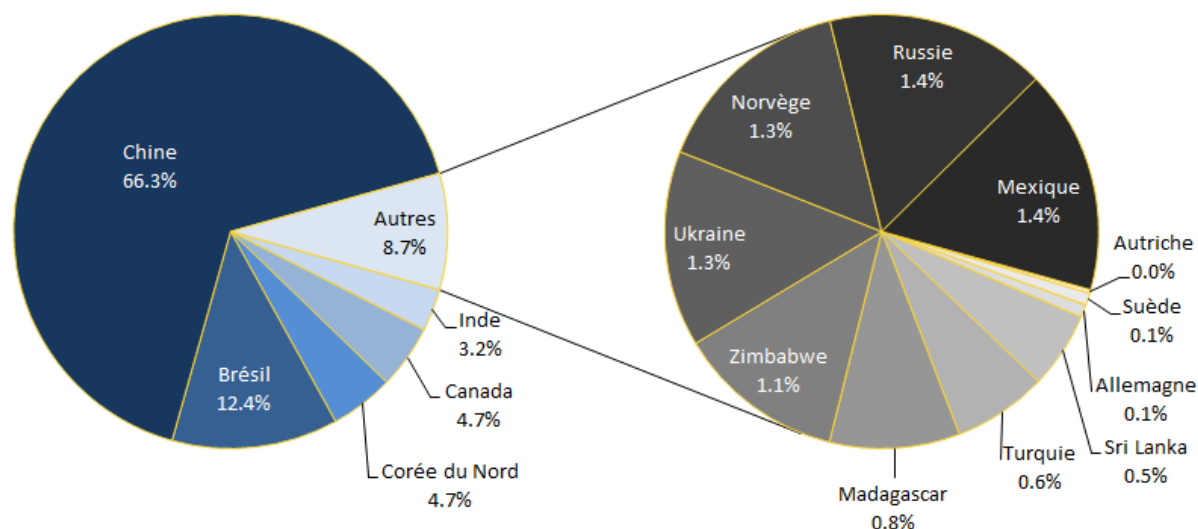
En raison de la teneur faible des gisements le bilan global des opérations nécessite de « remuer » beaucoup de tonnes par tonne de graphite obtenu. En moyenne il faut remuer 120 tonnes sur mine par tonne de graphite vendable.



9-5 La production mondiale de graphite naturel

Production mondiale de graphite naturel en 2014

Production mondiale 2014 : 0,6 Mt



Sources : Benchmark Mineral Intelligence, DNP, MIGEM, SGN, WMD, ZimStat

En 2014 la Chine était le premier producteur mondial de graphite avec plus de 67% du total. Depuis la situation n'a pas changé au contraire et la Chine contrôle désormais plus de 70% du marché mondial bien que n'ayant sur son territoire que le quart des ressources mondiales.

9-6 Aspects géopolitiques ou comment la Chine est devenue le premier pays producteur de graphite.

La méthode utilisée par le gouvernement Chinois a été d'une très grande simplicité et d'une encore plus grande efficacité. Entre 1995 et 2009 la Chine a libéralisé le secteur minier graphite et a favorisé l'exportation de concentrés de graphite. Les gisements ont été exploités avec frénésie en exploitant d'abord et sans souci d'environnement ou de sécurité du personnel la partie la plus riche des gisements. Le graphite n'a pas de cotation en Bourse et c'est le fournisseur qui fixe son prix à partir duquel il négocie avec l'acheteur. Les Chinois ont alors vendu leur graphite à un prix moitié rendu consommateur du prix moyen du graphite qui est passé de 1 500 \$US/tonne pour le plus cher à moins de 800 \$US/tonne. L'effet a été immédiat et a contraint de nombreux producteurs hors Chine à fermer leurs installations. De plus devant l'aspect peu rémunérateur de ce produit les dépenses d'exploration ont été stoppées immédiatement. Après 2010 le gouvernement Chinois a mis en place des taxes importantes à l'exportation de graphite, mais pas trop, pour favoriser ainsi le développement, à partir de concentrés, de produits à forte valeur ajoutée. C'est ainsi que la Chine est devenue non seulement le premier producteur minier mais aussi et surtout le premier producteur de produits en graphite élaboré nécessaire à la transition énergétique... En 2020 la situation n'a pas vraiment changé même si les pays consommateurs font de réels efforts mais ils ne porteront leurs fruits qu'à partir de 2025 au mieux.



10- Les Terres Rares

10-1 Origine et composition des minerais.

Tableau périodique des éléments chimiques

Le tableau périodique des éléments chimiques est présenté avec une légende colorée indiquant les groupes d'éléments : métaux alcalins, métaux alcalino-terreux, autres métaux, métaux de transition, lanthanides, actinides, métalloïdes, non-métaux, halogènes, gaz nobles, et éléments tétravalents. Les terres rares (lanthanides) et les actinides sont soulignés en vert dans le tableau.

Les terres rares sont les éléments de la famille des lanthanides et des actinides. Au niveau application on différencie terres rares « lourdes » et terres rares « légères ». L'origine est soit :

- Un volcanisme magmatique de carbonatites pour les terres rares légères comme à Bayan Obo en Chine,
- Des roches magmatiques profondes pour les terres rares lourdes,
- Des argiles (cas du sud de la Chine) où les terres rares sont le résultat de l'altération de roches magmatiques.

Les minéraux porteurs de terres rares sont soit :

- La monazite : orthophosphate de terres rares et de... thorium,
- La bastnaésite : fluorocarbonate,
- Des argiles (sud de la Chine).

Mais les minerais de terres rares sont une véritable « poubelle » contenant des éléments pas très agréables :

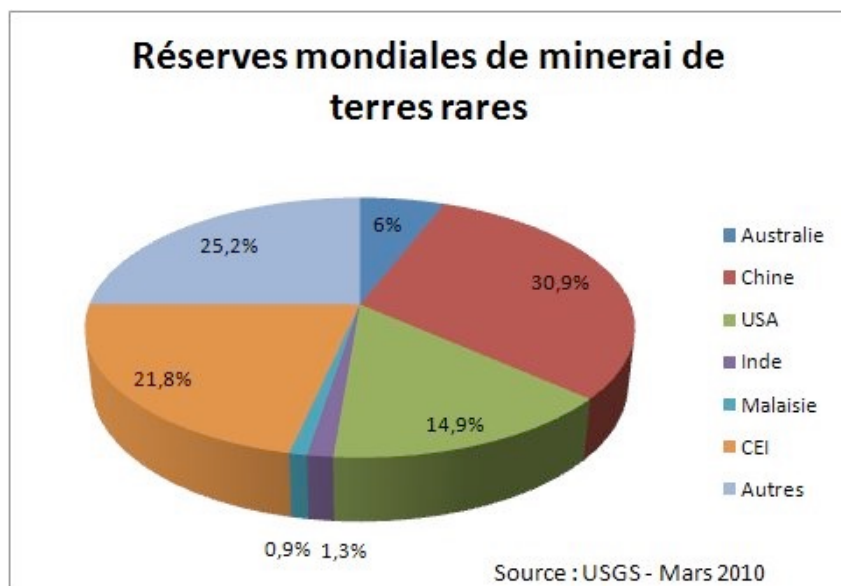
- Des éléments radioactifs tels que le thorium,
- Des métaux lourds dangereux s'ils ne sont pas contrôlés.

De plus les minerais de terres rares sont généralement très friables et dégagent au moment de leur exploitation et de leur concassage des quantités non négligeables de poussières qui sont le plus souvent fortement radioactives. La radioactivité dans les villes et villages autour des exploitations de terres rares en Chine est très souvent égale à 4 à 6 fois la radioactivité de la zone interdite de Tchernobyl (Cité par Guillaume Pitron dans son livre « la guerre des métaux rares »). Le taux de mortalité par cancer, tant des enfants que des adultes y est particulièrement important même si des statistiques précises ne sont pas connues ! Il est bien sûr possible d'exploiter des terres rares sans pollution mais dans ce cas investissements et coûts opératoires sont beaucoup plus élevés.



