



Commissariat général au développement durable

Transition énergétique et ressources minérales **Les défis à relever**

Actes du séminaire du 9 avril 2018

DÉCEMBRE 2018

sommaire

Transition énergétique et ressources minérales

Les défis à relever

Actes du séminaire du 9 avril 2018

5 – Introduction

9 – Quelles initiatives et politiques françaises ? Quels secteurs concernés ?

Dans cette première partie de séminaire, les présentations ont porté sur les politiques et scénarios relatifs à la transition énergétique et aux ressources minérales :

- 10 - Trajectoires et scénarios de la transition énergétique en France (Christine Cros)
- 19 - Panorama des secteurs industriels concernés par la transition énergétique : enjeux économiques et technologiques associés aux ressources minérales (Jean-François Gaillaud)
- 25 - Politiques et initiatives françaises sur les ressources minérales (Rémi Galin)

31 – Quels besoins ? Quels enjeux ?

Dans cette seconde partie, les présentations ont porté sur l'état des connaissances et des besoins en ressources minérales de la transition énergétique française et les enjeux économiques et environnementaux associés :

- 32 - Modélisation dynamique de la demande et des capacités d'approvisionnement en matières premières pour la transition énergétique (Olivier Vidal)
- 45 - Panorama des enjeux associés à l'offre des matières premières (Alain Geldron)
- 53 - Nexus énergie – ressources minérales : implications pour la transition énergétique (Florian Fizaine)

Document édité par :

Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable

Remerciement : Nous remercions l'ensemble des intervenants au séminaire pour leurs présentations et leurs contributions à la rédaction de ces actes de séminaire : Christine **Cros** (DGEC), Pascal **Dupuis** (SEEIDD), Florian **Fizaine** (IGERE), Jean-François **Gaillaud** (DGE), Rémi **Galín** (DGALN), Alain **Geldron** (ADEME) et Olivier **Vidal** (CNRS). Nous remercions également Vincent **Marcus** (SEEIDD) et Doris **Nicklaus** (SEEIDD) pour l'aide à l'organisation et l'animation du séminaire.

contributeurs

HD

Hélène Desobeau*

**Organisation du séminaire et
compilation des actes**

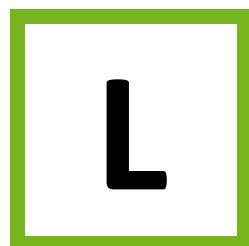
JB

Julia Belaunde*

**Aide à l'organisation du séminaire et à
la compilation des actes**

*En poste au CGDD lors du séminaires et de la
compilation des actes.*

avant-propos



La lutte contre le changement climatique n'est pas une option, c'est un impératif. La France s'y est engagée résolument, à travers une politique ambitieuse de transition énergétique. Sa mise en œuvre mobilise des ressources minérales dont certaines sont critiques.

Ce séminaire organisé par le CGDD sur le thème « Transition énergétique et ressources minérales : les défis à relever » a permis de partager les connaissances sur les enjeux 'ressources minérales' associés à la transition énergétique et d'identifier les défis à relever pour en minimiser les coûts environnementaux et économiques.

Les réflexions de ce séminaire nourriront les travaux du plan de programmation des ressources prévu dans le cadre de la Feuille de route sur l'économie circulaire.

Laurence Monnoyer-Smith

COMMISSAIRE GENERALE AU DEVELOPPEMENT DURABLE

Introduction



Introduction

La transition énergétique (déploiement des énergies renouvelables, de la mobilité électrique, de l'efficacité énergétique, etc.) se traduit par un besoin accru en diverses ressources minérales (ciment, cuivre, métaux rares, terres rares, etc.). Ce constat s'appuie sur les résultats de plusieurs rapports publiés récemment par diverses institutions internationales : le Groupe international des experts sur les ressources, la Banque Mondiale, la Commission Européenne.

Dans son plan Climat, la France se fixe comme objectif d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. L'atteinte de cette cible ambitieuse passe par le développement de politiques d'efficacité énergétique et de substitution massive des énergies fossiles par des énergies renouvelables. **Christine Cros (DGEC)** rappelle les objectifs de réduction de la consommation d'énergie et d'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique français et leur déclinaison dans deux secteurs fortement émetteurs d'émissions de gaz à effet de serre : les bâtiments et les transports terrestres. La mise en œuvre de ces objectifs va conduire à mobiliser davantage de ressources minérales.

La présentation de **Jean-François Gaillaud (DGE)** illustre, par des exemples concrets, les besoins en ressources minérales associées à la transition énergétique : terres rares par exemple, dans les aimants permanents des turbines des éoliennes ; indium et gallium pour certaines technologies photovoltaïques ; lithium et cobalt dans les batteries des véhicules électriques. Certaines de ces ressources, également mobilisées par d'autres secteurs de l'économie (dont certains en pleine expansion comme le numérique) sont considérées comme des matières premières critiques. Les mutations industrielles auxquelles conduit la transition énergétique peuvent être une opportunité de création d'emplois et de valeur ajoutée à condition de maîtriser les risques d'approvisionnement sur la chaîne de valeur. Une estimation de la demande en ressources minérales aux échelles française, européenne et mondiale est nécessaire pour permettre aux acteurs industriels concernés de se positionner et d'anticiper les enjeux de compétitivité, de rentabilité et d'emploi afin d'assurer leur approvisionnement en ressources sur le long terme.

C'est l'esprit des travaux européens et nationaux qui se sont engagés depuis une dizaine d'années, avec l'arrivée sur le devant de la scène politique du débat sur la sécurité d'approvisionnement, dans un contexte de prise de conscience croissante des limites de la planète d'une part, et d'augmentation des risques de pénuries d'autre part. **Rémi Galin (DGALN)** revient sur les trois axes stratégiques de la politique européenne sur les matières premières (garantie pour les industries de l'UE de l'accès aux matières premières aux mêmes conditions que leurs concurrents industriels, détermination d'un cadre européen pour un approvisionnement durable en matières premières auprès des sources européennes et besoin de dynamiser l'efficacité globale des ressources) et leur déclinaison française ; sur le rôle joué par le Comité

des métaux stratégiques (COMES) et la plateforme www.mineralinfo.fr comme outils de diffusion de l'information et de sensibilisation des parties prenantes aux enjeux des ressources minérales ; et sur la nécessité de disposer d'un cadre réglementaire exigeant pour maîtriser les impacts environnementaux et sociaux associés à la production des métaux.

Face à la pénurie possible et aux impacts environnementaux de l'extraction de matières premières primaires, **Alain Geldron (Ademe)** revient sur la nécessité de développer le recyclage. Néanmoins, compte tenu du taux de croissance de la demande en matières premières et du temps d'immobilisation des matières dans les produits en cours d'usage, un recours aux matières premières primaires restera indispensable. La quantité de ressources ultimes recouvrables (c'est-à-dire celles qui seraient atteignables en y mettant les moyens technologiques et financiers) semble importante au regard de la consommation actuelle. Néanmoins, l'accès à la ressource sera plus compliqué à l'avenir du fait des enjeux sociaux et environnementaux susceptibles de faire obstacle à l'exploration et à l'exploitation minière.

Dans sa présentation, **Olivier Vidal (CNRS)** rappelle que les besoins en ressources minérales associés à la transition énergétique dépendent de nombreux paramètres : scénarios évalués, importance du recyclage qui dépend lui-même du taux d'immobilisation des matières premières dans les infrastructures existantes, etc. À titre d'exemple, Olivier Vidal rappelle les résultats des modélisations de la demande en cuivre associée à la transition énergétique : entre 100 et 300 millions de tonnes de cuivre (selon le scénario et la trajectoire retenue) sont nécessaires pour atteindre les objectifs de production d'électricité en 2050. La valeur de 300 millions de tonnes représente l'équivalent de 18 années de la production mondiale actuelle et 40 % des réserves actuellement connues. La complémentarité du primaire et du secondaire apparaît donc comme nécessaire pour espérer répondre à la demande.

Une des autres variables à intégrer dans l'équation est celle du taux de rendement énergétique des énergies décarbonées. **Florian Fizaine (IREGE)** rappelle que le taux de rendement énergétique des énergies décarbonées décroît au fur et à mesure de l'épuisement des gisements en métaux : la sobriété constitue ainsi une approche indispensable à toute politique d'efficacité énergétique ou matérielle. Florian Fizaine souligne, en outre, que la transition énergétique conduit au niveau géopolitique à modifier les rapports établis en faveur des pays miniers aux dépens des pays producteurs de pétrole.

Lors des échanges, les questions et témoignages des participants ont mis en évidence les difficultés d'une meilleure connaissance des besoins en ressources minérales associés à la transition énergétique compte tenu des incertitudes liées notamment aux ruptures technologiques. D'importants travaux restent nécessaires pour mieux évaluer les effets des politiques d'économie circulaire et les synergies potentielles avec d'autres politiques publiques.

Programme

13h - Accueil

13h30 - 13h40 - **Ouverture** - *Pascal Dupuis, CGDD*

13h40 - 15h20 : **Présentations**

Partie 1 : Quelles initiatives et politiques françaises ? Quels secteurs concernés ?

- Les scénarios de la transition énergétique en France et scénarios associés (déploiement des énergies renouvelables, de la mobilité électrique, etc.)

Christine Cros, Conseillère auprès de la directrice de l'énergie, DGEC

- Panorama des différents secteurs industriels concernés par la transition énergétique et enjeux (économiques, technologiques) associés aux ressources minérales pour ces secteurs

Jean-François Gaillaud, DGE – Ministère Economie et Finances

- Politiques et initiatives françaises sur les ressources minérales

Rémi Galin, chef du bureau des politiques des ressources minérales, DGALN

Partie 2 : Quels besoins ? Quels enjeux ?

- Etat des connaissances sur les besoins en ressources minérales associés à la transition énergétique

Olivier Vidal, CNRS

- Panorama des enjeux associés à l'offre en matières premières

Alain Geldron, Ademe

- Focus sur les enjeux économiques et énergétiques associés aux métaux

Florian Fizaine, IREGE-USMB

15h30 - 17h30 : **Ateliers** à destination des services de l'État et assimilés

Les présentations des intervenants sont téléchargeables sur le site <https://www.ecologique-solaire.gouv.fr/collection-thema>

Partie 1

Quelles initiatives et politiques françaises ? Quels secteurs concernés ?

Dans cette première partie de séminaire, les présentations ont porté sur les politiques et scénarios relatifs à la transition énergétique et aux ressources minérales.



Trajectoires et scénarios de la transition énergétique en France

Christine Cros – Conseillère auprès de la directrice de l'énergie - Direction Générale de l'Énergie et du Climat – MTES

Le Plan Climat fixe des objectifs en termes de consommation d'énergie pour 2050

Les scénarios que la DGEC construit pour la Stratégie nationale bas carbone et la programmation pluriannuelle de l'énergie doivent permettre de respecter les objectifs de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte. Cela signifie qu'à l'horizon de 2030, il s'agit de diminuer de 20 % la consommation d'énergie finale, et de 30 % celle d'énergie fossile. La loi a donné des objectifs de long terme à 2050 de division par deux de la consommation finale d'énergie et par quatre des émissions de gaz à effet de serre. Présenté en juillet 2017, le Plan Climat a renforcé l'ambition climatique de la France en adoptant un objectif de neutralité carbone d'ici 2050.

D'ici 2030, cela signifie atteindre une consommation finale d'énergie de 120 millions de tonnes d'équivalent pétrole (Mtep). L'objectif est également de réduire la consommation d'énergie primaire provenant des énergies fossiles, ce qui signifie de porter cette consommation en dessous de 80 Mtep d'ici 2030.

Les évolutions entre 2000 et 2016 montrent que la consommation d'énergie primaire des énergies fossiles commence à se réduire, tandis que la consommation d'énergie finale reste relativement stable (cf. diaporama).

Les implications des objectifs de neutralité carbone pour les secteurs les plus consommateurs d'énergie (transport et bâtiment)

L'atteinte de la neutralité carbone implique la décarbonation de quasiment toutes les énergies. Cela représente une contrainte importante en termes d'efficacité énergétique et d'impacts induits sur les ressources.

La répartition de la consommation d'énergie finale par secteur en 2016 montre l'importance des secteurs du transport et du bâtiment (résidentiel et tertiaire) : ces secteurs représentent respectivement 29 % et 43 % de la consommation d'énergie finale (diapositive 4).

Sur le secteur du bâtiment (diapositive 5), l'objectif est de supprimer les passoires énergétiques à l'horizon 2025. L'atteinte de l'objectif d'émissions nulles pour 2050 se fera grâce à la mise en place de normes de construction plus ambitieuses, et de l'intégration d'un critère d'analyse cycle de vie dans la construction. L'objectif est de réduire la consommation énergétique par logement.

Partie 1 - Quelles initiatives et politiques françaises ? - Quels secteurs concernés ?

Un autre levier d'action essentiel réside dans l'accélération de la rénovation du parc existant (avec un rythme envisagé de 700 000 rénovations par an).

Pour le secteur des transports (terrestres) (diapositive 6), le Plan Climat prévoit des émissions nulles en 2050. L'atteinte de cet objectif passe notamment par la fin de la vente des véhicules émettant des gaz à effet de serre d'ici 2040 et par le développement de carburants alternatifs. Sur la mobilité électrique, il est prévu une hausse très forte de la vente de véhicules électriques : +3 millions de véhicules vendus en 2030, + 15 millions à l'horizon 2050.

L'atteinte des objectifs de réduction de la demande en énergie notamment fossile par ces deux secteurs a des impacts sur d'autres ressources (diapositive 7)

Pour le bâtiment, la rénovation énergétique et le développement de nouveaux modes de construction impliquent un recours plus important aux produits biosourcés. Cela signifie que la biomasse va être orientée en priorité vers un usage matériau et que l'énergie produite à partir de biomasse utilisera ces produits en fin de vie. La production d'énergie à partir de biomasse va être réalisée essentiellement à partir de déchets et résidus.

Pour les véhicules électriques, le déploiement du parc de véhicules électriques va réduire fortement la consommation de pétrole et augmenter les besoins en terres rares et métaux pour les batteries et l'électronique embarquée.

Afin de limiter les tensions sur ces ressources, il est nécessaire de s'appuyer sur le développement de l'économie circulaire pour favoriser le recyclage, le réemploi, etc.

L'atteinte des objectifs d'augmentation de la demande en énergie décarbonée nécessite d'accélérer le déploiement des énergies renouvelables avec une mobilisation accrue des ressources minérales.

L'analyse de la répartition de la consommation d'énergie primaire en 2016 montre les parts importantes du nucléaire (44 %) et du pétrole (25 %). Les énergies renouvelables (EnRt, déchets, hydrauliques, éolien, photovoltaïque et énergies marines) ne couvrent que 12 % de l'offre actuellement (diapositive 8).

Le développement des énergies renouvelables doit être regardé par filière : les taux de pénétration diffèrent en effet selon les filières. Ainsi, par rapport aux objectifs de 2020 (cf. diaporama), il faut accélérer le déploiement d'une offre à partir d'énergies renouvelables pour la consommation de chaleur, de gaz, d'électricité. Les filières carburant quant à elles sont susceptibles d'atteindre les objectifs de 2020 si les tendances observées ces dernières années se poursuivent (diapositive 9).

