

QUOI DE NEUF AU THINKTANK?

Le débat des experts de la mobilité



N°5 Avril 2024



LA QUESTION DES MINERAIS POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE



Temps
de lecture
estimé : **15mn**

INTERVENANTS

Jean Coldefy

Directeur du programme Mobilité et transitions
ATEC ITS FRANCE

Olivier Vidal

Directeur de recherche au CNRS
Institut des Sciences de la Terre de Grenoble (ISTERRE)

EDITO



La question du futur des ressources minérales ne peut pas reposer uniquement sur la connaissance de la disponibilité géologique actuelle pour un taux de croissance constant de la demande. Cette question doit être traitée par des modèles dynamiques qui intègrent les évolutions de PIB et de population, la production primaire et le recyclage, les dimensions géologiques, environnementales, les évolutions technologiques, et géopolitiques.

Le modèle développé par le laboratoire du CNRS ISTERRE de Grenoble, intègre ces différentes dimensions et définit des fonctions de demande selon les stades de développement économique des pays sont élaborées pour les objets de la vie courante : bâtiments, infrastructures, voitures, avions, ce qui permet de déduire les besoins futurs pour les différentes ressources, acier, ciment, énergétiques, minérales, ... et de faire des analyses qui in fine intègre non seulement la question des quantités mais aussi celle des prix, de la disponibilité de l'énergie et de la géopolitique.

Nous présentons dans cette publication le résumé des échanges avec Olivier Vidal retranscrits par Jean Coldefy.

SOMMAIRE

| | |
|--|---|
| DEMAIN, LA PÉNURIE DES MINÉRAIS POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ? | 3 |
| LA QUESTION DES MINÉRAIS POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE | 5 |
| PANORAMAS : RESSOURCES CLEFS | 8 |



DEMAIN LA PÉNURIE DES MINÉRAIS POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ?

Par Jean Coldefy

La transition énergétique passera par une électrification massive des usages. Tous les scientifiques et experts s'accordent à dire que ceci induira une augmentation massive des besoins de minerais : Cuivre, Lithium, Cobalt, ... Les raisonnements malthusiens qui déjà prévoyaient depuis des décennies une fin des stocks de pétrole sont à nouveau convoqués : nous n'aurions pas assez de minerais disponibles pour assurer la demande, et les logiques de décroissance, voire de pénurie et d'effondrement devraient alors s'imposer.

La formule « la croissance infinie dans un monde fini est impossible » refait surface mais elle a été détournée et déformée puisque c'est l'économiste Kenneth Boulding qui déclarait « Celui qui croit qu'une croissance exponentielle peut continuer indéfiniment dans un monde fini est soit un fou, soit un économiste ».

Il y a bien longtemps que la croissance économique n'est plus **exponentielle** dans les pays développés, mais il est aussi certain que le développement économique des pays de l'OCDE a été possible du fait des progrès technologiques ayant donné accès à une énergie abondante et peu chère. Il est aussi difficile de contester la volonté des pays en développement de souhaiter de meilleures conditions de vie pour leurs populations et donc une croissance forte, en cours depuis 30 ans.

Le corollaire de la charge contre la croissance économique est celui de la finitude des ressources qui repose sur une thèse simple : le monde est fini, ses ressources sont limitées et la croissance de leur consommation n'est donc pas

infinie. Dans l'absolu qui pourrait contester une telle affirmation ? Déjà au 19^{ème} William Stanley Jevons un économiste anglais démontre que plus le progrès rend les machines efficaces, plus les prix baissent et la consommation augmente. Il pronostique ainsi la fin du charbon pour 1985 et propose de faire preuve de modération pour préserver la ressource. S'il avait vu juste pour le Royaume Uni, à l'échelle de la planète il a eu tort : le charbon est une ressource abondante et donc peu chère. En 1942, on estimait que les réserves existantes de pétrole seraient toutes taries en 1951 de même que l'on pensait n'avoir en 1924 que quelques années de réserves de cuivre.

Si la thèse de la fin des ressources et des peak oil, copper, ... se sont avérées fausses, en sera-t-il de même pour les métaux nécessaires à la transition énergétique ? Différentes publications scientifiques permettent d'éclairer ce débat.

La question pour chaque minéral, contrairement au pétrole et le charbon qui sont brûlés, n'est pas seulement celle des stocks, mais aussi des flux, du rythme de la demande et de l'offre, de la temporalité de l'ensemble.

Olivier Vidal directeur de recherche au CNRS, à l'Institut des sciences de la Terre de Grenoble, dans le cadre de la transition vers une énergie à faible teneur en carbone, travaille depuis de nombreuses années sur le lien entre les ressources minérales et l'énergie, sur la modélisation dynamique des réserves, de la production, de la consommation, du recyclage, et du prix à l'échelle mondiale sur le long terme.

Son laboratoire a développé un modèle dynamique permettant de visualiser les problématiques liées à la disponibilité des minerais. Il a écrit plusieurs articles qui font référence sur le sujet, dont nous présentons les principales conclusions ci-après.