10-2 Ressources et réserves.

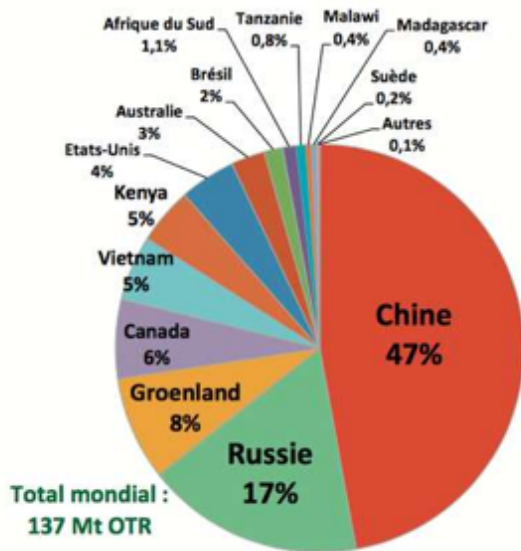
Les terres rares ne sont pas rares et on peut en trouver un peu partout dans le monde... Même en France où il existe un petit gisement de monazites dans des dépôts sableux en Bretagne. En 2010 l'USGS estimait la répartition des réserves comme suit :



On constate que la Chine avec 47% des ressources mondiales contrôle 88% de la production. Depuis la part de la Chine est passée à 97% pour la production. A noter que la Chine désormais produit aussi bien des concentrés de terres rares que chaque terre rare pure et aussi des alliages notamment pour les aimants permanents. En 2015 une étude Roskill estimait les ressources et la production comme suit :

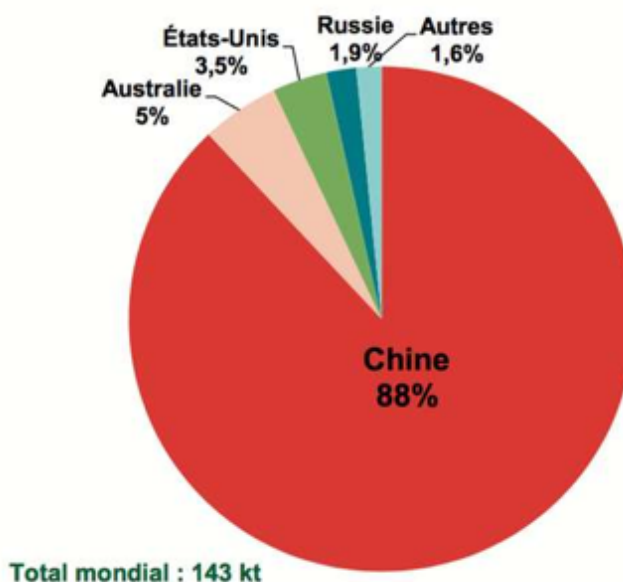
Répartition des ressources en terres rares - hypothèse basse 2015

(sources mixées SNL, TMR, Roskill, 2015)



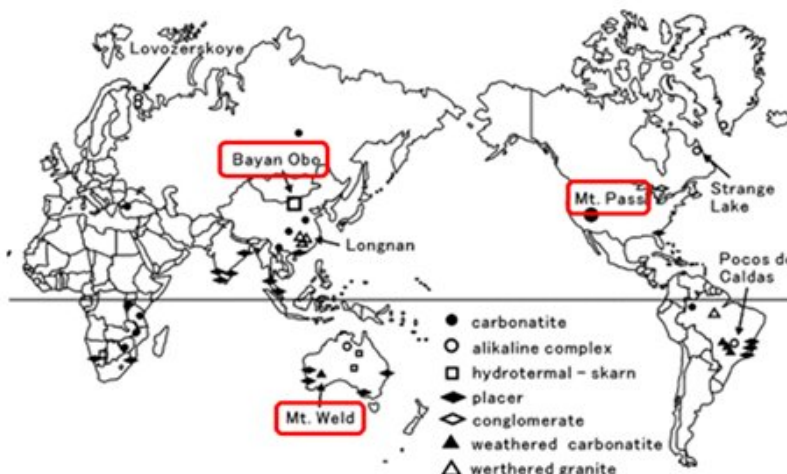
Répartition de la production minière de terres rares en 2014

(Source : Roskill, 2015)



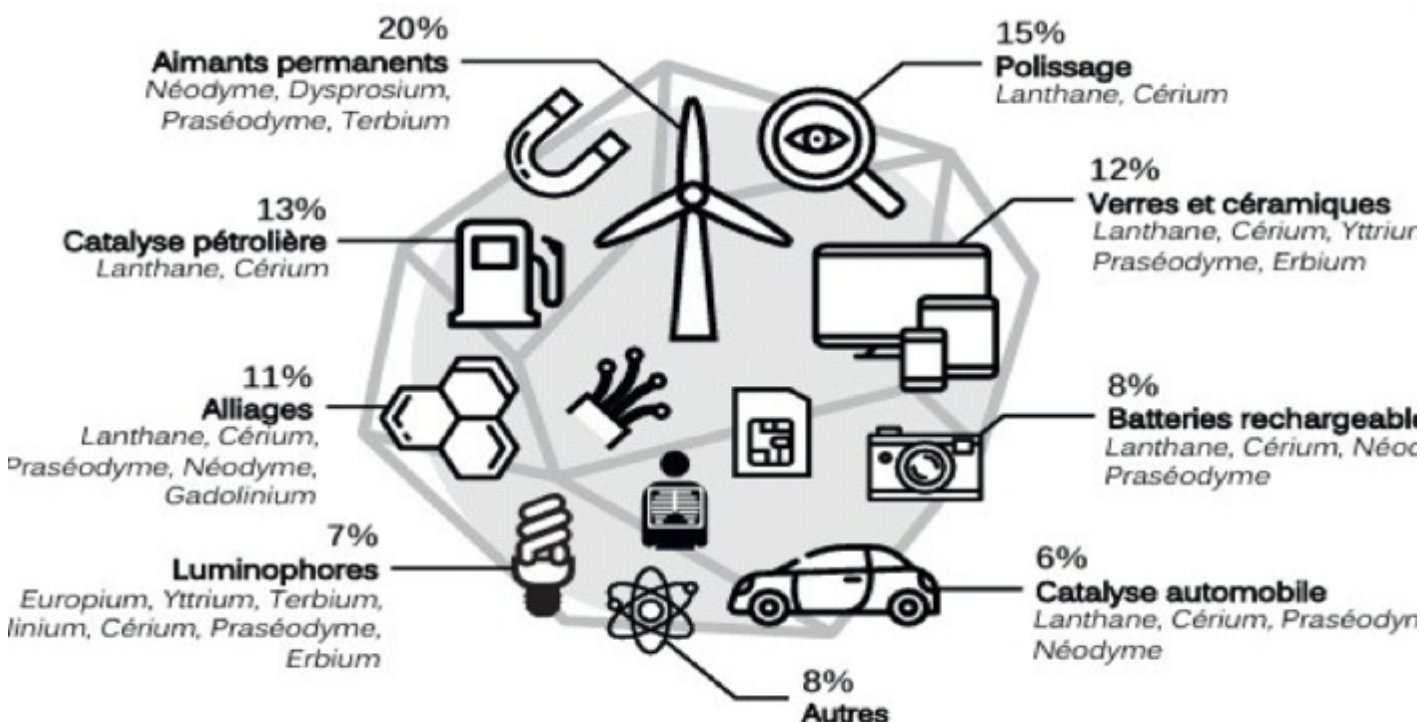


Les ressources connues représentent environ mille ans au rythme actuel de production. En 2020 seules la Chine et l’Australie exploitent des minerais de terres rares. Les opérations de Mount Pass aux USA ont été arrêtées à la fin des années 1990 sur décision administrative pour donner suite à des manifestations de groupes écologistes...