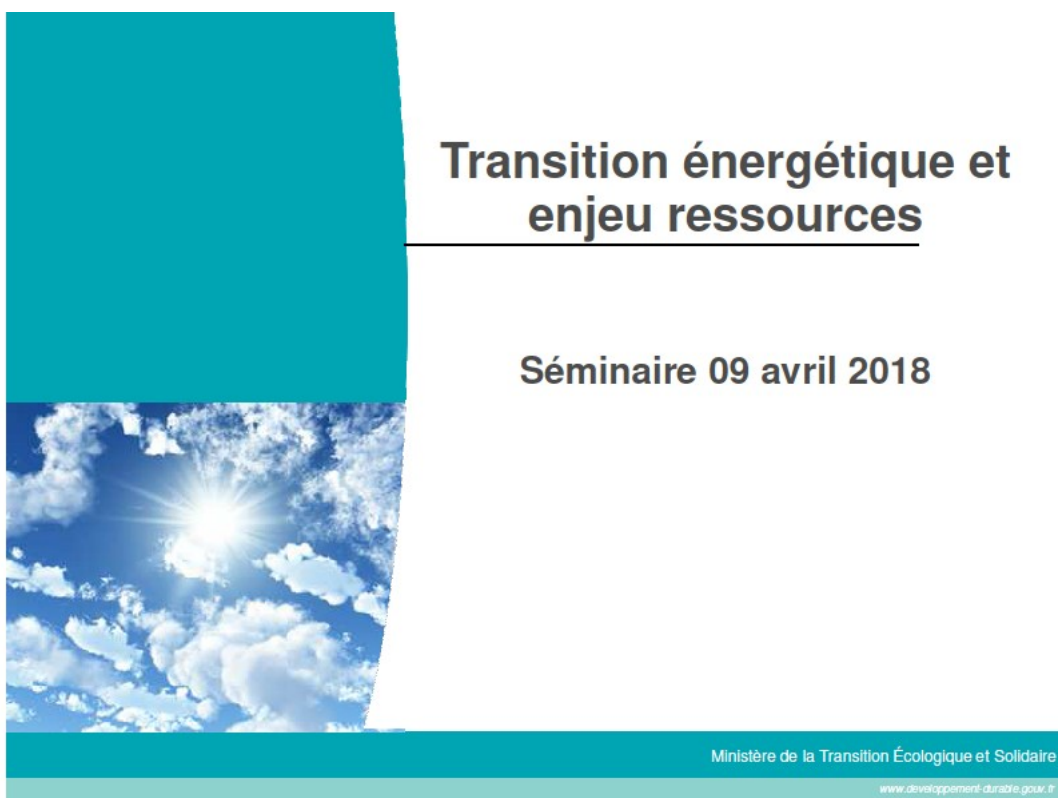
Si l'on regarde par filière les trajectoires historiques et les objectifs fixés par la programmation pluriannuelle de l'énergie pour 2023, il y a également des trajectoires différenciées selon les technologies : par exemple pour l'offre d'énergies renouvelables éolienne et solaire, le solaire

Partie 1 - Quelles initiatives et politiques françaises ? - Quels secteurs concernés ?

photovoltaïque est légèrement en retard (cf. diapositive 10) alors que l'éolien est sur la trajectoire qui lui a été fixée. Les pompes à chaleur se sont diffusées plus rapidement que ce que la première PPE avait prévu.

En termes d'enjeux ressources, la gestion des compteurs communicants en cours de déploiement, Linky pour l'électricité et Gazpar pour le gaz, va entraîner des besoins en électronique, et donc en ressources métalliques (diapositive 11).

Diaporama de Christine Cros

The image shows the cover of a presentation slide. On the left, there is a vertical graphic element consisting of a teal rectangle at the top, a photograph of a bright sun shining through white clouds in a blue sky in the middle, and a teal rectangle at the bottom. To the right of this graphic, the title "Transition énergétique et enjeu ressources" is written in a bold, dark grey font, with a horizontal line underneath. Below the title, the date "Séminaire 09 avril 2018" is written in a smaller, dark grey font. At the bottom right of the slide, the text "Ministère de la Transition Écologique et Solidaire" and the website "www.developpement-durable.gouv.fr" are visible in a small font.

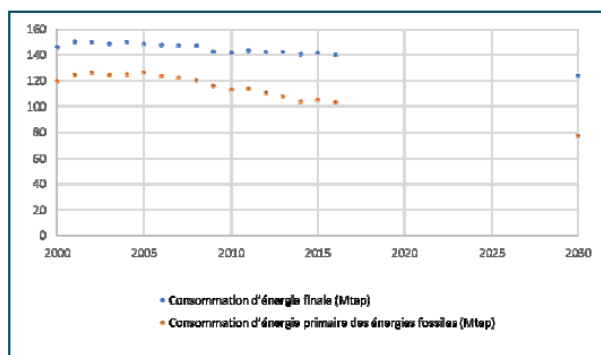
Transition énergétique et enjeu ressources

Séminaire 09 avril 2018

Ministère de la Transition Écologique et Solidaire
www.developpement-durable.gouv.fr

Partie 1 - Quelles initiatives et politiques françaises ? - Quels secteurs concernés ?

Évolution des consommations d'énergie de 2000 à 2016 et objectifs à 2020 et 2030 (en Mtep)



Source : SDES



2

Scénarios DGEC 2018

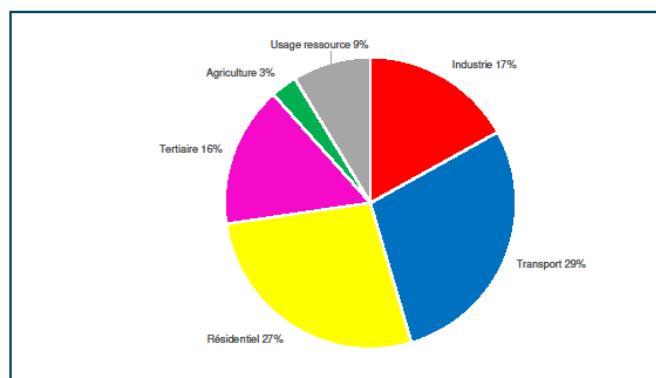
- Objectifs
 - 2030
 - -20% de consommations d'énergie
 - -30 % d'énergie fossile
 - 2050
 - -50% de consommation d'énergie finale
 - Neutralité carbone
- La neutralité carbone impose de décarboner quasiment toutes les énergies
- Forte contrainte induites sur l'efficacité énergétique, compte tenu des impacts induits (dont ceux sur les ressources) par la massification des énergies décarbonées



3

Partie 1 - Quelles initiatives et politiques françaises ? - Quels secteurs concernés ?

Répartition de la consommation d'énergie finale par secteur en 2016



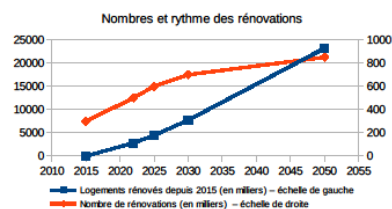
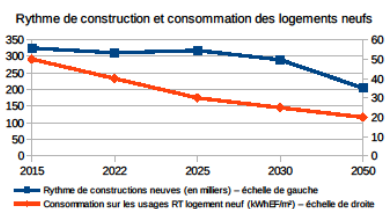
Source : SDES



4

Contenu du scénario AMS 2018 – Bâtiments (1)

- En 2025 : suppression des passoires énergétiques
- En 2050
 - * Emissions nulles : normes de construction plus ambitieuses / intégration d'un critère ACV
 - * Parc rénové en moyenne au niveau BBC : 700 000 rénovations performantes / an



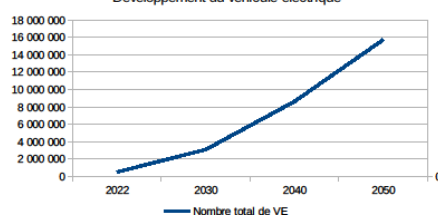
5

Contenu du scénario AMS 2018 - Transports

Hypothèses

- Émissions de GES :
 - Des émissions nulles pour les transports terrestres en 2050
 - Un volant d'émissions conservé pour les soutes aériennes et maritimes
- Objectifs particulièrement ambitieux pour la consommation d'énergie finale, également
- Plan climat : rendre la mobilité propre accessible à tous et développer l'innovation en fixant l'objectif de mettre fin à la vente des véhicules émettant des GES en 2040 et en travaillant sur les nouveaux usages

Développement du véhicule électrique



6

Synthèse des enjeux ressources - Demande

- Bâtiment
 - Recours démultiplié aux produits biosourcés (notamment pour l'isolation, panneaux agglomérés, la construction neuve)
 - L'usage énergétique de la biomasse se déplace vers les produits biosourcés en fin de vie et les résidus de process
- Véhicules électriques
 - Réduction importante de la consommation de pétrole
 - Besoin accru de terres rares et métaux pour les batteries et l'électronique embarquée

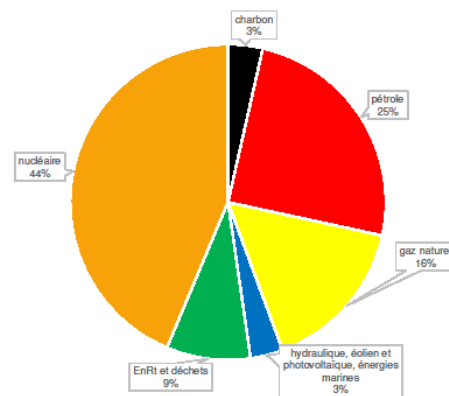
⇒ Enjeu majeur de développement de l'économie circulaire pour favoriser le recyclage, réemploi... et limiter la tension sur les ressources



7

Partie 1 - Quelles initiatives et politiques françaises ? - Quels secteurs concernés ?

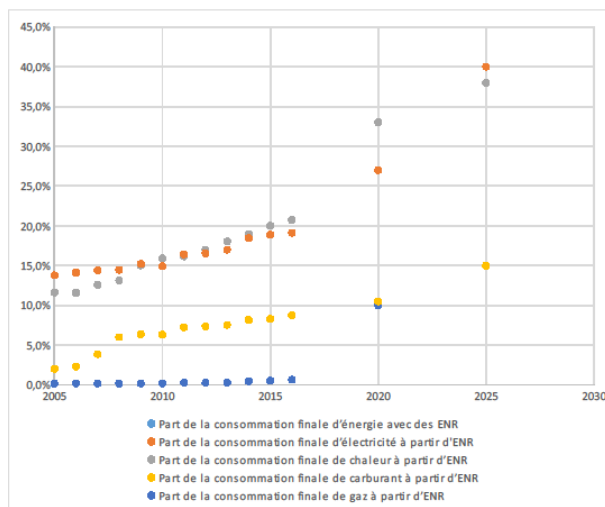
Répartition de la consommation d'énergie primaire en 2016 (%)



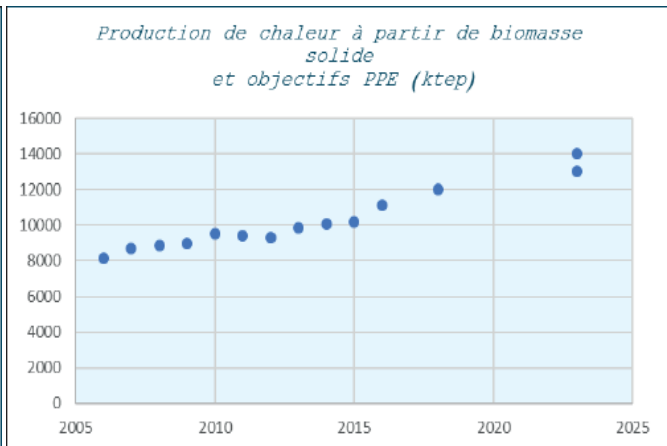
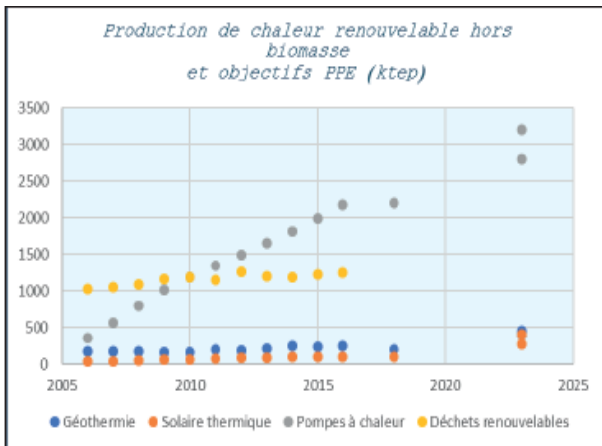
Source : SDES



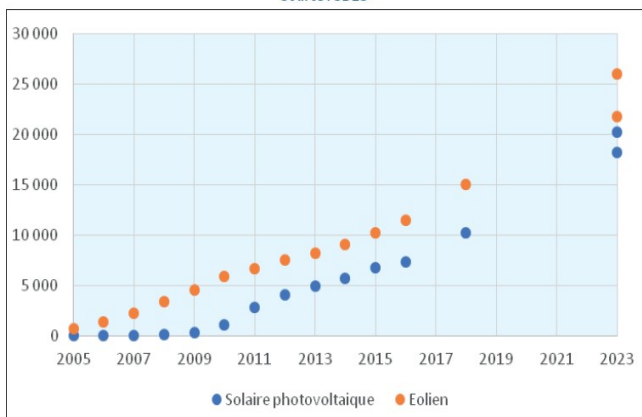
Accélérer le développement des énergies renouvelables



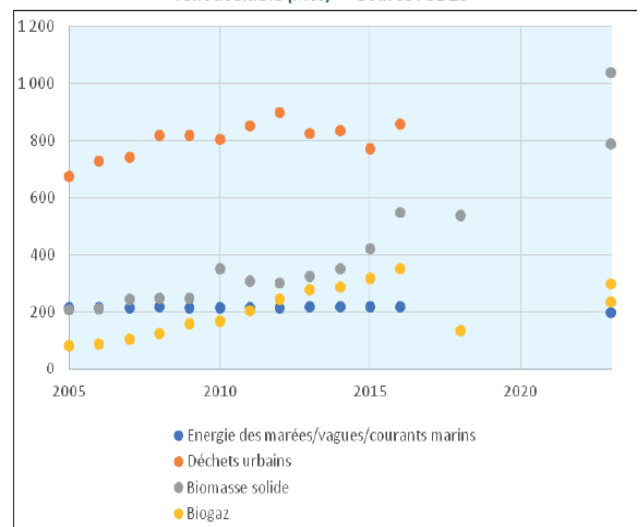
Partie 1 - Quelles initiatives et politiques françaises ? - Quels secteurs concernés ?



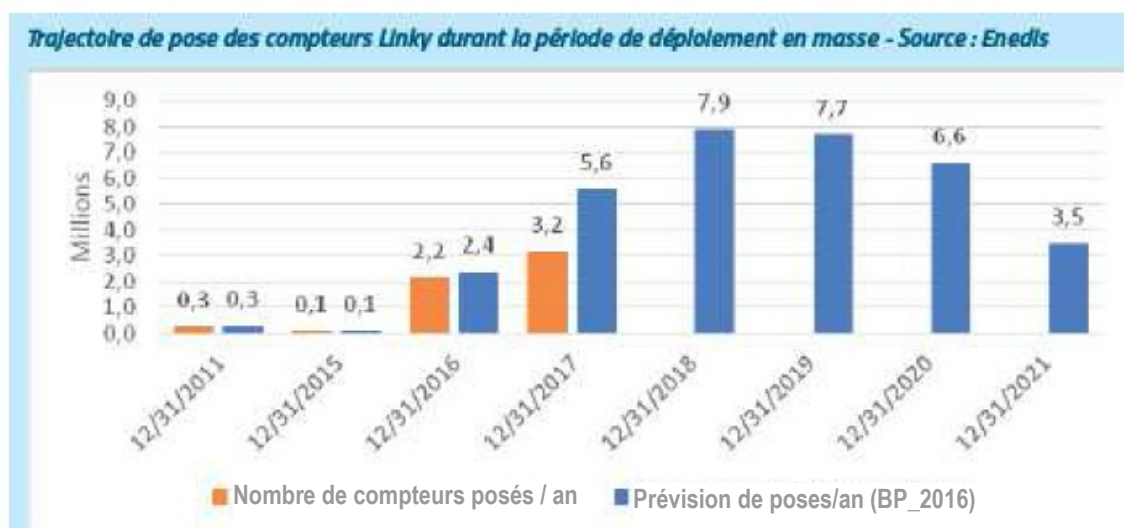
Historique et objectifs PPE des capacités de production éolienne et photovoltaïque (MW)
Source : SDES*



*Historique et objectifs PPE des capacités de production d'électricité renouvelable (MW) – Source : SDES**



Partie 1 - Quelles initiatives et politiques françaises ? - Quels secteurs concernés ?