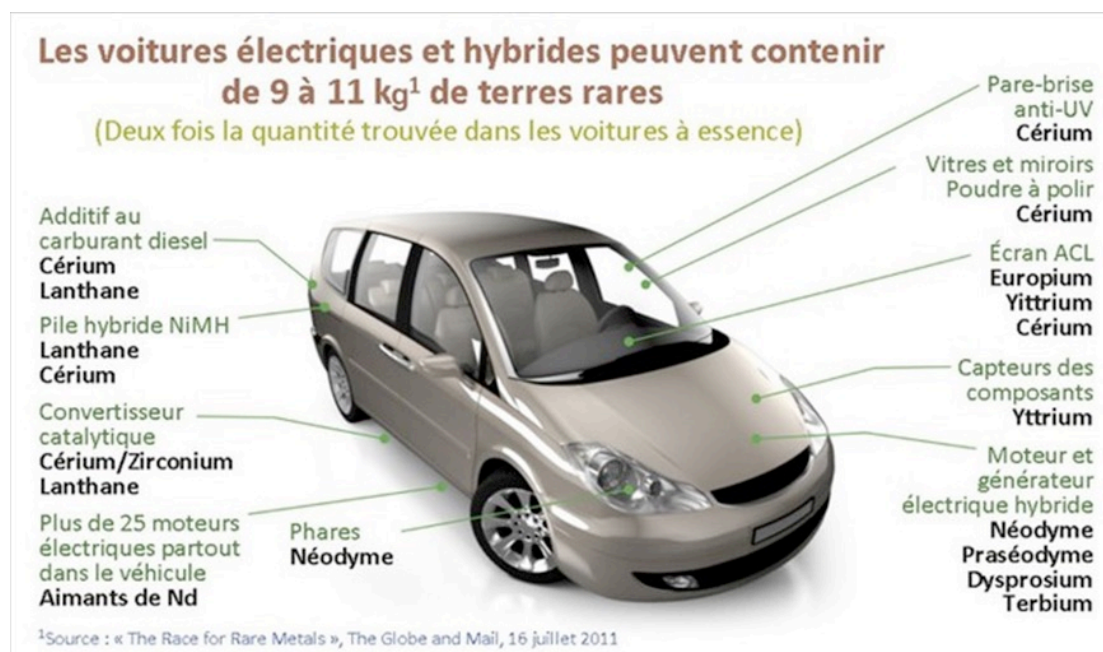
10-3 Les terres rares : applications.

Les applications sont multiples et de très nombreux domaines ont recours aux terres rares comme illustré dans le schéma ci-dessous publié par le BRGM. A noter que les aimants permanents représentent la plus grosse utilisation. Par exemple il y a une tonne d’alliages de terres rares sous forme d’aimant permanent dans chaque éolienne terrestre d’une puissance installée de 1,3 MW.





Les véhicules électriques ou hybrides sont également de grands consommateurs de terres rares :



10-4 Les procédés d'extraction et de traitement des terres rares.

L'extraction du minerai est faite en carrière dans la totalité des cas avec des engins traditionnels. Le traitement du minerai s'effectue alors en deux étapes :

- Première étape : production d'un concentré de terres rares. Cette étape est très classique et ne fait pas appel à des technologies spécifiques. Il convient cependant de noter que cette étape, si elle n'est pas contrôlée de manière rigoureuse peut être extrêmement polluante : pollution de l'air et de l'environnement par les déchets de la concentration. On ne connaît pas le bilan matière de cette étape pour les mines Chinoises. Le seul document accessible concerne la mine de Mount Weld en Australie. Pour obtenir une tonne de terres rares dans un concentré il faut manipuler environ 80 tonnes sur mine. La manipulation de ces 80 tonnes est effectuée essentiellement par des pelles et camions avec moteur thermique diesel...

- La deuxième étape consiste à attaquer les concentrés à la soude d'abord puis avec de l'acide chlorhydrique et de l'acide nitrique en parallèle. Ensuite les solutions obtenues sont traitées par des batteries de mélangeurs décanteurs utilisant des solvants organiques de manière à séparer chaque terre rare individuellement. C'est une étape très complexe qui génère des rejets solides et liquides qui peuvent contenir de nombreux éléments désagréables tels que le thorium, le plomb, le cadmium... Les pays pionniers dans l'extraction des terres rares ont été la France (usine de la Rochelle), les USA et le Japon.



Usine de La Rochelle (Solvay)

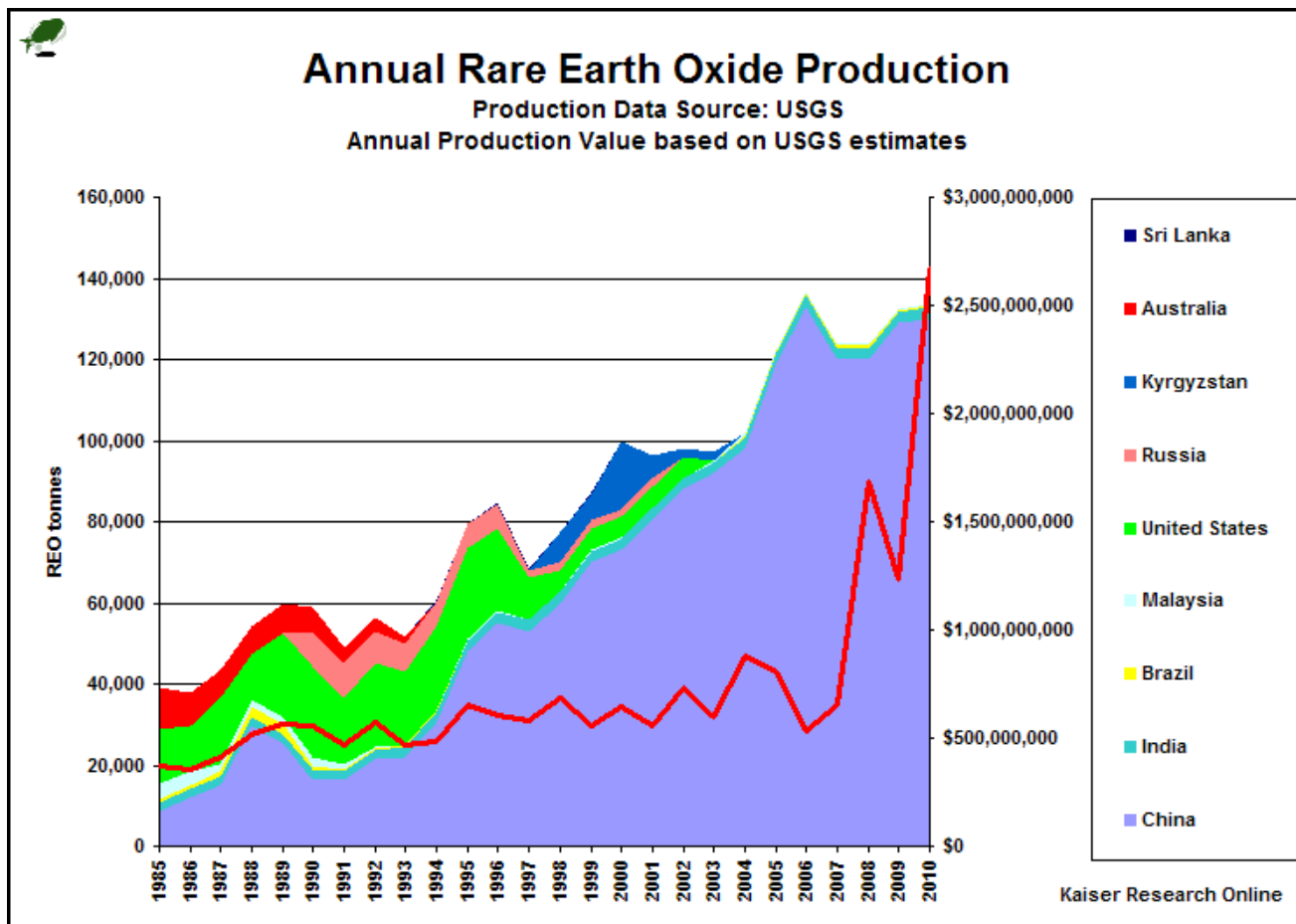
Lorsque les terres rares sont séparées elles sont retraitées pour satisfaire la demande du marché et certaines terres rares sont fondues ensemble pour former des alliages utilisés notamment dans les aimants permanents. On arrive à recycler certaines terres rares mais pas toutes. L'opération n'est pas économiquement rentable et Solvay a fermé ses ateliers de recyclage à la Rochelle et Saint-Fons dans le Rhône au début des années 2010. A ce jour on ne sait pas recycler les terres rares contenues dans les alliages...

10-5 Production mondiale de terres rares.

La production mondiale de terres rares sous forme d'oxydes est de l'ordre de 140 000 tonnes/an dont 97% en Chine et 3% en Malaisie à partir de concentrés venant d'Australie (données USGS de 2010). La tonne d'oxyde se négociant autour de 20 000 \$US. En 2020 il n'y a toujours que deux producteurs :

- La Chine avec 97% du marché,
- La Malaisie avec 3% du marché.

On peut noter que les pays pionniers (cités ci-dessus) ont pratiquement disparu du panorama.



Les gisements de terres rares en Chine sont essentiellement en Mongolie Intérieure au NW de Peking.



Le gisement de terres rares en Australie est situé dans le SW Australien et les concentrés envoyés en Malaisie dans une usine de production de terres rares.



10-6 Géopolitique ou comment la Chine est devenue le premier et quasiment unique producteur de terres rares.

L'histoire commence en 1992.... A cette époque la Chine produisait des concentrés de terres rares qui étaient vendus en totalité au Japon, aux USA et en Europe dont la France. Le président Chinois Deng Xioping a déclaré alors « there is oil in the Middle East, there are rare earth in China ». Les pays alors producteurs de produits finis



à base de terres rares (essentiellement USA, Europe de l'Ouest, Japon) n'ont pas relevé cette déclaration et ce pour différentes raisons :

- Ils ne pensaient pas au développement rapide du marché,
- Ils n'étaient pas « intégrés », c'est-à-dire qu'ils ne contrôlaient pas les mines de terres rares et trouvaient à acheter des concentrés dans différents pays dont la Chine à un prix qui leur convenait. Seuls les USA exploitaient leur mine de Mount Pass en Californie,
- Ils pensaient que la technologie de production était à ce point complexe et difficile que même à long terme les Chinois n'y parviendraient pas.

La méthode suivie par le gouvernement Chinois a été exactement la même que celle utilisée pour maîtriser le marché du graphite :

- 1- Exploitation « sauvage » des gisements de Mongolie intérieure sans préoccupation environnementale ou sécuritaire.
- 2- Mise sur le marché de concentrés de terres rares à des prix dumping mais rémunérateur pour les entreprises Chinoises. Les utilisateurs de concentrés de terres rares se sont réjouis avec une amélioration de leur marge financière. Les « petits producteurs » hors Chine ont fermé les uns après les autres.
- 3- Forte taxation à l'export des concentrés réservés à l'industrie chinoise.
- 4- Développement d'une industrie Chinoise de transformation et vente sur le marché international de produits « finis ». Ceci a entraîné la quasi-disparition des autres producteurs hors Chine. Même aux USA ou des mouvements écologistes ont fait fermer la mine de Mountain Pass...

C'est désormais la Chine qui mène « le bal » et Lynas petit producteur Australien a beaucoup de mal à avoir une rentabilité financière acceptable. Nul doute que la Chine utilise cette situation de monopole dans la « guerre » commerciale qui l'oppose aux USA qui sont totalement tributaire de la Chine pour leur approvisionnement en terres rares... nécessaires en particulier pour leur industrie de l'armement.

Peut-on s'affranchir de ce monopole Chinois ? De nombreux pays y pensent dont l'Europe qui a sur son territoire des gisements intéressants au Groenland mais :

- Il faudra du temps, au moins 10 ans,
- Il faudra monopoliser des budgets importants tant en investissement (plusieurs milliards d'Euro par projet) qu'en coût opératoire si l'on veut une production soucieuse de l'environnement et de la santé des populations,
- Il faudra une volonté politique inébranlable pour lutter contre les mouvements écologistes qui vont assurément se manifester comme ce fut le cas en Malaisie... il y a quelques années !

11- Le silicium.

11-1 Origine et composition des minerais.

Le silicium n'existe pas à l'état naturel. On va le trouver toujours associé à l'oxygène sous forme de silice : SiO_2 . Cette silice peut se trouver :

- Sous forme cristalline : le quartz,
- Sous une forme amorphe : la calcédoine.

La silice est un des éléments les plus abondants sur terre : les ressources sont infinies.