Panorama des secteurs industriels concernés par la transition énergétique : enjeux économiques et technologiques associés aux ressources minérales

Jean-François Gaillaud – Adjoint au chef du bureau des écoindustries et du développement industriel durable - Direction Générale des Entreprises – Ministère de l'Économie et des Finances

La transition énergétique et la mobilisation de technologies « bas carbone » présentent des enjeux en termes d'approvisionnement des ressources minérales à long terme pour les acteurs français des secteurs associés aux ressources minérales. Un focus sur ces technologies « bas carbone » permettra d'identifier par technologie les matières stratégiques, et de mener des travaux pour estimer les besoins en termes d'approvisionnement en ressources pour les industriels nationaux. La revue des principaux secteurs industriels concernés par la transition énergétique permet d'identifier les enjeux économiques et technologiques propres à chaque secteur et leur exposition aux risques d'approvisionnement associés à ces métaux stratégiques.

Les besoins en matières métalliques : un enjeu pour plusieurs secteurs

La transition du secteur énergétique va mobiliser une quantité importante de matières pour le développement des technologies « bas carbone », qu'il s'agisse de terres rares ou de métaux de base.

Dans le domaine des énergies renouvelables, les ressources métalliques sont très présentes, et leur développement va entraîner une augmentation de la demande :

- La fabrication des aimants permanents pour les turbines des éoliennes va nécessiter de fortes quantités de terres rares (notamment néodyme, praséodyme et dysprosium),
- Le choix de la technologie photovoltaïque utilisée pour la production d'énergie solaire aura une influence déterminante sur les métaux nécessaires à la production d'énergie. Dans le cas d'une technologie à fines couches, sont mobilisés l'indium, le gallium, le sélénium, le cadmium et le tellurium. Par contre la technologie cristalline ne nécessite que du silicium monocristallin, polycristallin ou amorphe.

Partie 1 - Quelles initiatives et politiques françaises ? Quels secteurs concernés ?

Dans le domaine de la mobilité, au regard des investissements massifs des constructeurs automobiles dans le véhicule électrique, la demande en matières minérales du secteur du transport va également augmenter :

- Le nombre de batteries au lithium, au cobalt et au graphite devrait augmenter significativement dans les prochaines années (diapositive 5) ;
- Les technologies de moteurs mobilisent également des terres rares (telles que néodyme, praséodyme et dysprosium) ;
- Le développement des biocarburants devrait également mobiliser de larges quantités de ruthénium et de cobalt en tant que catalyseurs, ce qui contribue à la prise en compte des aspects stratégiques pour ces matières.

Dans le domaine du transport et du stockage de l'électricité, le renouvellement et l'amélioration du réseau de transport français exigera parallèlement des quantités importantes de cuivre et favorisera le développement de technologies de stockage lithium-ion, ce qui peut renforcer les risques d'approvisionnement sur ces substances.

Les secteurs industriels français exposés aux risques d'approvisionnement associés aux matières stratégiques

Ces matières sont donc mobilisées par plusieurs secteurs de l'économie, et certaines sont stratégiques pour certains secteurs. La notion de matières stratégiques renvoie à deux dimensions : les risques pesant sur les approvisionnements en chacune des substances et leur importance pour l'économie française.

Dans le cas des technologies bas carbone, les estimations à long terme de la demande en métaux stratégiques révèlent la vulnérabilité des principaux industriels français, notamment sur l'aspect risque d'approvisionnement. Ainsi, les constructeurs automobiles, les entreprises de transport et de distribution électrique, les usines de fabrication de turbines et de batteries de stockage vont subir les évolutions de marché dans le cas d'un avenir basé sur les technologies « bas carbone ».

En termes d'emploi, de compétitivité et de rentabilité, ces évolutions représentent d'importants enjeux. Actuellement en France, le secteur de la construction automobile représente 3,9 millions de véhicules produits (pour 230 000 salariés en France). En 2050, on estime à 16 millions la production de véhicules électriques : il y a donc des opportunités certaines de création d'emplois et développement de filières de production. Du point de vue du transport et de la distribution d'électricité, la rénovation des réseaux de distribution et la création de nouvelles lignes aériennes et souterraines devraient favoriser les contrats et les embauches pour l'industrie du câble, etc.

Partie 1 - Quelles initiatives et politiques françaises ? Quels secteurs concernés ?

Il est nécessaire d'appréhender la problématique d'approvisionnement en métaux stratégiques à l'échelle européenne. En effet, les métaux utilisés ne sont pas tous produits en France. Les entreprises françaises, telles que SAFT (pour la fabrication de batterie de stockage d'électricité), ou encore Général Electric (Montoir) et Naval Energies (Cherbourg), sont ainsi fortement exposées aux risques d'approvisionnement en métaux stratégiques.

Ainsi l'estimation de la demande en ressources minérales à l'échelle française et également aux échelles européenne et mondiale est nécessaire pour permettre aux acteurs industriels concernés de se positionner et d'anticiper les enjeux de compétitivité, de rentabilité et d'emploi afin d'assurer leur approvisionnement en ressources sur le long terme.

Diaporama de Jean-François Gaillaud

Transition énergétique et ressources minérales: les défis à relever

Panorama des différents secteurs industriels concernés par la transition énergétique ; Enjeux associés aux ressources minérales pour ces secteurs

Jean-François Gaillaud, DGE -
Ministère Economie et Finances

Technologies bas-carbone : Quels sont les matières stratégiques utilisées ?

Energie éolienne :

- Pales : fibre de carbone ;
- Turbines : métaux rares (néodyme (Nd), praséodyme (Pr), dysprosium (Dy) au sein des aimants permanents NdFeB.



Photovoltaïque :

- Technologie à silice cristalline : (silicium monocristallin, polycristallin ou amorphe) ;
- Technologie à couche mince, utilisant des complexes de matériaux en fines couches : Indium (In), gallium (Ga), selenium (Se) dans CIGS – Cadmium (Cd) et tellurium (Te) dans CdTe technologie.



Type of Solar PV	Crystalline Silicone (C-Si)	Cadmium Telluride (CdTe)	Copper Indium Gallium Selenide (CIGS)
Market Share	92%	5%	2%
Efficiency	25.6%	19.6%	22.8%
Lifespan (Approx.)	20 years	10 years	12 years
Key metals	Silica, Lead	Cadmium, Tellurium	Indium, Gallium, Selenium, Copper

Table 2: Properties of different types of Solar PV technology

Partie 1 - Quelles initiatives et politiques françaises ? Quels secteurs concernés ?

Véhicules électriques :

- Batteries : lithium (Li), Cobalt (Co) et graphite (matériaux clés pour les batteries Li-ion) ;
- Moteurs : métaux rares dont néodyme (Nd), praseodyme (Pr) et dysprosium (Dy) dans les aimants permanents NdFeB.



Réseaux de transport :

- Cuivre, Zinc ;
- Technologies de stockage Li-Ion.



Biocarburants :

- Rhuthénium, cobalt (en tant que catalyseur)

Secteurs industriels français exposés aux risques d'approvisionnement associés aux métaux stratégiques

Automobile :

- Constructeurs automobiles
 - 3,9 millions de véhicules produits ;
 - 230 000 salariés en France ;
 - CA : 101 milliards €

Transport et distribution d'électricité :

- RTE, distributeurs nationaux et régionaux d'énergie
 - 100 000 km de lignes aériennes et 5 000 km de lignes souterraines (HT et MT);
- LEGRAND, SCHNEIDER ELECTRICS
- Industrie du câble : 8000 personnes - 40 sites de production – CA : 2,3 milliards € dont + 40% à l'export (NEXANS, ACOME,)

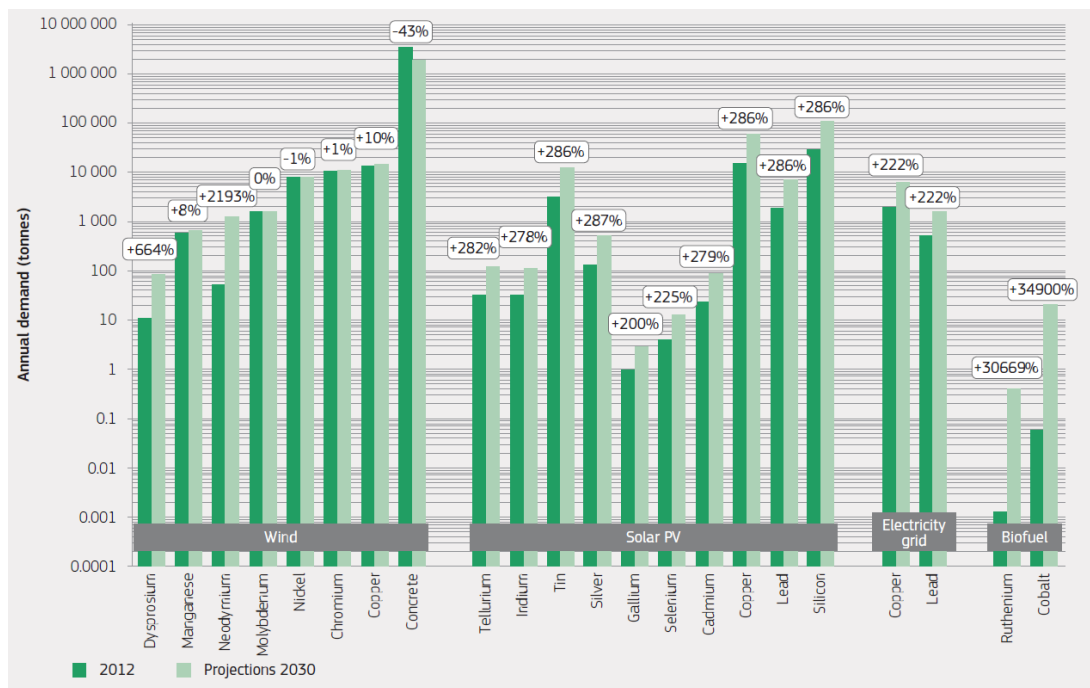
Fabrication de batteries de stockage :

- SAFT ;

Fabrication de turbines pour les éoliennes et hydroliennes :

- Usine GE de Montoir ;
- Naval Energies à Cherbourg ;

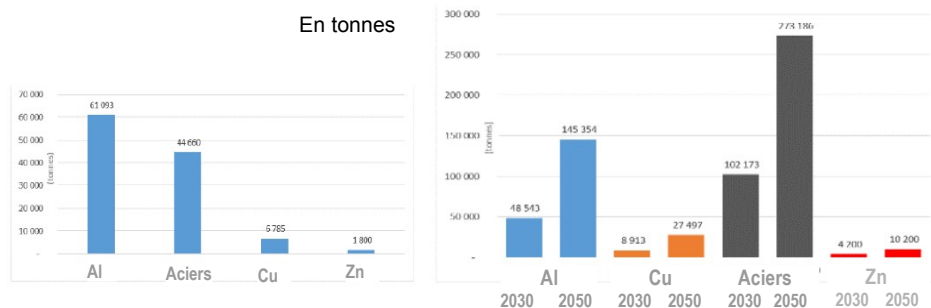
Partie 1 - Quelles initiatives et politiques françaises ? Quels secteurs concernés ?



Réseau électrique de transport
(données RTE)



Besoins à court terme (2017-2023) Besoins pour la Gestion des Actifs (2017-2030 et +)



3. Les politiques et initiatives françaises sur les ressources minérales

Rémi Galin – chef du bureau de la politique des ressources minérales - Direction de l'eau et de la biodiversité – MTES

Depuis les années 2000, la question des ressources minérales prend de plus en plus d'ampleur dans les débats. Le risque de pénuries, les limites de la planète en termes de ressources et les stratégies de certains pays inquiètent les acteurs publics et privés, notamment en termes de sécurité d'approvisionnement.

Au niveau européen, les enjeux associés à la gestion durable sont pris en compte notamment via l'initiative Matières Premières. Cette approche repose sur trois piliers :

- la garantie pour les industries de l'Union Européenne (UE) de l'accès aux matières premières sur les marchés internationaux aux mêmes conditions que leurs concurrents industriels ;
- la détermination d'un cadre au sein de l'UE pour favoriser un approvisionnement durable en matières premières auprès des sources européennes,
- et enfin, le besoin de dynamiser l'efficacité globale des ressources (recyclage, etc.).

Ces objectifs sont soutenus par des programmes européens, dont par exemple Horizon2020 qui regroupe les financements de l'UE en matière de recherche et d'innovation, mais également l'ensemble des acteurs de groupes de travail (« Raw supply group » et « ad-hoc working group on critical raw materials »), l'EIT Raw Materials¹, etc.

Informier et sensibiliser les parties prenantes : vers une compréhension partagée des enjeux

Au niveau français, les initiatives sur les ressources minérales visent à informer et sensibiliser les parties prenantes sur les enjeux des ressources minérales, dont notamment les entreprises, les acteurs politiques, ainsi que le grand public. L'objectif est de donner un accès commun à la même information à tous les acteurs, afin de favoriser une gestion plus efficace et durable des ressources.

¹ L'EIT RM est un organe européen indépendant qui renforce la capacité d'innovation de l'UE et la création d'emplois pour une croissance économique durable en permettant aux entrepreneurs et innovateurs de transformer leurs idées en produits et services pour le marché européen.

Partie 1 - Quelles initiatives et politiques françaises ? Quels secteurs concernés ?

À ce titre, la plateforme www.mineralinfo.fr est un vecteur de diffusion de connaissances et d'actualités relatives aux ressources minérales à destination de l'ensemble des acteurs.

Le Comité des Métaux Stratégiques (COMES) et le Bureau des Ressources Géologiques et Minières (BRGM) ont publié de nombreux travaux portant sur la criticité des métaux, et réalisent des veilles et analyses prospectives sur les métaux stratégiques. La diffusion de ces travaux (via MinerallInfo entre autres) permet de sensibiliser les différents acteurs, et notamment de fournir des informations aux entreprises pour les accompagner dans l'évaluation de la criticité des matières stratégiques pour les secteurs. Pour le grand public, la sensibilisation sur les enjeux relatifs à la consommation énergétique et aux enjeux associés pour les ressources minérales est primordiale pour œuvrer à une transition énergétique réussie.

Les politiques publiques jouent également un rôle de diffusion de l'information : à ce titre, le Plan national des ressources pour la France contribue à porter des messages auprès des décideurs publics sur les enjeux associés à une gestion durable des ressources. Il est important de promouvoir des politiques publiques cohérentes avec les objectifs de transition énergétique, qui anticipent les matières sollicitées, leurs spécificités (en termes d'offre et de demande) et leur approvisionnement.

Valoriser les ressources produites nationalement : une amélioration de la connaissance nécessaire

En France, la valorisation des ressources primaires et secondaires (issues du recyclage) concerne plusieurs acteurs : industriels, administrations publiques, centres de recherche, etc.

Les travaux de recherche et de développement dans ce domaine sont financés par le PIA (Programme d'Investissement d'Avenir) en France, et au niveau européen par des projets comme ERA MIN, qui vise la mise en commun des compétences et connaissances des pays partenaires sur la thématique des ressources.