Cristal de quartz

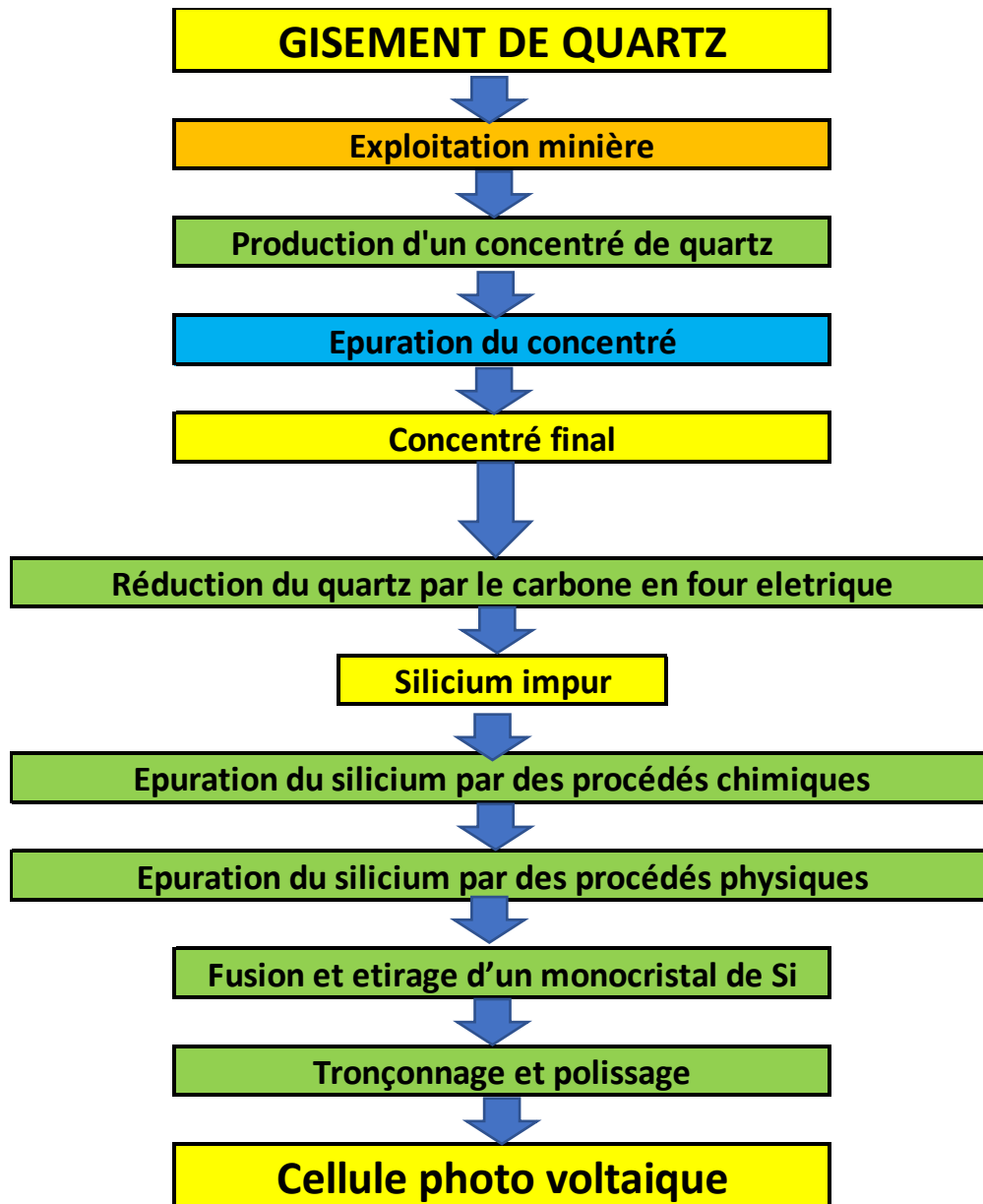


Calcédoine

Le quartz de rivière ou de dépôts marins ne sont pas dans presque tous les cas d'une qualité suffisante pour le marché des cellules photoélectriques ou de l'électronique. Il en est de même pour les sables siliceux de Fontainebleau (ou autre) qui sont surtout aptes à une utilisation en verrerie. Pour produire un quartz à usage électronique ou photovoltaïque on va plutôt exploiter des gisements de pegmatites, parfois de granites dans lesquels le quartz est suffisamment pur naturellement. On peut noter que la société chinoise la plus impliquée dans la fabrication de panneaux photovoltaïques a acquis il y a 10 ans environ le gisement de sable de quartz le plus pur du monde en Australie (à l'ouest de Townsville dans le NE de l'Australie) pour approvisionner ses usines chinoises. C'est la raison majeure de son hyper compétitivité au niveau mondial !

11-2 Les procédés de traitement permettant de produire un silicium de qualité électronique ou photovoltaïque.

Pour ces usages le silicium doit être ultra pur à 99,999% pour le photovoltaïque voire 99,9999% pour la qualité électronique. Le procédé et les technologies qui sont mises en œuvre pour « aller » du gisement à la cellule finale sont complexes et fortement consommateurs d'énergie... mais aussi d'émissions de gaz à effet de serre. Le graphe ci-dessous résume l'ensemble des opérations :



11-2-1 L'exploitation minière.

C'est une exploitation classique utilisant explosifs et engins de mine : pelles et camions. Quand on fait le bilan complet il faut manipuler environ 100 tonnes de produits sur mine pour obtenir 1 tonne de cellules en silicium.

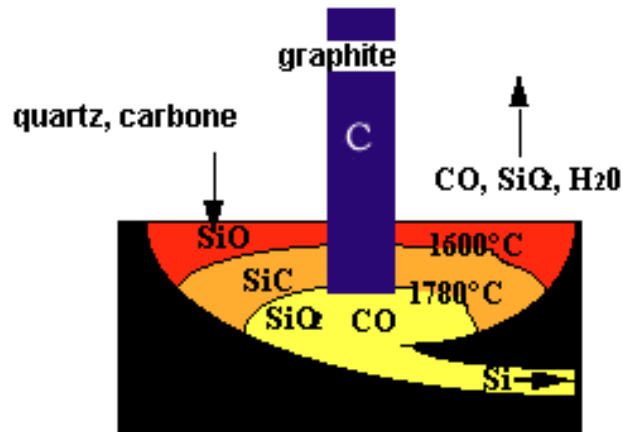
11-2-2 Production d'un concentré de quartz et épuration du concentré.

Le minerai est alors transporté vers une usine si possible proche du gisement par des camions. Dans cette usine il va être concassé puis broyé à environ 300 μm sous eau. Le produit broyé va être soumis à une succession d'étapes de flottation permettant d'éliminer les micas, les grenats et les feldspaths le plus souvent. Pour réaliser cette opération on va utiliser des réactifs chimiques pas toujours sympathiques qui vont se retrouver dans les effluents liquides de l'usine comme par exemple l'acide sulfurique ou pire l'acide fluorhydrique pour la séparation quartz feldspath. Le concentré final est alors séché avant d'être transporté dans une usine souvent lointaine pour y être



traité. Outre les effluents polluants la consommation d'énergie pour cette étape est de l'ordre de 1 000 kWh (ou 1 MWh) par tonne de cellule en silicium.

11-2-3 Réduction du quartz par le carbone en four électrique.



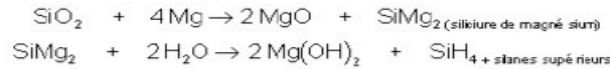
Le concentré de quartz purifié est alors réduit à très haute température dans un four électrique. Outre l'énergie électrique nécessaire il faut 3 tonnes de quartz et 3 tonnes de carbone (compte non comptabilisé de l'électrode en graphite qui s'use) pour obtenir une tonne de silicium fondu. La réaction de réduction s'effectuant autour de 1 800°C la quantité d'énergie électrique consommée est très importante. La totalité du carbone se transforme alors en CO₂ émis dans l'atmosphère.

11-2-4 Epuration physique et chimique du silicium.

Les opérations chimiques sont complexes et peuvent être génératrices de pollution si elles ne sont pas parfaitement contrôlées. Après épuration chimique on va alors extraire les dernières ppm d'impuretés par fusion de zone sur un « barreau » de silicium :

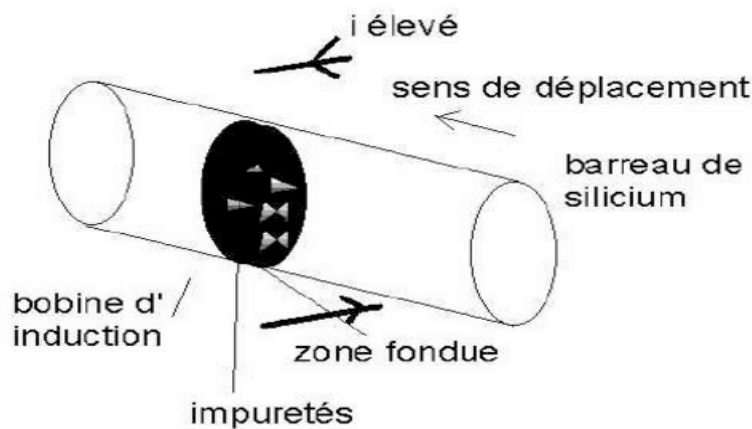


Le silicium est l'élément le plus abondant après l'oxygène dans la croûte terrestre (» 28%). On le trouve dans de très nombreux silicates.



On obtient le silicium commercial par réduction de la silice SiO_2 avec du carbone ou CaC_2 dans un four électrique. Le silicium est utilisé comme semi-conducteur. Mais pour cette application, il faut un métal d'une extrême pureté. Trois méthodes de purification sont utilisées :

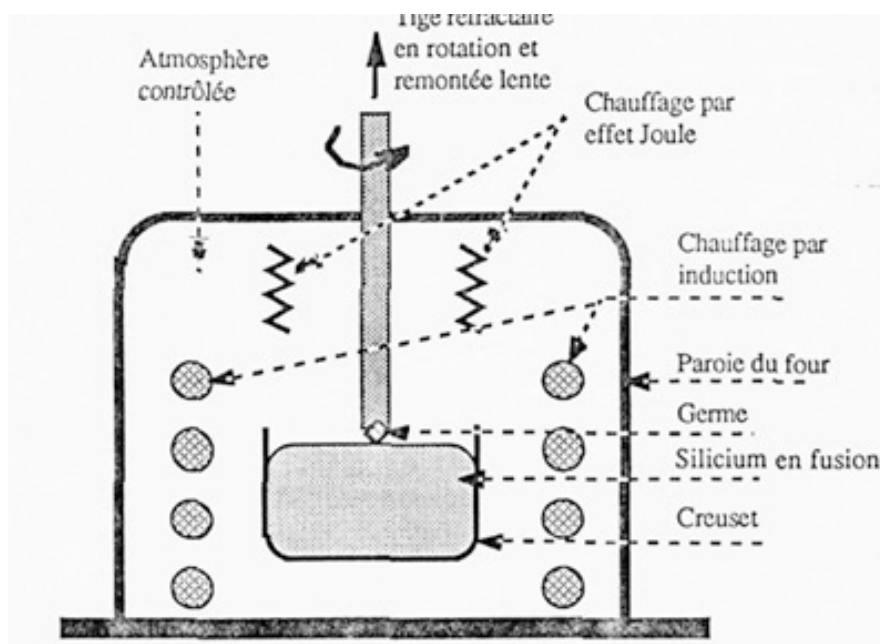
- le silicium est converti par réaction directe avec un halogène en SiX_4 , ou bien en SiHCl_3 . Puis SiX_4 ou SiHCl_3 sont réduits par H_2 sur un filament chaud quand X est Cl ou Br. Avec SiI_4 , la décomposition a lieu spontanément sur un filament chaud.
- la décomposition thermique du monosilane SiH_4 donne un silicium très pur.



- la méthode de la zone fondue : un barreau cylindrique de métal impur passe lentement au travers d'une spire d'induction traversée par un courant de haute fréquence : des courants de Foucault apparaissent dans le barreau à l'endroit de la bobine ; le métal y

fond et les impuretés stationnent à l'entrée de la bobine.

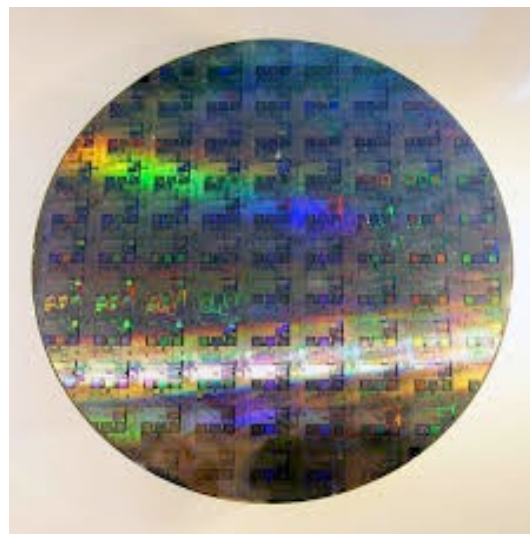
11-2-5 Fusion du silicium et étirage d'un monocristal.



Cette opération se fait à température élevée (plus de 1 500°C). Elle réclame également beaucoup d'énergie électrique car la cinétique de formation du cristal est lente.



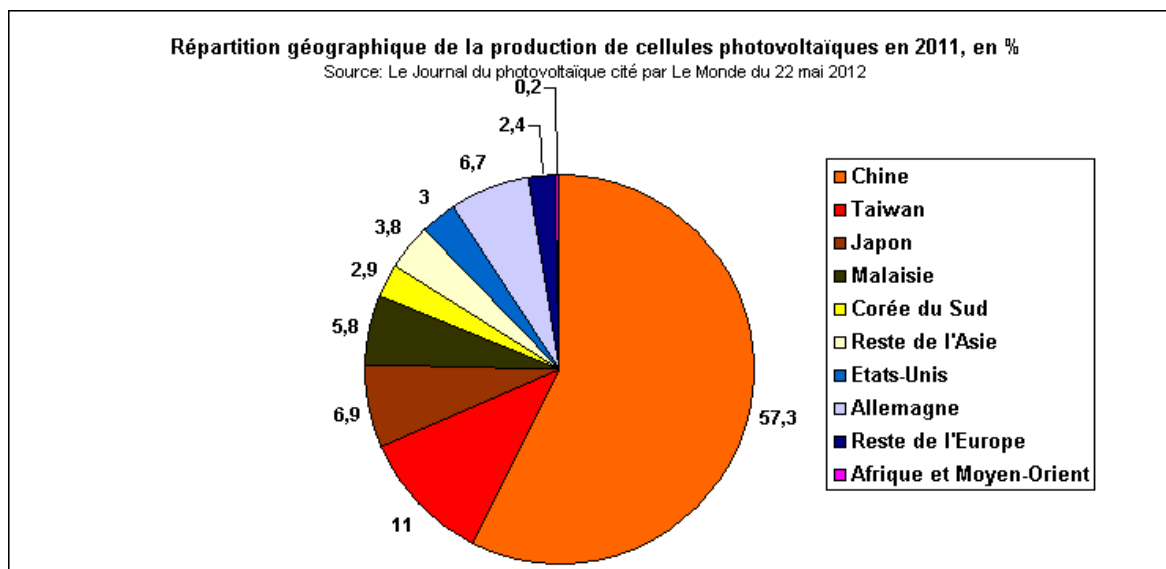
11-2 6 Tronçonnage et polissage du monocristal.



11-3 Le bilan énergétique global de la fabrication de cellules photovoltaïques.

D'après Ecoinfo, organisme dépendant du CNRS, il faut en moyenne en France 3,3 ans de production photovoltaïque pour compenser l'énergie dépensée pour aller du quartz pur à la cellule. Le Centre de Recherches pour l'Energie des Pays Bas a également beaucoup étudié cette filière et arrive à des conclusions similaires. Si l'on rajoute l'énergie dépensée pour aller du gisement au quartz pur, ce qui inclut bien évidemment le facteur minier, il convient de multiplier ces chiffres par au moins 3... Cela signifie qu'en moyenne, en France, l'énergie produite par une cellule photovoltaïque pendant 10 ans compense tout juste l'énergie qu'il a fallu dépenser pour la construire... Bien sûr il y a une différence selon les régions françaises notamment au sud de la Loire le temps de retour énergétique est plus court alors qu'il est plus long au Nord de la Loire ou en moyenne il faut compter 15 ans.... Ceci est à comparer à la période de garantie des panneaux photovoltaïques... A ce jour on ne sait pas récupérer de manière économique le silicium contenu dans les cellules photo voltaïques.

11-4 Répartition de la production mondiale de cellules photovoltaïques





En 2011 la Chine dominait déjà le marché mondial et cette domination n'a pas cessé de croître depuis. En 2018 on estimait que la Chine contrôlait plus de 70% du marché.

11-5 Aspects géopolitiques.

Le quartz étant extrêmement répandu sur terre il n'y a aucun risque de pression géopolitique au niveau des gisements. Cependant la Chine a su se construire une industrie totalement intégrée et sa puissance commerciale est considérable et il sera bien difficile de la concurrencer. Il faudrait pour cela développer une filière nouvelle intégrée de la mine à la cellule polie ce qui nécessite beaucoup d'investissements et un courage politique sans faille pour contrer les mouvements écologistes qui se manifesteront.

12- Conclusions.

La première conclusion qui s'impose est que, malgré la « transition énergétique » on continuera dans le futur à consommer du charbon (comme aujourd'hui), du pétrole (plus qu'aujourd'hui) et du gaz naturel (beaucoup plus qu'aujourd'hui). La « transition énergétique » ne paraît pas être ce cercle vertueux et magique qui va nous permettre d'économiser les ressources de la planète tout en réduisant massivement les émissions de gaz à effet de serre.

L'exemple de l'Allemagne, qui pour des raisons purement politiques, a pratiqué depuis près de dix ans cette « transition » en réduisant la part du nucléaire dans le mix énergétique pour la remplacer par de l'éolien et dans une moindre mesure le photovoltaïque est là pour nous le prouver. Les conclusions de la Cour des Comptes Allemande sont sans appel : aucune réduction des émissions de CO₂ n'a été observée, les sommes englouties ont été colossales (on parle de plusieurs centaines de milliards d'Euro), l'Allemagne est encore contrainte d'investir massivement dans la production d'électricité à partir de lignite et le consommateur Allemand paye son kWh plus cher qu'en France par exemple pour financer cette ruineuse tendance....

La seconde conclusion est que la « transition énergétique » ne supprime pas les risques géopolitiques liés aux combustibles fossiles mais en ajoute d'autres quand on voit que la Chine contrôle 97% des terres rares, 70% du graphite et du photovoltaïque... absolument nécessaires pour assurer cette transition.