En termes d'orientations de recherche, l'optimisation de la valorisation des ressources nécessite :

- l'identification des matières minérales critiques susceptibles de représenter un risque pour les entreprises,
- la réalisation d'un inventaire précis des gisements sur ces matières (et les autres),
- l'analyse de l'ensemble de la chaîne de production afin de repérer les éventuels obstacles à une valorisation des ressources du territoire,
- l'élaboration de pistes d'action adaptées aux verrous identifiés (cf. note du COMES).

Produire selon un cadre réglementaire exigeant : une nécessité pour maîtriser les impacts associés

Afin de garantir le succès des initiatives et des politiques visant une gestion durable des ressources, il est important que le cadre réglementaire et législatif puisse évoluer. Le développement d'une économie circulaire (et notamment d'une production soutenable) nécessite d'adapter les outils réglementaires existants, d'inciter les entreprises et fédérations professionnelles à souscrire à des engagements volontaires, et de les accompagner.

Les administrations publiques doivent garantir le respect de la loi, qu'il s'agisse de production nationale ou bien d'importations, afin d'utiliser efficacement les ressources et favoriser le recours à des matières produites selon les meilleurs standards environnementaux et sociaux.

L'actualisation du code de l'environnement (pour les carrières), du code minier, ainsi que la mise en œuvre des schémas régionaux de carrière (dans une logique d'économie circulaire) ou encore la mise en place de standards environnementaux, sont autant d'approches permettant de soutenir les politiques de gestion durable des ressources.

Diaporama de Rémi Galin



Politiques et initiatives européennes et françaises sur les ressources minérales

Rémi Galin
DGALN/DEB/EARM2
9 avril 2018

Photo: J. Degra/Em

Ministère de la Transition écologique et solidaire
www.ecologie-solidaire.gouv.fr

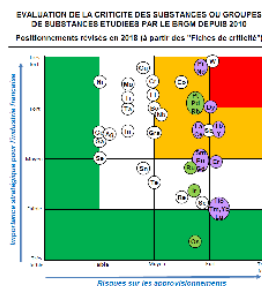
Europe Initiative Matière Première (PEI-MP)

- Trois piliers :
 - **Garantir aux industries de l'UE l'accès aux matières premières sur les marchés internationaux** aux mêmes conditions que les autres concurrents industriels
 - **Déterminer au sein de l'UE un cadre propre à favoriser un approvisionnement durable** en matières premières auprès des **sources européennes**,
 - **Dynamiser l'efficacité** globale des ressources et promouvoir le recyclage,
- Acteurs
 - Raw Material Suply Group (RMSG)
 - Ad-hoc Working group on critical raw materials
- Outils
 - KIC-RM et EIT RM
 - Programme H2020



Politiques et initiatives françaises sur les ressources minérales

- **Objectif** : Informer, sensibiliser, préparer aux enjeux des ressources minérales
 - Les entreprises => risque sur les approvisionnements
 - Politiques publiques => besoins et risques en matières sollicitées
 - Grand public => enjeu développement durable des ressources minérales (énergie, eau, logement, transport, agriculture...)



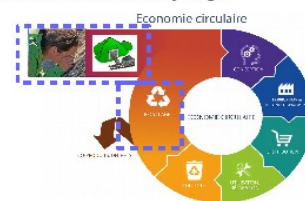
- **Acteurs**
 - Comité pour les métaux stratégiques (Comes) : Veille et analyse prospective sur les métaux stratégiques
 - BRGM : travaux sur la criticité des métaux pour l'économie française
- **Outils**
 - Plan ressources pour la France,
 - Mineralinfo : portail d'information



3

Politiques et initiatives françaises sur les ressources minérales

- **Objectif** : Valoriser les ressources du territoire, primaires et issues du recyclage
 - Inventaire des gisements et des verrous
 - Lever les verrous de toute nature



- **Acteurs**
 - Administrations, entreprises, BRGM
 - Agences de financement
 - Groupe miroir de la KIC RM sur la recherche et l'innovation

- **Outils**
 - Outils de financements : PIA, ERA-min...



4

Politiques et initiatives françaises sur les ressources minérales

- **Objectif** : produire selon un cadre exigeant et améliorer la gestion soutenable des ressources
 - La production du territoire répond à un cadre réglementaire exigeant
 - Code de l'environnement pour les carrières et le recyclage
 - Schémas régionaux des carrières => approche économie circulaire
 - Code minier et label mine responsable
 - Les importations
 - Mise en œuvre du règlement de minerai de conflit
 - Initiatives sur la certification environnementale
- **Acteurs**
 - Administrations
 - Fédérations professionnelles et entreprises
- **Outils**
 - Réglementations et engagements volontaires



Fin

Partie 2

Quels besoins ? Quels enjeux ?

Dans cette seconde partie, les présentations ont porté sur l'état des connaissances et des besoins en ressources minérales de la transition énergétique française et les enjeux économiques et environnementaux associés.



Modélisation dynamique de la demande et des capacités d'approvisionnement en matières premières pour la transition énergétique

Olivier Vidal – chercheur senior – CNRS Isterre

Quels liens entre enjeux énergétiques et ressources minérales ?

L'atteinte des objectifs de la COP21 et notamment de la neutralité carbone en 2050 va nécessiter la construction de nouvelles infrastructures de production, stockage, transport et utilisation d'énergie, afin d'augmenter la part d'énergies renouvelables dans le mix énergétique.

La construction de ces infrastructures va mobiliser diverses ressources minérales: métaux de base, terres rares, etc., dont la production va quant à elle nécessiter des quantités importantes d'énergie. Les enjeux énergie et ressources minérales sont donc intrinsèquement liés (cf. présentations précédentes).

Le développement des énergies renouvelables implique un changement d'approche sur l'approvisionnement en énergie : on passe d'un stock d'énergie combustible à un flux d'énergie renouvelable. Ce flux étant dilué, il faut construire de grandes infrastructures, qui ont des intensités matière élevées, supérieures à celles des énergies combustibles. En moyenne, l'énergie éolienne a une intensité en acier de 250 t/MW de capacité, alors que l'énergie nucléaire a une intensité de 60-120 tonnes d'acier par MW de capacité. Par ailleurs, il faut beaucoup plus d'infrastructures, 700 éoliennes (de 6 MW), pour produire la même quantité d'énergie (en Wh) qu'une centrale nucléaire de 1 300 MW. La transition énergétique va donc consommer beaucoup de matières.

Ces matières sont également concernées par les aspects de stock et de flux. En effet, afin de pouvoir estimer les quantités de matières mobilisées, il faut considérer trois paramètres :

- les flux de production primaire et secondaire de matières,
- les matières premières immobilisées/stockées dans les infrastructures existantes, et celles perdues (démantèlement, etc..),
- les quantités d'énergies nécessaires à la production de ces matières et les émissions de CO₂ associées.

Partie 2 - Quels besoins ? Quels enjeux ?

Par exemple, si l'on veut construire un parc d'éoliennes, on peut utiliser des matières premières contenues dans un stock immobilisé. Au bout de 30 ans (durée de vie), les produits en fin de vie peuvent être recyclés, et constituent donc un nouveau stock et un stock perdu (part non recyclable). Le recyclage peut se faire à l'infini s'il n'y a pas de perte de qualité du produit (diapositives 6 à 9).

Il faut étudier l'ensemble de ces flux et stocks au cours du temps, et comprendre les parts respectives des matières premières primaires et secondaires dans les différentes infrastructures. Il faut également intégrer le fait que les durées de vie sont différentes (entre éolienne et centrale nucléaire par exemple). À partir de tous ces éléments, il est possible de construire un modèle sur lequel ensuite appliquer différents scénarios énergétiques.

Quelle demande en ressources minérales associée à la transition énergétique ?

L'estimation de la demande en ressources minérales induite par la transition énergétique va dépendre des scénarios énergétiques retenus. Ces derniers se distinguent par les leviers d'action mobilisés (sobriété, efficacité énergétique, etc.), les usages considérés, l'échelle retenue (mondiale, européenne, etc.).

En termes de scénarios, le scénario BlueMap par exemple est assez conservateur : il prévoit d'ici 2050 une production d'électricité provenant à 40 % d'énergies renouvelables. Le scénario WWF est basé sur la sobriété d'usage, avec une diminution d'énergie consommée en 2050 par rapport à l'actuelle. Le scénario Garcia-Olivarès imagine quant à lui qu'en 2050 l'électricité sera la seule source d'énergie produite à partir de renouvelables. Les besoins cumulés d'acier, aluminium et cuivre associés à cette production d'électricité (énergies hydraulique, solaire et éolienne) pourraient représenter plus de 10 fois la production mondiale de ces matières en 2015.

Parmi les ressources minérales, le cas du cuivre est intéressant à étudier. Ce métal de base est en effet transversal, il se retrouve tout au long de la chaîne de valeur : de la production d'énergie avec les infrastructures (éoliennes), à l'usage de l'énergie (composition de véhicule électrique) en passant par le stockage, le transport et la distribution (fils conducteurs, etc.).

Les estimations de quantités de cuivre varient selon les scénarios retenus : on estime entre 100 à 300 Mt les quantités nécessaires pour les secteurs de production d'électricité et du transport en 2050. Si l'on considère le scénario le plus ambitieux, sur la base des technologies actuelles (en termes de quantités de cuivre mobilisées, de performances, etc.), les besoins en cuivre (300 Mt Cu) représentent 18 années de la production mondiale actuelle, et 40 % des réserves actuellement connues. Il faut ajouter à cela la prise en compte des enjeux environnementaux et énergétiques associés à cette production : quelle énergie nécessaire ? quels impacts environnementaux (extraction, etc.) ?

Quelles implications en termes d'offre ?

La modélisation dynamique permet de mieux comprendre les couplages entre réserves-production primaire et recyclage-économie-énergie et de comparer les impacts des différents scénarios énergétiques mondiaux. Ces évolutions doivent être mises en perspective avec des aspects économiques.

En effet, quand un pays se développe, sa consommation de matières (par exemple de cuivre) par habitant va augmenter, jusqu'à un certain point de PIB. Si la croissance démographique et le développement des pays continuent comme dans le passé, on devra produire environ 1 milliard de tonnes de cuivre d'ici 2050 et 2 autres milliards d'ici 2100 (toutes applications confondues), alors que la quantité cumulée produite depuis l'antiquité jusqu'à aujourd'hui est de moins de 1 milliard de tonnes. La production primaire sera insuffisante, mais le cuivre se recycle bien, et la contribution du cuivre recyclé devrait devenir supérieure à celle du cuivre primaire en 2070.

En intégrant à la modélisation les aspects économiques (prix du métal, coût de la production, marché du secondaire, etc.), les résultats montrent que la demande mondiale en cuivre d'ici 2030 pourrait être couverte par les productions primaire et secondaire, à condition que la production primaire se stabilise à 30 Mt/an. Le développement du primaire restera donc important.

Il est nécessaire d'avoir un modèle couplé-dynamique qui puisse expliquer les données historiques (évolution, etc.) et intégrer des aspects environnementaux (consommation d'eau, d'énergie, de sols, etc.) et économiques (prix et coûts de production). Les ressources minérales s'inscrivent en effet dans un contexte mondial, et les préoccupations nationales sont relatives à la dépendance/vulnérabilité vis-à-vis de certains pays pour l'approvisionnement en ces ressources.

Une modélisation dynamique nécessaire : le projet SURFER

L'ensemble des exemples de modélisation mentionnés font partie du projet SURFER actuellement en cours. Ce projet, porté par le CNRS, le BRGM et l'ADEME, vise entre autres à estimer les besoins en ressources minérales associés à la transition vers une énergie bas-carbone, en répondant aux questionnements suivants :

- Quelles sont les ressources mobilisées, et pour quelles technologies ?
- Quels sont les besoins ? (selon les scénarios énergétiques)
- Quelle est la disponibilité de ces ressources ? (France et mondiale)
- Quels sont les impacts environnementaux de leur production ?
- Comment anticiper les changements technologiques et leurs améliorations ?


Partie 2 - Quels besoins ? Quels enjeux ?

Le projet vise à intégrer l'ensemble des secteurs de l'énergie, et pas seulement l'électricité et le transport : les enjeux sont également importants sur le secteur de la construction/du bâtiment par exemple. L'idée est également de ne pas se restreindre aux seules matières considérées comme critiques (vision court-terme), et de pouvoir considérer l'ensemble des contraintes économiques.

Diaporama d'Olivier Vidal

Modélisation dynamique de la demande et des capacités d'approvisionnement en matières premières pour la transition énergétique

Olivier Vidal, CNRS, Isterre olivier.vidal@univ-grenoble-alpes.fr

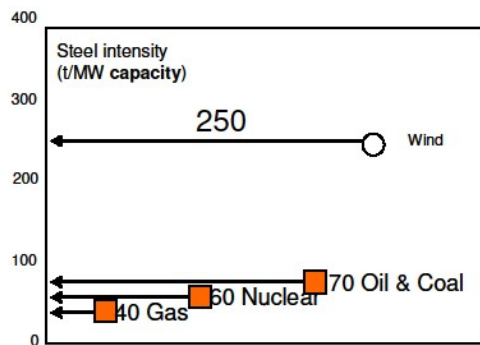


The reduction of CO₂ emissions requires

- Replacing the existing system of energy generation, storage, transport, distribution and use by a new infrastructure with a higher share of renewables
- Using intermittent flows of **diluted** renewable energies instead of stocks of concentrated fossil energies

Partie 2 - Quels besoins ? Quels enjeux ?

Renewable energies are diluted => large infrastructures are required

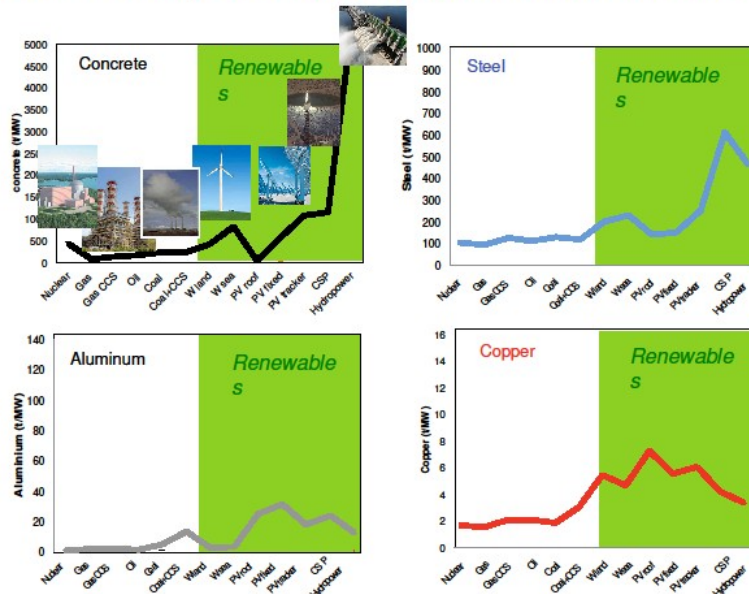


6 Mw, > 150 m, 1500 t steel
Permanent magnet ≈ 1 t REE
(Nd, Dy, Sm, Gd, or Pr)



700 wind turbines to produce the same annual energy (Wh) as a 1300 MW nuclear power plant

Material intensity of electricity-generation facilities (t/Mw)



Partie 2 - Quels besoins ? Quels enjeux ?