La troisième conclusion est que la « transition énergétique » ne réduira pas, par rapport à aujourd'hui l'appel aux combustibles fossiles. Le charbon pour la production d'électricité va rester stable, par contre le charbon utilisé en métallurgie pour la production de métaux va croître plus que sensiblement au-delà de ce que ça devrait être sans cette « transition ». L'exploitation du pétrole va continuer à croître et dans le cas du gaz naturel cette exploitation sera significativement plus importante que ce qu'elle aurait été sans cette transition. Ceci est dû à l'aspect intermittent et imprévisible des énergies renouvelables telles que l'éolien et le photovoltaïque qu'il faut bien compenser en cas d'absence de vent ... entre autres par du gaz naturel. Et que ferons nous quand les ressources en gaz naturel seront épuisées ?

La quatrième conclusion est que la « transition énergétique » en augmentant les consommations de produits tels que le béton, les métaux de base et les métaux stratégiques va entraîner une augmentation de leur prix mais aussi et surtout la nécessité pour l'industrie minière mondiale d'exploiter des réserves de plus en plus pauvres et de trouver et d'exploiter de nouveaux gisements sans doute plus difficiles d'accès donc in fine d'augmenter



considérablement l'énergie nécessaire pour les exploiter. Géologues, mineurs et métallurgistes du monde entier ont devant eux un brillant avenir !

La conclusion suivante est que l'on voit difficilement à l'heure actuelle comment concilier une énergie décarbonée et l'immense demande en énergie qui nous attend autrement que par le nucléaire. Certains écologistes, non politiques, reconnus tant en France qu'aux Etats-Unis comme Michael Schellenberger n'hésitent pas à dire « be ecologist... promote nuclear energy ».

La dernière conclusion est plus philosophique. Depuis l'avènement d'*Homo sapiens* sur terre, ce dernier n'a eu de cesse que de trouver les sources d'énergies les plus puissantes et les plus concentrées possible. Ceci lui permettant de concentrer ses moyens et ses ressources tant humaines que financières à d'autres activités lui permettant d'assurer son avenir et son développement. La démonstration de Jean Marc Jankovici dans son cours à l'Ecole des Mines de Paris est brillante et éclatante. Vouloir à tout prix utiliser une énergie dispersée, de faible intensité semble être est une impasse même si les technologies actuelles permettent de l'envisager et les sommes colossales qui y sont consacrées pourraient sans doute être mieux utilisées ailleurs !

Pour terminer je dirais que si la dernière phalange de mon auriculaire gauche était en combustible nucléaire elle contiendrait autant d'énergie que celle contenue dans de l'essence permettant de faire rouler une voiture moyenne pendant 300 000 km !



Annexe

Rappel de quelques lois physiques et chimiques et de quelques faits démontrés

1- Rappel de quelques faits simples

Les sources d'énergie sont gratuites. On ne paye ni le soleil, ni le vent, ni la croûte terrestre ! Ce qui n'est pas gratuit, loin de là, c'est la dépense qu'il convient de mobiliser pour transformer ces sources d'énergie en une énergie utilisable. A ce propos on ne peut qu'inciter le lecteur à consulter l'excellent cours de Jean-Marc Jankovici à l'Ecole des Mines de Paris, cours dans lequel il exprime la dépense en équivalent « journée d'esclave humain » pour réaliser cette transformation ...Ce cours est facile à trouver sur Internet.

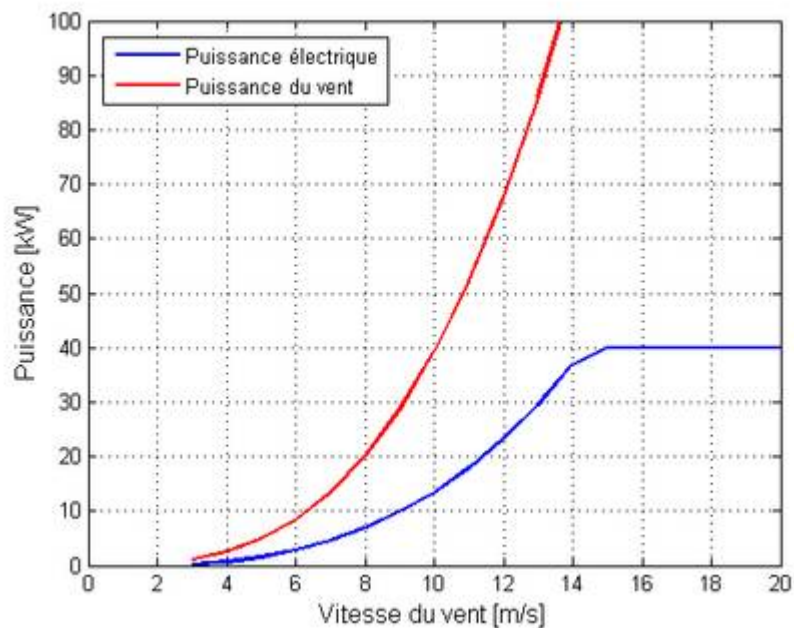
La consommation d'énergie, sous toutes ses formes, dans le monde croît grosso modo comme le produit intérieur brut mondial ou PIB. Cela signifie qu'avec un PIB mondial ayant une croissance annuelle moyenne de 3,5 % (données FMI et Banque Mondiale) dans 30 ans, en 2050, on va consommer tous les jours et sous toutes ses formes 2,8 fois plus d'énergie qu'aujourd'hui

La consommation de matières premières minérales comme par exemple les métaux mais aussi des produits comme le ciment suit à peu près les mêmes tendances, sauf rupture technologique majeure. Ainsi par exemple la consommation de cuivre qui était de 5 millions de tonnes il y a 50 ans est passée à 25 millions de tonnes en 2019.

Le recyclage, pour vertueux et nécessaire qu'il soit, ne permettra jamais de combler la demande (sauf effondrement majeur de notre civilisation) car on ne peut recycler que ce qui ne sert plus. Par exemple pour le cuivre, qui est l'un des métaux le mieux récupéré au monde, on va recycler le cuivre qui a été mis en place il y a 40 ou 50 ans ce qui fait que pour une consommation de 25 millions de tonnes de cuivre la part du recyclage ne compte que pour 4 millions de tonnes. Géologues, mineurs et métallurgistes ont un grand avenir devant eux.... (Voir les excellents articles du BRGM sur cet aspect « recyclage »).

Une voiture à moteur thermique contient environ 20 kg de cuivre, une voiture hybride contient 40 kg de cuivre et une voiture électrique en contient 80 kg.

Le parc éolien Français a un facteur de charge de 22% moyen sur une année c'est-à-dire que l'énergie réellement produite est égale à 22% de la puissance installée (données EDF/RTE). L'énergie électrique produite par une éolienne varie en fonction du cube de la vitesse du vent. Une éolienne produit son énergie maximale pour des vents de 54 km/h, au-delà la production d'énergie n'augmente plus par chute du rendement. Si la vitesse du vent est divisée par deux par rapport à 54 km/h alors la production d'électricité est divisée par 8 !



Si on voulait remplacer l'énergie électrique produite sur une année par la Centrale de Fessenheim récemment fermée il faudrait installer 2133 éoliennes terrestres de 3MW chacune soit un linéaire d'éoliennes de plus de 400 km.

A énergie produite équivalente une éolienne nécessite entre 20 et 50 fois plus de cuivre pour produire et distribuer l'électricité produite. Par kW installé (cité par Guillaume Pitron dans son livre « la guerre des métaux rares ») une éolienne nécessite 5 fois plus de béton, 90 fois plus d'aluminium et 50 fois plus d'acier et de cuivre que dans une centrale nucléaire et ceci sans tenir compte de l'aspect dispersé des éoliennes qui nécessitent des connexions sur de grandes distances avant d'atteindre le réseau existant. Plus une éolienne est importante et plus la consommation de cuivre augmente. C'est particulièrement le cas pour les éoliennes offshore dont la plus importante a une puissance installée de 12 MW. La hauteur des mats d'éoliennes est comprise entre 80 mètres pour les puissances installées de 1,3 MW à 200 mètres pour les éoliennes de 12 MW installés.