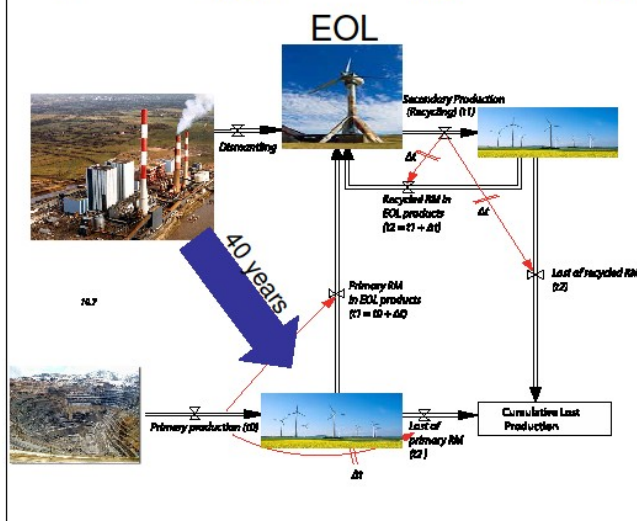
The transition towards low-carbon energy requires large amounts of mineral resources

- Which resources for which technologies ?
- How much ? (scenario dependent)
- Are they available ? (France vs world)
- What are the environmental impacts of their production ?
- Can we anticipate the technological changes & improvements ?

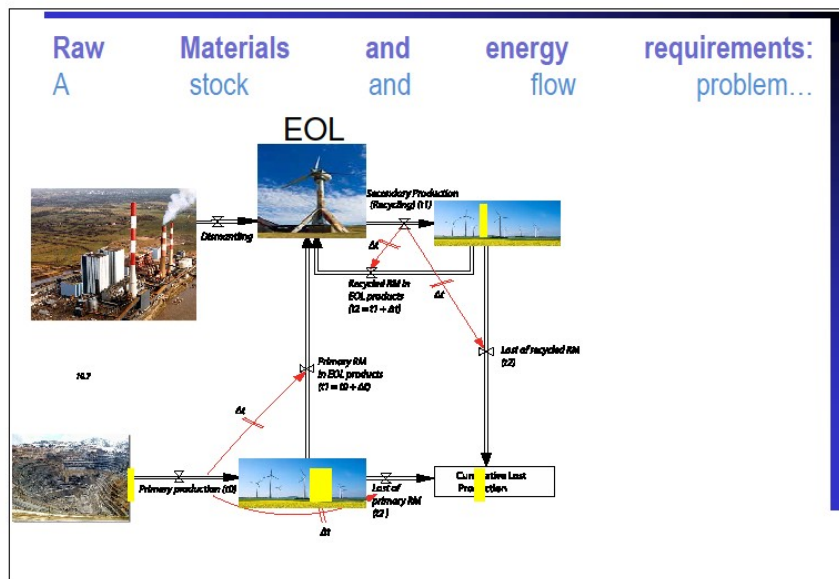
SURFER

CNRS-BRGM-Ademe

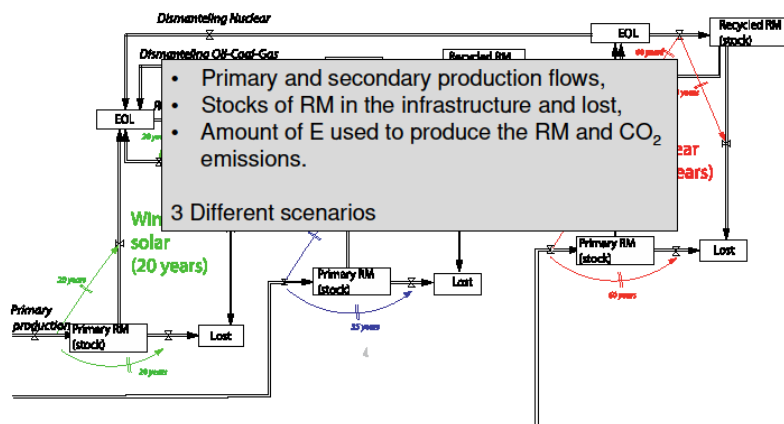
Raw Materials and energy flow requirements: problem...



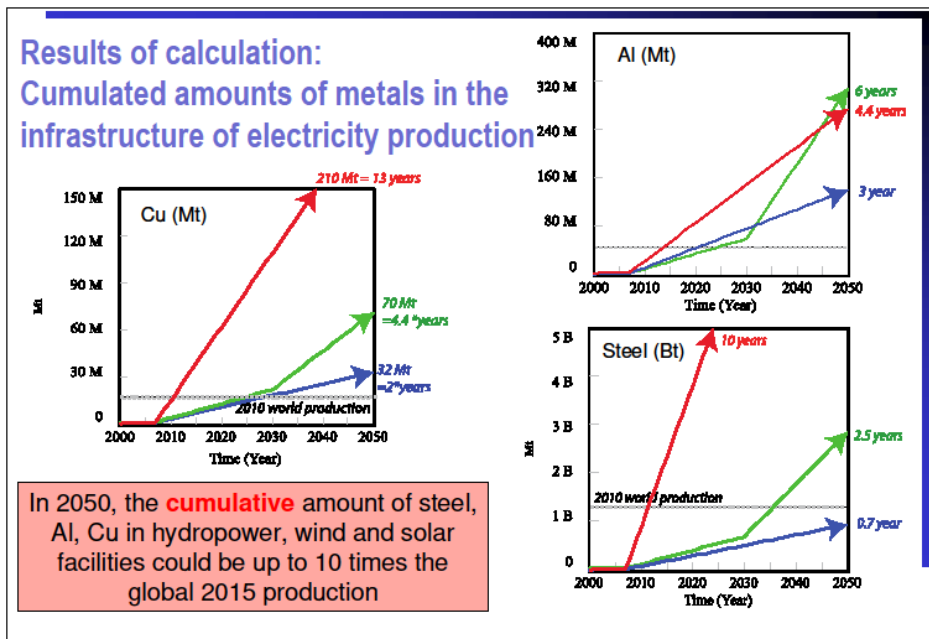
Partie 2 - Quels besoins ? Quels enjeux ?



Raw Materials and energy flow requirements: problem...



Partie 2 - Quels besoins ? Quels enjeux ?

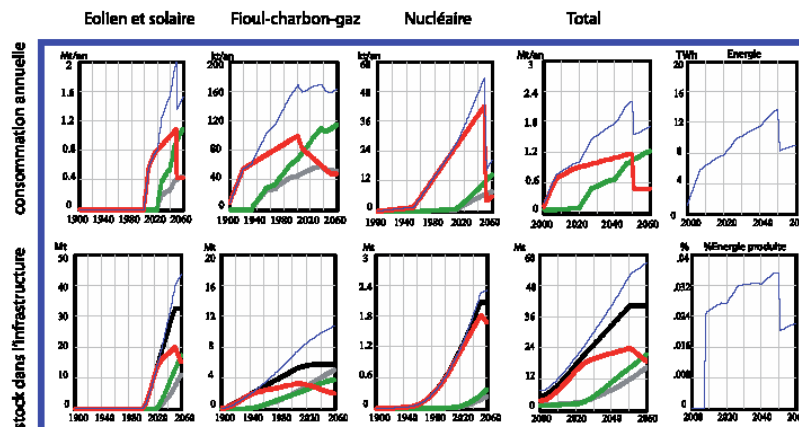


Scenario Generation of electricity

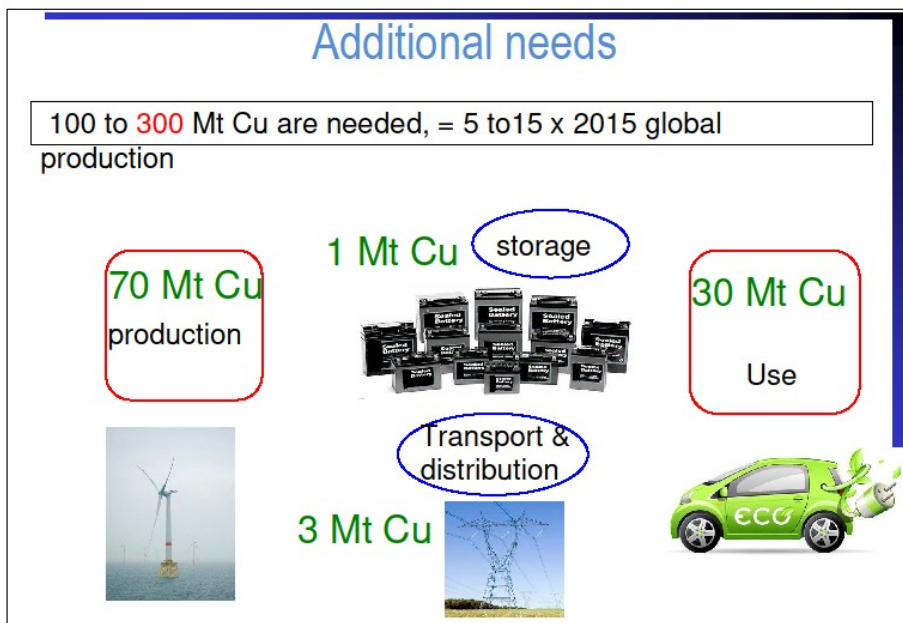
Bluemap, of electricity

IEA electricity

2010 only



Partie 2 - Quels besoins ? Quels enjeux ?



100 to **300** Mt Cu

X 5 to 15

Kennecott Copper Mine (Utah) 3.2 x 1.2 x 1.2 km³.

Since 1906, six billion tons of rocks have been removed from this pit to extract **18 million tons copper** – equivalent to one year of global primary Cu production

The image shows a large open-pit mine with a red circle highlighting a specific area. A red arrow points from this circle to a photograph of a red truck carrying a large yellow mining machine on a trailer.

Partie 2 - Quels besoins ? Quels enjeux ?

Should we worry ?

The most exigent scenario requires until 2050 (present-day technologies)

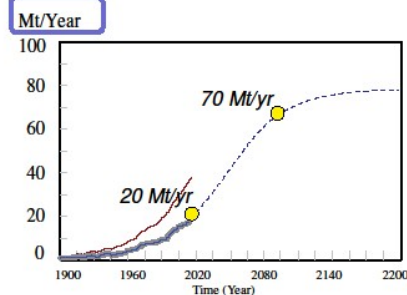
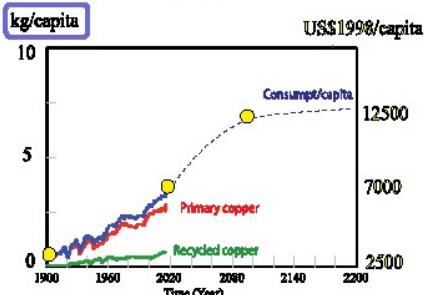
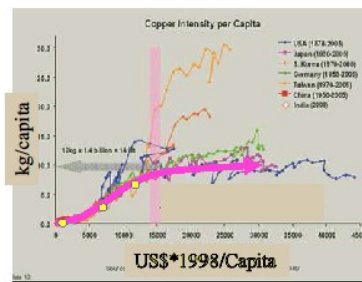
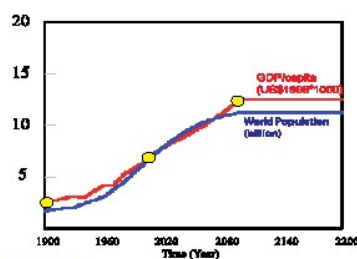
- 300 Mt Cu: 18 years of global production, 40% of known reserves
- 8 Mt Li: 190 years of global production, 200% of known reserves
- 66 Mt Ni: 40 years of global production, 95% of known reserves
- 31 Mt Pt: 19 years of global production, 44% of known reserves

...and energy to produce these metals...

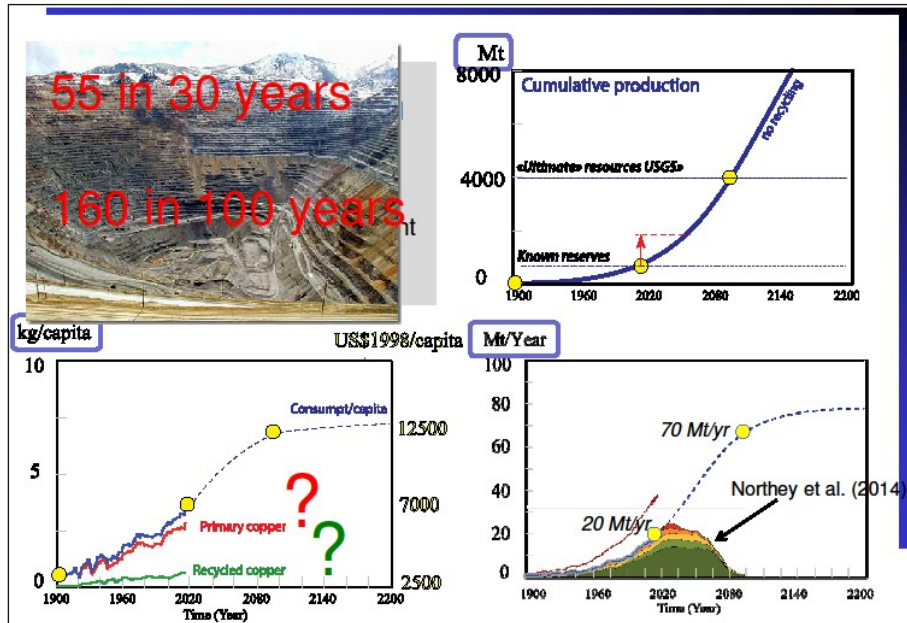
Can we make it ?

Dynamic modelling again

Global demand

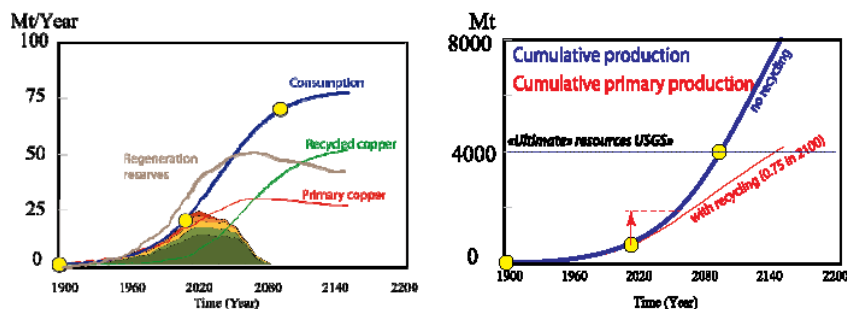


Partie 2 - Quels besoins ? Quels enjeux ?

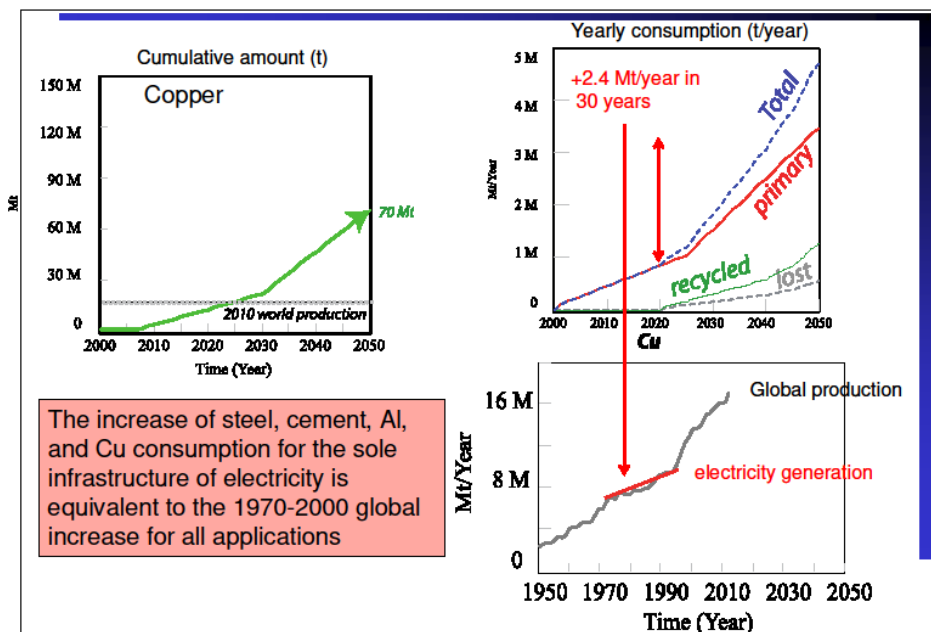
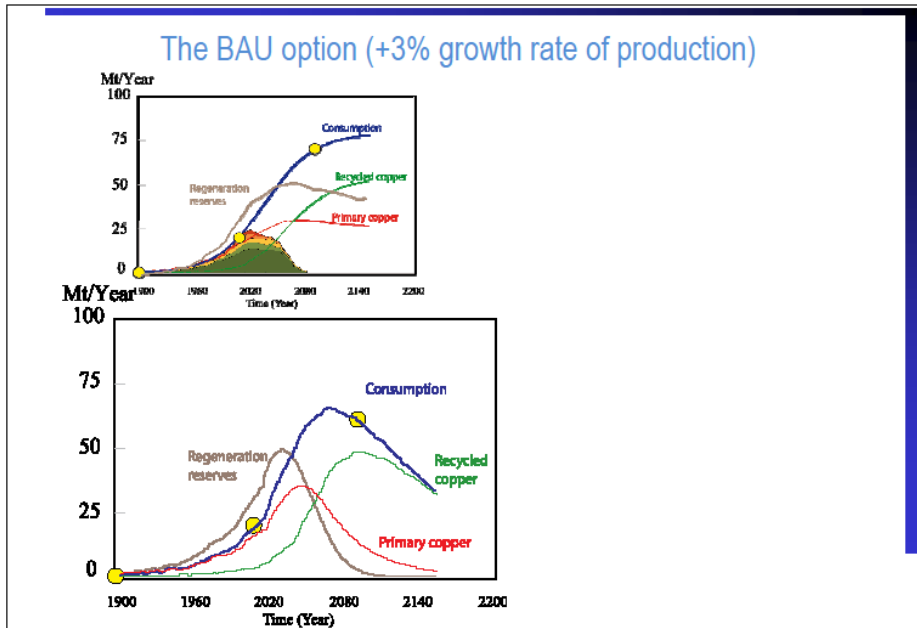


Can we make it ? production at fixed demand

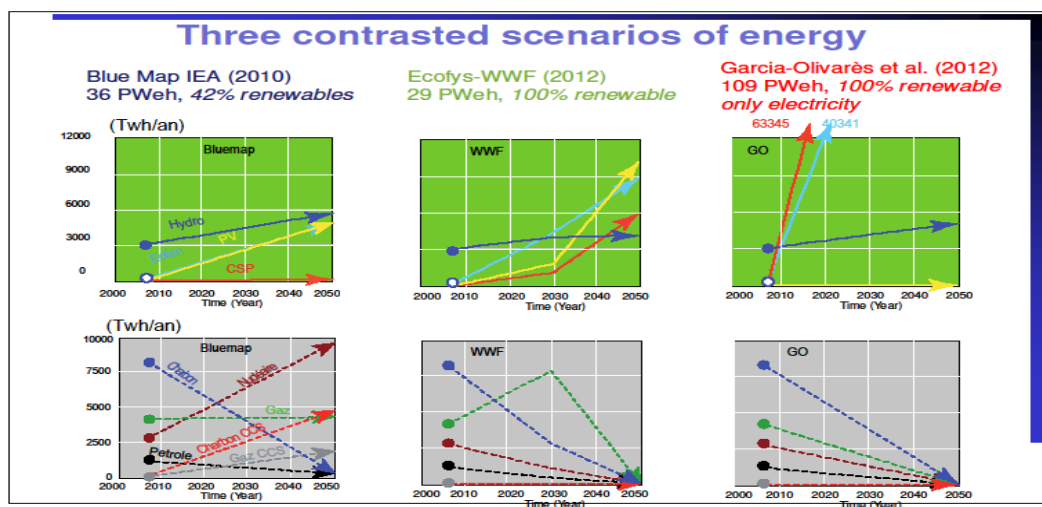
It seems that primary + secondary production can meet the expected global demand until 2100 under the condition that primary production stays below 30 Mt/yr



Partie 2 - Quels besoins ? Quels enjeux ?



Partie 2 - Quels besoins ? Quels enjeux ?



Conclusion

- Dynamic modelling is necessary to estimate the needs and environmental impacts (CO₂, water, land use, etc) of various scenarios
- All sectors of energy have to be included (only electricity and transport yet)
- The supply of primary raw materials is international but recycling can and should be national... be prepared for massive recycling, keep our waste at home and develop the required infrastructure
- Do not restrict the analysis to "critical" metals (short term view)
- Include the economic constraints

Panorama des enjeux associés à l'offre des matières premières

Alain Geldron - Expert national matières premières - Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME)

La dynamique de l'offre de matières premières est en premier lieu fonction de la demande. Un point doit retenir l'attention, dans l'analyse des besoins et des enjeux : la demande industrielle française, ou européenne ou d'un autre territoire est différente du besoin de la consommation intérieure de ce même territoire. Par exemple, les travaux de la Commission Européenne (European Commission 2017) sur la liste des métaux critiques s'appuient sur les besoins industriels européens tandis que l'étude de la même Commission Européenne sur les flux de matières premières (Bio by Deloitte, 2015) porte sur la totalité de la consommation européenne intégrant l'importation des produits finis. Un constat fort concerne la croissance continue de la demande en métaux de l'humanité qui s'est très sensiblement renforcée depuis le début des années 2000. Pour certains métaux cette évolution est exacerbée par les mutations technologiques, la transition énergétique est notoire de ce point de vue. Ainsi le développement d'un parc de véhicules 100 % électrique conduirait pour le cuivre des seuls véhicules à une augmentation de 22 % de la consommation mondiale totale annuelle. En effet un véhicule électrique de tourisme contient 4 fois plus de cuivre que le même véhicule à propulsion thermique. Mais pour le cobalt cela serait près de 20 fois la consommation mondiale totale actuelle et pour le lithium près de 30 fois.

Face à cette croissance le premier enjeu porte sur la disponibilité de la matière première vierge (cet aspect est traité plus en détail dans une note disponible sur ademe.fr ou sur mineralinfo.fr (Geldron, 2017)). Cette question est souvent analysée en rapportant le volume des réserves connues une année donnée à la production de cette même année, aboutissant à une durée d'épuisement des réserves (dénommé « burn rate » par les anglo-saxons). Si cet indicateur est intéressant il convient d'être prudent dans sa lecture, car les deux termes du ratio sont évolutifs. D'une part, l'exploration minière conduit à trouver de nouvelles réserves et d'autre part, la production, fonction de la demande, varie souvent à la hausse et parfois à la baisse. Ainsi la durée des réserves de cuivre est restée sensiblement la même depuis plus de 50 ans tandis que les tonnages de réserves ont été multipliés par plus de 10.

Cependant, compte tenu du temps des cycles d'exploration/mise en exploitation toute ressource minérale dont la durée des réserves est inférieure à 30 ans doit être un sujet d'attention. C'est notamment le cas de 17 métaux si l'on tient compte de la croissance actuelle de leur demande.

Partie 2 - Quels besoins ? Quels enjeux ?

Cette attention doit être renforcée pour certains métaux qui ne sont pas exploités pour eux-mêmes mais constituent des sous-produits d'autres métaux, comme cela est le cas de nombreux métaux dits technologiques, notamment indispensables à la transition énergétique. Ainsi sur 38 métaux, 21 sont dépendants de l'exploitation d'un autre métal qui n'a pas obligatoirement la même dynamique de demande. Par exemple le cobalt dépend totalement de l'extraction de cuivre et de nickel et la demande de cobalt croît actuellement plus vite que l'exploitation du cuivre ou du nickel. Cette situation renforce très sensiblement les risques de tension voire de pénurie sur ces métaux les rendant critiques.

Les ressources ultimes recouvrables, c'est-à-dire celles qui seraient atteignables en y mettant les moyens technologiques et financiers, sont sujettes à débat en l'absence de méthodologie reconnue et de données suffisamment fiables sur la répartition exacte des gisements dans la croûte terrestre. En effet, il reste des territoires qui n'ont pas été explorés, et seules les toutes premières centaines de mètres de la croûte terrestre ont été explorées avec les moyens actuels. De nouvelles réserves seront nécessairement découvertes mais possiblement pas au rythme de l'augmentation des besoins et très certainement à un coût d'extraction plus élevé. Il faut garder à l'esprit que les ressources ultimes recouvrables ne sont certainement pas infinies.

Face à la pénurie possible et aux impacts environnementaux de l'extraction de matières premières vierges, les regards se tournent vers le recyclage. Le constat des taux de recyclage actuels dans le monde (UNEP (IRP), 2013) montre que seuls 18 métaux sont recyclés à plus de 50 % mais que 33 le sont à moins de 1 %. Ceci induit qu'en Europe l'approvisionnement se fait à plus de 50 % par du recyclé pour seulement 3 métaux (cuivre, plomb, argent). Du fait que le recyclage ne peut s'approvisionner que sur les déchets générés, dans un contexte de demande croissante forte (supérieure à 1 %) qui génère plus de demande que de déchets collectables, le recyclage ne représentera qu'une part limitée de l'approvisionnement (Labbé, 2016). Il convient cependant de développer ce recyclage au maximum pour limiter les risques de pénurie.

La transition énergétique, avant la stabilisation à son maximum de développement, ne pourra satisfaire ses besoins par du recyclage. Un tel approvisionnement par du recyclage ne pourrait devenir sensible qu'au-delà de 2050. Ainsi le recours à de l'extraction minière est incontournable quels que soient les scénarios.

Plus généralement, les ressources ultimes recouvrables sont difficilement appréhendables mais certainement importantes au regard de la consommation actuelle. Les risques d'épuisement (ce qui ne signifie pas pénurie de l'offre) sont très probablement à exclure d'ici à 2050 et limitées à l'horizon 2100 pour peu que l'on y mette les moyens.

Cependant l'analyse doit, complémentirement, prendre en compte les enjeux sociaux et environnementaux pouvant faire obstacle à l'exploration et à l'exploitation minières. De nombreux éléments interviennent comme l'impact sur les populations locales en termes de

Partie 2- Quels besoins ? Quels enjeux ?

déplacement (d'expropriation), les impacts environnementaux, en particulier sur l'eau du fait :

- de la concurrence entre le besoin en eau des traitements et la consommation des populations locales ;
- du rejet dans la nature de ces eaux de traitement et des eaux de pompage souillées provenant de l'exploitation.

De plus en plus de retours compensatoires aux populations locales doivent être négociés et les refus d'exploitation ou condamnations par les tribunaux se développent de par le monde. En outre, l'exploitation minière a d'autres impacts directs sur l'environnement du fait de la modification des paysages, de la dégradation des sols, du stockage des résidus et des nuisances comme la poussière ou le bruit. La société développe une sensibilité accrue aux conditions de financement de l'exploitation minière (corruption et financement des conflits armés) ou aux conditions d'emploi des salariés, dont celui des enfants. Ainsi des zones de protection naturelle sont fermées à l'exploitation et d'autres zones voient un refus total de l'ouverture d'exploitation restreignant ainsi les ressources envisageables à l'exploitation. Dans le même temps, les citoyens souhaitent disposer des biens fabriqués avec ces matières, nécessitant de modifier les conditions d'exploitation pour la rendre plus responsable à défaut d'atteindre l'illusion de devenir propre. À l'image de toute activité humaine, la mine aura toujours un impact qu'il convient de minimiser. Le coût d'accès aux matières premières ne fera ainsi que croître avec des risques de pénuries si la demande est trop forte.

Diaporama d'Alain Geldron



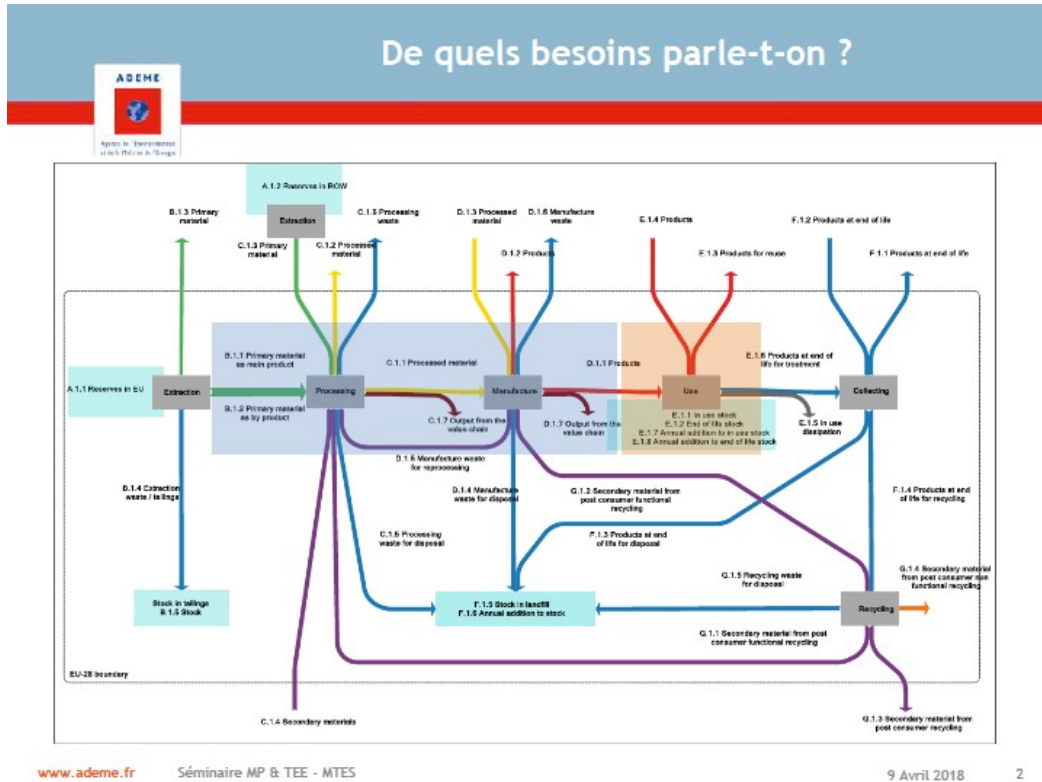
Panorama des enjeux associés à l'offre en matières premières



Alain Geldron
Expert national matières premières

Paris - MTES - 9 avril 2018

Partie 2- Quels besoins ? Quels enjeux ?