Le parc photovoltaïque Français a un facteur de charge de 10% moyen sur une année. C'est à dire que l'énergie réellement produite est égale à 10% de la puissance installée (données EDF/RTE). Les cellules photovoltaïques actuelles à base de silicium monocristallin récupèrent environ 17% de l'énergie reçue. Ce rendement chute significativement à partir de températures supérieures à 30°C et est divisé par 10 en cas de pluie ou de brouillard.... L'un des problèmes importants concerne les dépôts de produits divers sur les cellules comme par exemple les suies ou autres produits fins en suspension dans l'air, le sable, les déjections animales (oiseaux).... Certains parcs éoliens envisagent des systèmes de nettoyage automatiques à l'eau (quand il y en a) et le problèmes du traitement des produits polluants récupérés n'est pas une mince affaire....

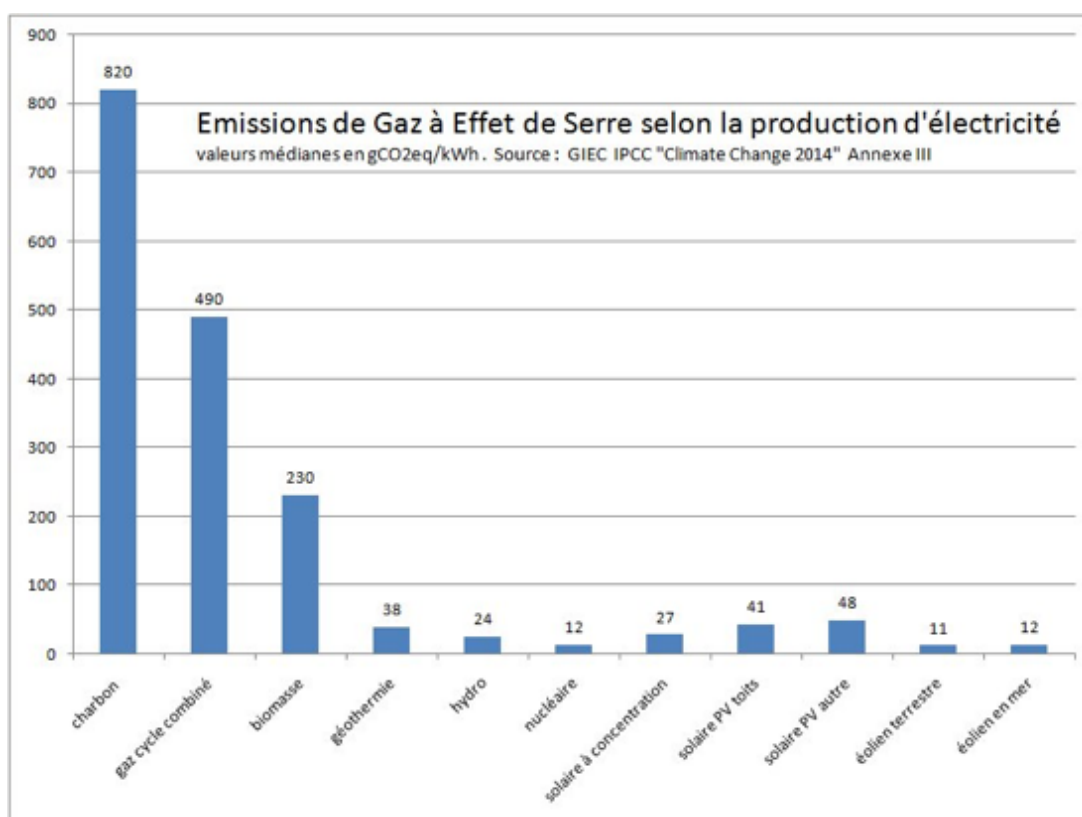


Cellules photovoltaïques et son « kit » de lavage

Si 2% du parc de véhicules thermiques Français passaient à l'électrique cela entrainerait la consommation de toute l'énergie produite par un réacteur nucléaire de 1300 MW installés (Jean-Marc Vittori dans les Echos)

La France est l'un des pays développés les moins émetteurs de CO₂ avec en moyenne 4,5 tonnes par habitant et par an contre 9 à 10 tonnes en Allemagne et plus de 15 tonnes aux USA. Ceci est dû à la politique énergétique de la France essentiellement centrée sur l'hydraulique et le nucléaire ! La France est un petit pays... et réduire nos émissions de CO₂ de 25% aurait un effet marginal au niveau mondial et son impact serait une baisse de l'ordre de 0,1% des émissions mondiales... Nous sommes là dans « l'épaisseur du trait de crayon » !

Pour la production d'électricité les émissions de CO₂ dépendent bien évidemment de la nature du « combustible » utilisé : charbon ou nucléaire par exemple. Le tableau ci-dessous est issu des travaux du GIEC en 2014 et montre bien les différences énormes entre les sources d'énergie. Toutefois ce tableau n'est pas suffisant car il ne prend pas en compte la totalité du cycle industriel permettant de construire et d'alimenter les centrales ainsi que l'injection de l'électricité produite dans le réseau existant.





On peut citer par ailleurs d'autres calculs plus récents donnant la production de CO₂ à la production incorporant une première approche CO₂ lors de la production et de l'acheminement du combustible (Source ADEME Ministère de l'environnement).



Par ailleurs pour le solaire et l'éolien et du fait de leur production intermittente et imprévisible il est nécessaire de compenser par des énergies pilotables telles que le nucléaire, le charbon ou le gaz naturel. Le nucléaire étant relativement difficile à moduler finement et de manière impromptue on fait alors appel pour assurer la production à des turbines à gaz voire des centrales à charbon ou à lignite comme en Allemagne. C'est ce qui se passe dans le cadre du projet d'éoliennes « off-shore » de la baie de Saint-Brieuc ou il est prévu de construire une centrale à gaz pour pallier les insuffisances de l'éolien. Dans le cas de l'éolien en prenant en compte un taux de charge moyen de 25% pour produire 1000 kWh de manière continue et maîtrisable, 250 kWh viendront de l'éolien et 750 kWh du gaz. On arrive à une production de CO₂ de 370g/kWh et de 430 dans le cas du solaire contre 6 en conditions équivalentes pour le nucléaire ou l'hydraulique.

2- Rappel de quelques lois physiques et chimiques simples

Les pales d'éoliennes ont une durée de vie de l'ordre de 20 ans dans des conditions normales d'utilisation. Ces pales sont essentiellement constituées de fibres de verre ou de fibres de carbone non récupérables. On doit donc les détruire et les enfouir pour préserver l'environnement. C'est déjà ce qui se passe aux USA avec la création de « cimetières à pales ».

En raison des forces de frottement et des forces gravitationnelles, plus un objet est lourd et plus l'énergie nécessaire à le déplacer est importante... En raison du poids des batteries, à modèle équivalent, une voiture électrique est plus lourde qu'une voiture à moteur thermique et consomme donc dans l'absolu plus d'énergie qu'un véhicule à moteur thermique.

Le ciment est produit par la calcination à 1 450°C d'un mélange essentiellement composé de calcaire et de produits argileux.



A cette température le calcaire de formule CaCO_3 se décompose en CaO qui va réagir avec les autres éléments et en CO_2 émis dans l'atmosphère. Produire une tonne de ciment génère de manière irréductible la production de 800 à 900 kg de CO_2 ...

Dans un haut fourneau le minerai de fer est essentiellement de l'hématite (de formule Fe_2O_3) auquel on ajoute un produit calcaire en quantité très limitée. La combustion du charbon dans le haut fourneau dégage du CO et du CO_2 (diagramme dit « diagramme de Chaudron ») et c'est le CO qui va réduire l'oxyde en produisant du métal et... du CO_2 ! On consomme en moyenne 600kg de charbon qui va se transformer en CO_2 par tonne de fonte produite. En 2017 on a produit dans le monde 1,4 milliards de tonnes d'acier à partir de minerais de fer ce qui a nécessité la production et la consommation de 840 millions de tonnes de charbon....