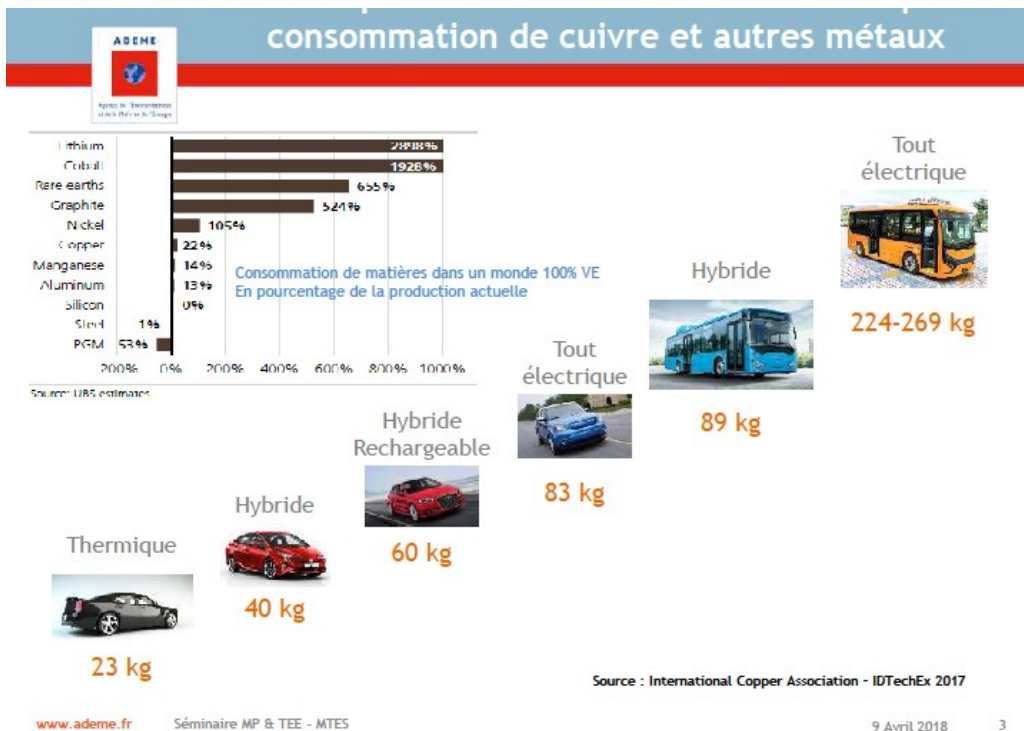


www.ademe.fr

Séminaire MP & TEE - MTEs

9 Avril 2018

2



www.ademe.fr

Séminaire MP & TEE - MTEs

9 Avril 2018

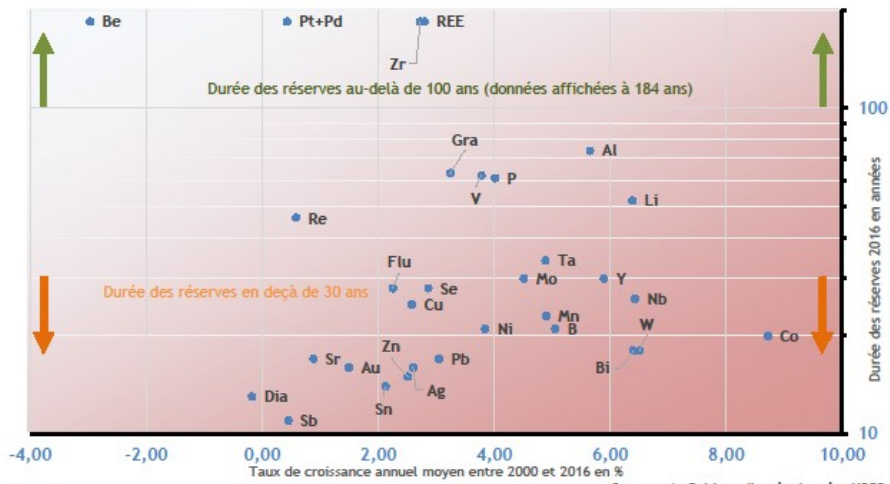
3

Partie 2 - Quels besoins ? Quels enjeux ?

Croissance et réserves



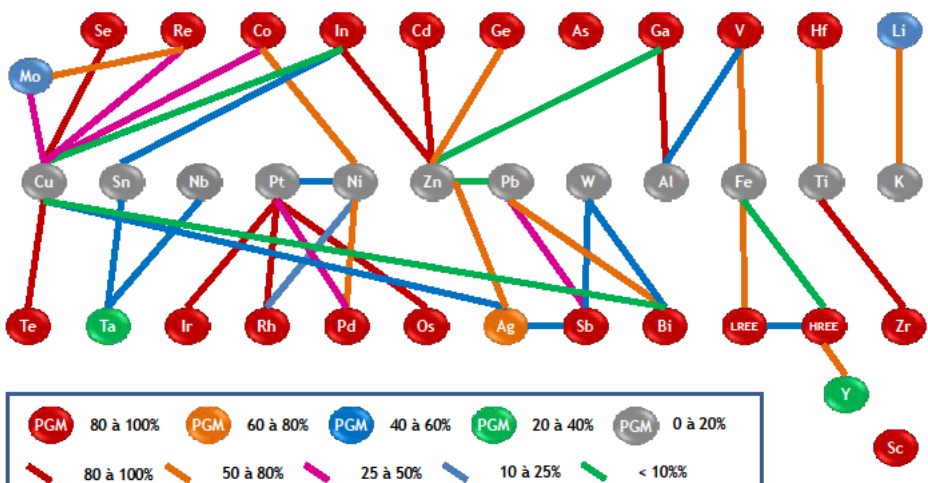
Croissance de la production entre 2000 et 2016 et durée des réserves 2016 à ce taux (données USGS)



www.ademe.fr Séminaire MP & TEE - MTES Source : A. Geldron d'après données USGS 9 Avril 2018 4

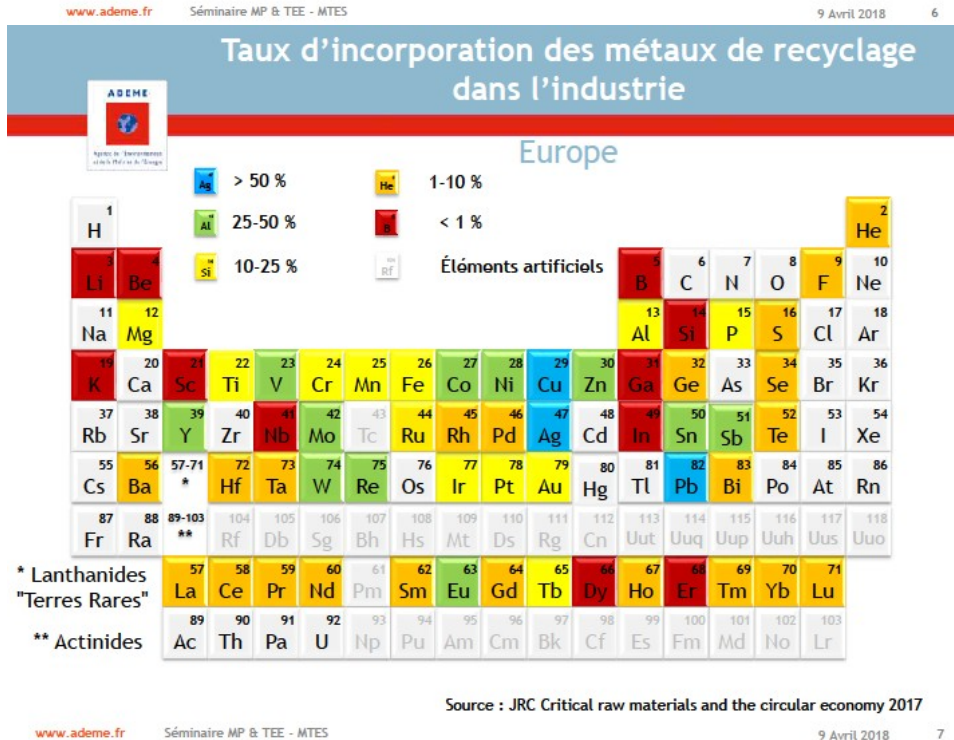
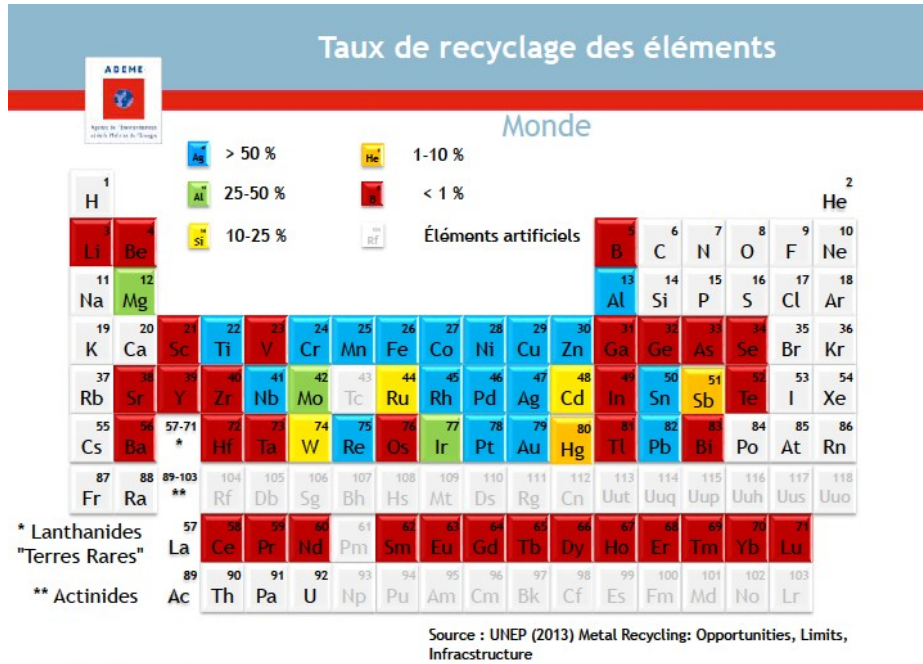
Des métaux exploités pour eux-mêmes et d'autres sont des sous-produits

22 métaux sur 38 dépendants d'un autre

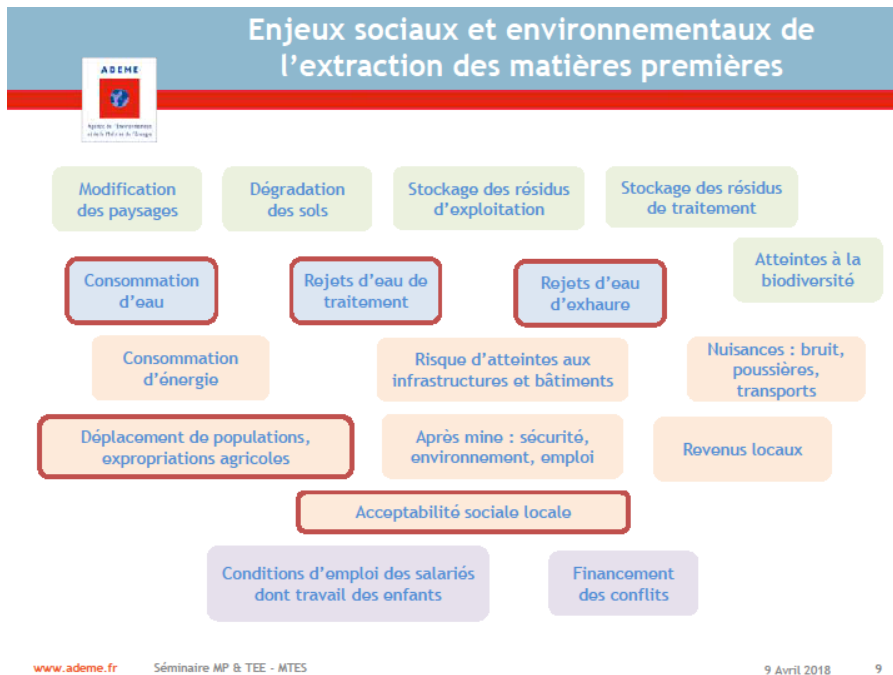
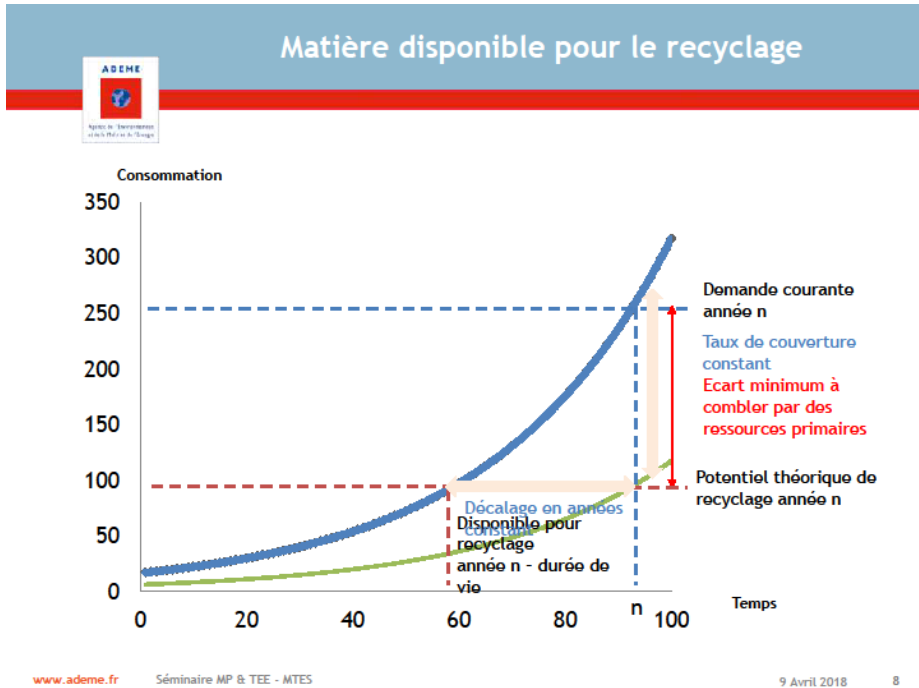


www.ademe.fr Séminaire MP & TEE - MTES Source : D'après données Nassar, Graedel, Harper 2015 9 Avril 2018 5

Partie 2- Quels besoins ? Quels enjeux ?



Partie 2 - Quels besoins ? Quels enjeux ?



3. Nexus énergie-ressources minérales : implications pour la transition énergétique

Florian Fizaine- Maître de conférences - IGERE - USMB

Les risques associés au réchauffement climatique imposent une réponse urgente et à la mesure des enjeux afin de contenir la hausse des températures globales à +2°C par rapport à l'ère préindustrielle. La plupart des pays européens ont souhaité s'engager dans cette lutte en menant des politiques volontaires de transition énergétique visant à réduire massivement leurs émissions annuelles de gaz à effet de serre (GES). Il existe plusieurs moyens de réduire ces émissions de GES mais les Etats ont avancé des solutions axées principalement sur deux volets majeurs : l'efficacité énergétique et la décarbonation de l'énergie.

En parallèle à ce mouvement, une littérature scientifique de plus en plus importante a mis en avant la plus grande intensité en matières premières (et métaux) des énergies renouvelables en comparaison des énergies fossiles traditionnelles (diapositive 3). Fort de ce constat, de nombreuses études se sont alors focalisées sur les quantités nécessaires de matières premières pour bâtir le système énergétique décarboné de demain, démontrant ainsi la criticité de certaines matières et parfois les risques d'indisponibilité associés menaçant la transition énergétique. Bien que de nombreuses problématiques aient pu émerger du nexus ressources minérales – énergie, un certain nombre d'implications restent trop peu étudiées et documentées. C'est le cas notamment des effets corollaires de la transition énergétique en termes de géopolitique de l'énergie mais aussi de l'impact de l'épuisement « qualitatif » des métaux sur le surplus énergétique des énergies renouvelables. Ces phénomènes charrient pourtant des risques importants qu'il pourrait être intéressant de mieux comprendre pour les anticiper.

Transition énergétique et métaux : nouvelle géopolitique de l'énergie

Les nouvelles technologies de l'énergie (décarbonées) consomment une quantité supérieure de métaux à quantité d'énergie produite égale. Cela signifie que le système énergétique de demain bien que s'appuyant sur de l'énergie renouvelable continuera à dépendre de ressources naturelles épuisables (les métaux). La transition énergétique pourrait donc, dans les considérations actuelles, simplement faire basculer notre dépendance aux énergies fossiles vers une dépendance accrue aux métaux.

Les producteurs de métaux seront donc les grands gagnants d'un monde post-transition énergétique tandis que les producteurs d'énergie fossiles ont tout intérêt à ce que la transition énergétique s'effectue le plus lentement possible afin de conserver la valeur de leurs richesses en terre (la transition énergétique conduisant *de facto* à « stériliser » l'intérêt de nos économies pour les hydrocarbures).

Partie 2 - Quels besoins ? Quels enjeux ?

Cette redistribution des cartes au niveau de la géopolitique n'a pas été étudiée précisément alors même qu'elle peut permettre de mieux illustrer le jeu actuel et à venir des acteurs. Une approche possible consiste à observer la distribution actuelle des rentes (grossièrement la richesse tirée des ressources) mais aussi des réserves associées aux énergies fossiles et aux métaux (diapositives 4 et 5). Cet exercice conduit à tirer 4 conclusions majeures :

- Certains pays sont très clairement avantagés car grands pays miniers et donc favorables à la transition énergétique (cercle vert), alors que d'autres comme les pays de l'OPEP n'ont pas de métaux mais seulement des ressources en hydrocarbures (cercles rouges). Enfin, une troisième catégorie n'a ni production de métaux ni ressources énergétiques fossiles (la plupart des pays européens) ;
- Les métaux sont beaucoup plus concentrés entre les mains de quelques pays (dont la Chine) que ne le sont les énergies fossiles pourtant considérées comme sensibles (plus d'un facteur 2 au niveau de l'indice de Herfindahl Hirschman) ;
- Les enjeux sont encore faibles pour les métaux (366 milliards de dollars) en comparaison des énergies fossiles (3 800 milliards de dollars) ;
- La vision sur le futur (les réserves) ne change que très marginalement le tableau (la Chine perd un peu de poids tout en restant l'acteur n°1).

Transition énergétique et épuisement des métaux : une vision par le taux de rendement énergétique

Le deuxième point intéressant à aborder repose sur l'impact de l'épuisement des métaux (qu'on ne traite pas dans la transition énergétique) sur le surplus énergétique des énergies renouvelables. L'objectif d'un système énergétique est de produire plus d'énergie qu'il n'en consomme sur l'ensemble de sa durée de vie. Ceci peut être résumé par l'indicateur du taux de rendement énergétique (rapport de l'énergie produite sur l'énergie directe et indirecte incorporée) dont le seuil critique est l'unité (diapositive 7). Les métaux consomment de l'énergie et la dégradation de leurs teneurs dans les gisements implique une consommation grandissante d'énergie par unité de métal produite (diapositive 8). Cela signifie qu'au fur et à mesure que l'on épuise les gisements en métaux, la teneur diminue et le taux de rendement énergétique des énergies décarbonées décroît (diapositive 9). Certains systèmes sont plus résilients à cet épuisement des métaux (hydraulique, nucléaire) tandis que d'autres y sont très sensibles (le solaire à concentration et photovoltaïque).

De manière générale, cette étude montre que nous n'aurons toujours pas résolu la question de la transition énergétique si nous ne pallions pas l'épuisement des métaux et/ou la connexion entre énergie et métaux.

Recommandations pour la transition énergétique

Il y a bien d'autres problématiques issues du nexus énergie-ressources minérales (non présentées ici) et il semble important de montrer qu'il existe d'autres chemins de transition(s) énergétique(s) que la seule voie de décarbonation de l'énergie qui risque probablement de seulement déplacer le problème global sur le secteur des métaux (diapositive 11).

Pour éviter cette impasse à venir, les Etats ont tout intérêt à accentuer leurs efforts sur l'efficacité énergétique (moins d'énergie pour rendre le même service économique) et la sobriété (revoir les besoins). Les politiques néomalthusiennes sont hors de propos (la population n'est plus le principal facteur d'augmentation des GES) et la géo-ingénierie qui joue sur les conséquences plutôt que les causes du réchauffement climatique comporte trop de risques et d'incertitudes pour s'y résoudre.

Si jamais la transition énergétique était malgré tout axée sur la décarbonation de l'énergie, il faudrait assortir cette politique de contre-mesures pour atténuer ses effets corollaires :

- Accentuer le recyclage des métaux, même si ce levier ne permet pas de boucler le bilan dans une économie en croissance et que la dématérialisation semble opposer des forces contraires à celui-ci.
- Jouer sur les substitutions (des métaux rares par des métaux de base, des métaux de base par des ressources renouvelables) dans la mesure du possible, compte tenu des contraintes techniques des produits et de l'état d'exploitation déjà limite d'un certain nombre de ressources renouvelables.
- Favoriser l'efficacité matérielle (dématérialisation et réduction du contenu en matières premières par service économique rendu) trop peu présente dans les discours et les incitations. Ce levier pourrait être intéressant à mobiliser bien qu'il puisse aussi limiter en parallèle la rentabilité du recyclage (volume et dilution des métaux dans les produits).

Partie 2 - Quels besoins ? Quels enjeux ?

Diaporama de Florian Fizaine



Nexus énergie-ressources minérales : implications pour la transition énergétique

Florian Fizaine*

Atelier-Séminaire CGDD – 09/04/2018

Besoins en ressources minérales liés à la transition énergétique et enjeux associés

*Maître de conférences, Laboratoire IREGE, Université de Savoie Mont Blanc

Email: florian.fizaine@gmail.com, Website: <https://sites.google.com/site/florianfizaine/>

Introduction



Deux constats de départ

➤ **La transition énergétique = hausse des besoins en matières premières (à énergie produite constante)**
 Passer d'énergie carbonées aux énergies renouvelables n'est pas une condition suffisante pour passer à une économie de flux indépendante de l'extérieur

➤ **L'offre d'énergie n'est pas indépendante de ce qui se passe dans les autres secteurs (et réciproquement)**
 Modéliser l'évolution de l'offre sans prendre en compte les interdépendances peut conduire à des prévisions trompeuses

Deux questionnements sous-jacents

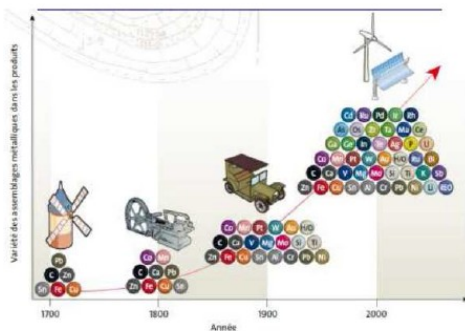
➤ **Si on dépend toujours de ressources de stocks : quid gagnants et perdants de la transition énergétique ?**

➤ **Si secteur des métaux et énergie interdépendants : Impact à long terme de l'épuisement des métaux sur le secteur de l'énergie ?**

▶ 2

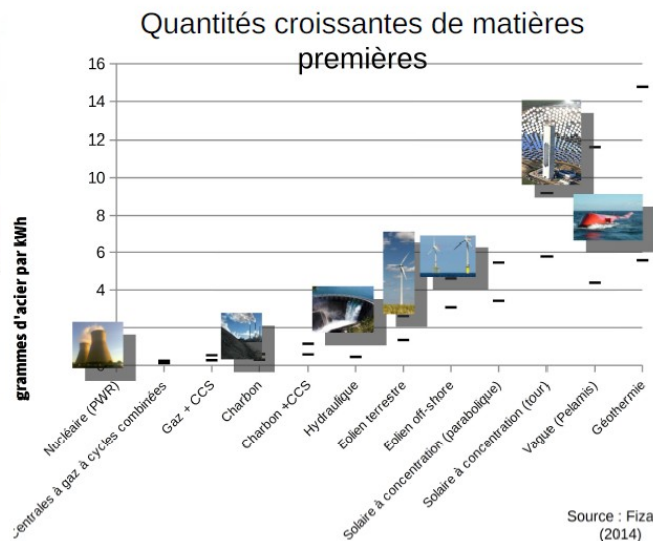
Constats : complexité et intensité des énergies

En quoi les énergies décarbonées mais surtout les ENR sont-elles différentes ?



Source : Vidal (2014) citant Van Schalk and Reuter, 2012; adapté de Achzel and Reller

Complexité croissante des systèmes énergétiques



Zoom n°2 : L'épuisement des métaux



Etudes publiées sur la question (JRC, 2011; Moss et al., 2013; World Bank, 2017...):

- **Angle purement quantitatif et souvent sectoriel**
- **N'envisage pas les possibilités de substitution** pour desserrer une contrainte portant sur une ressource
- Ignore les dépendances et effets de rétroactions entre secteur de l'énergie et des métaux

Etudes ont quantifié la **baisse des teneurs sur le long terme** des minerais associés aux métaux

Plutôt considérer l'épuisement qualitatif des métaux :

⇒ **Analyse de la valeur des minerais sous l'angle de l'énergie** (Energy Return On Investment : EROI)

Epuisement qualitatif des conséquences en termes de consommation énergétique liée aux métaux

Conséquences de l'épuisement qualitatif des métaux ?

Pour établir la réponse à cette question :

- > Extrapolation de l'efficacité des technologies actuelles vis-à-vis de teneurs de minerais beaucoup plus faibles
- > Comparaison avec l'énergie dégagée par un système d'énergie décarbonnée

▶ 6

Zoom n°2 : L'épuisement des métaux



Considérant que le EROI est défini de telle manière :

$$EROI = \frac{E_{out}}{E_{in}}$$

← Quantité d'énergie générée par le système (GJ)
← Quantité d'énergie directe et indirecte absorbée par le système (GJ)

Nous pouvons calculer l'évolution de l' E_{in} suite à l'épuisement des métaux et déterminer le nouveau EROI

Evolution de l'énergie consommée par les métaux en fonction de l'épuisement ?

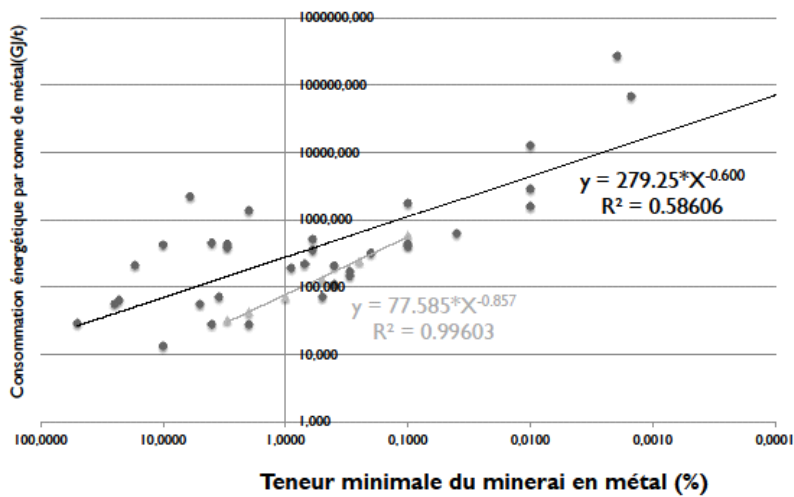
▶ 7

Partie 2 - Quels besoins ? Quels enjeux ?

Zoom n°2 : L'épuisement des métaux



Nous pouvons calculer l'évolution de l'E_{in} suite à l'épuisement des métaux et déterminer le nouveau EROI

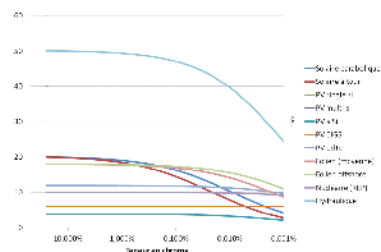


8

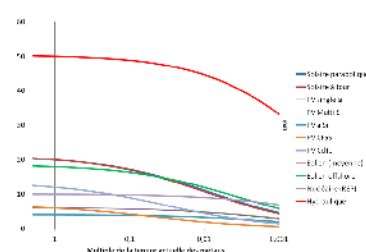
Zoom n°2 : L'épuisement des métaux



Sensibilité de l'EROI à l'épuisement d'un métal



Sensibilité de l'EROI à l'épuisement de l'ensemble des métaux



Conclusion : disponibilité de l'énergie dépend fortement de la disponibilité énergétique des métaux

Autres facteurs : + Barrière minéralogique, profondeur, impuretés, externalités non intégrées, système isolé
- Recyclage, dématérialisation, efficacité énergétique, substitution, coproduction

9

Rappel des principaux risques



En l'état actuel des choses et en cas de transition énergétique, nous nous exposons à :

(1) **Une accentuation de la concentration géographique de la production des ressources naturelles** indispensables au système énergétique et donc de la captation des rentes qui vont avec.

Si on ne traite pas la question de la dépendance économique aux ressources naturelles

(2) **Possible emballement de la consommation énergétique** des métaux (pour leur extraction et leur concentration) sous l'effet de l'épuisement, **réduisant le surplus énergétique** dégagé par le système énergétique

Passer d'énergie non renouvelable aux énergies renouvelables n'est pas suffisant si :

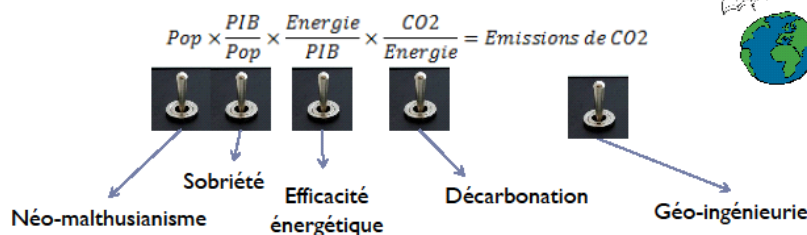
- (i) On ne traite pas le problème de l'épuisement des métaux
- (ii) Le lien entre énergie et métaux

▶ 10

Axes de recommandations



Identité de Kaya (dérivée de celle d'Ehrlich) :



1^{er} choix :

Favoriser les transitions énergétiques promouvant l'action sur les deux leviers centraux pour éviter de déplacer le problème sur les matières premières

2^{ème} choix :

Si chemin de transition énergétique axé sur la décarbonation alors assortir de contre-mesures :

- Réutilisation/Recyclage (contraintes réglementaires, instruments économiques, levier technique)
- Substitution (métaux rares par métaux abondants, par ressources renouvelables, par capital technique).
- Efficacité matérielle au niveau de l'offre énergétique mais aussi au niveau des autres secteurs économiques

▶ 11

Annexes : pour en savoir plus



Transition énergétique et métaux

F. Fizaïne, Vers la généralisation des marchés à terme pour les matières premières ? Une réponse probabiliste appliquée aux marchés de métaux, Working paper, 2016.

F. Fizaïne, Minor metals and organized markets: news highlights about consequences of establishing a future market into a thin market with a double trading price system, *Resources Policy*, Volume 46 (2), 59-70, 2015

F. Fizaïne, Les métaux rares. Opportunité ou menace ? Enjeux et perspectives associés à la transition énergétique., Edition Technip, Collection Géopolitique, septembre 2015, 192p.

F. Fizaïne, V. Court, Renewable electricity producing technologies and metal depletion: a sensitivity analysis using the EROI, *Ecological Economics*, Volume 110, 106-118, 2015.

F. Fizaïne, Byproduct production of minor metals: threat or opportunity for the development of clean technologies? The PV sector as an illustration, *Resources Policy*, Volume 38, 373-383, 2013.

Partie 2 - Quels besoins ? Quels enjeux ?

Conditions générales d'utilisation

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (3, rue Hautefeuille — 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'oeuvre dans laquelle elles sont incorporées (loi du 1^{er} juillet 1992 — art. L.122-4 et L.122-5).

Directrice de la publication : Laurence Monnoyer-Smith

Rédactrice en chef : Laurence Demeulenaere

Dépôt légal : décembre 2018

ISSN : 2552-2272



Les Actes du séminaire organisé le 9 avril 2018 par le CGDD sur « Transition énergétique et ressources minérales : les défis à relever » regroupent les présentations des différents intervenants ainsi que leur synthèse.

Ces interventions ont permis de rappeler les objectifs d'efficacité énergétique et d'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique français et d'avoir un aperçu de l'état des connaissances sur les besoins en ressources minérales de la transition énergétique française ainsi que des enjeux économiques et environnementaux associés.

Transition
énergétique et
ressources
minérales
Les défis à relever

Actes du séminaire du
9 avril 2018



commissariat général au développement durable

Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du
développement durable

Sous-direction de l'économie des ressources naturelles et des
risques (ERNR)

Tour Séquoia
92055 La Défense cedex
Courriel : enr.seei@developpement-durable.gouv.fr

www.ecologique-solidaire.gouv.fr