Historiquement les scénarios de pénuries des ressources se sont lourdement trompés, en :

- sous-estimant les réserves : pour limiter la pénurie, on cherche et quand on cherche on trouve ;
- sur-estimant la demande par la simple poursuite de courbes de tendances, alors que la croissance économique est faible dans les pays de l'OCDE depuis longtemps ce qui induit une demande stable en matériaux et forte dans les PVDs ;
- négligeant les gains de productivité permis par les technologies, qui sont d'autant plus importants que les prix augmentent ;
- négligeant la substitutions possible du fait des progrès technologiques.

Mais le passé ne donne pas toutes les clefs pour comprendre l'évolution future. Ces tendances passées se poursuivront-elles dans un contexte de demande globale croissante et des impacts environnementaux également croissants ?

Comme pour le pétrole, la disponibilité de la ressource minière est une question :

- de demande avec une population qui pourrait atteindre 10 milliards d'habitants et un niveau de PIB que l'on souhaite s'élever dans les PVDs pour des questions évidentes de bien-être des populations ;
- d'offres : stocks, flux, et leurs temporalités.

Au contraire du pétrole et du gaz que l'on brûle, le recyclage des métaux est une ressource permettant de limiter les besoins en matières premières.

La ressource en minerais subit la dilution de la concentration dans les roches extraites, ce qui induit une augmentation des coûts de production et donc des prix.

Les gisements les plus concentrés ont sans doute été déjà découverts. Les gains technologiques et de productivité ont dans le passé pallié cette dilution mais seront plus contraints dans le futur d'une part par des limites physiques (en particulier la quantité minimale d'énergie nécessaire pour casser des oxydes, sulfures ou sulfates métalliques en métaux nécessaires pour la transition énergétique) et par l'accès à des sources d'énergie peu chère.

Les ENR et d'autres sources d'énergie pourront pallier la disponibilité de l'énergie, à des coûts acceptables. L'ajustement sur les quantités se fera via des mécanismes de prix : la hausse des prix favorisera le recyclage, évitera de gaspiller la ressource et incitera à l'usage de technologies (par ex low tech) moins gourmandes en minéraux.

La dépendance actuelle du pétrole, dont la ressource est concentrée dans quelques pays, ce qui est source de tensions géopolitiques, se reproduira probablement pour les minerais. La question de la nature des régimes qui concentrent actuellement la ressource, et de la tension induite avec les démocraties, est centrale.

Il faudra pour limiter les dépendances très probablement diversifier les approvisionnements, éviter le gaspillage et possiblement rouvrir des mines en Europe. La possibilité de pénurie générale des minerais avant la fin du siècle doit nous interpeller mais ce n'est pas une fatalité.

La disponibilité dépendra du prix des minerais que l'on est prêts à payer, puissant incitatif aux changements, des impacts écologiques et sociaux que l'on est prêt à accepter dans les pays producteurs, du prix de l'énergie et du volume de recyclage, tout comme des mesures de moindre recours à cette ressource que l'on mettra en œuvre. C'est sur ces aspects qu'il faut porter les réflexions et travaux au lieu de prédictions apocalyptiques pour le moins hasardeuses, qui ont souvent pour origine une conception malthusienne du monde et de ses dynamiques. ■



LA QUESTION DES MINÉRAIS POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Synthèse des travaux publiés d'Olivier Vidal

Olivier Vidal est directeur de recherche au CNRS, à l'Institut des Sciences de la Terre de Grenoble (ISTERRE).

Géologue de formation, il est spécialiste de la thermodynamique des réactions minéralogiques et ses recherches actuelles portent aujourd'hui sur la modélisation du lien entre énergie et matières premières dans le contexte de la transition énergétique. Il a été coordinateur scientifique du réseau européen ERA-MIN sur les matières premières non énergétiques pour l'industrie et coordonne le projet de recherche national «sous-sol bien commun» piloté par le CNRS et le BRGM.

Les lignes qui suivent tentent de faire la synthèse de ses travaux qu'il a présenté au think tank de l'URF en septembre 2023. Elles sont largement tirées des articles d'Olivier Vidal, « Ressources minérales, progrès technologique et Croissance » et « Impact de scénarios énergétique sur les matières premières et leur disponibilité futures¹ ».

DES RESSOURCES LIMITÉES DANS UN MONDE FINI ?

Chaque ressource possède sa propre temporalité contrainte par l'évolution de la demande et de la capacité de production. Toutes deux dépendent de nombreux paramètres, dont le développement technologique qui change les usages, les modes de production et d'éventuelle substitution, l'alternance des cycles économiques et géopolitiques, la variation de population et de son niveau de vie, l'évolution des réserves et des ressources géologiques, des capacités de recyclage, les temps administratifs et l'évolution de la réglementation, les impacts environnementaux, etc.

Tous ces paramètres varient au cours du temps, sont fortement couplés et ne peuvent pas être analysés séparément. C'est la raison pour laquelle **il n'existe pas de réponse simple et définitive à la question du futur des ressources minérales.**

La production de ressources minérales est très énergivore. Selon l'AIE, la production des métaux essentiels pèse aujourd'hui environ **12 % de la consommation mondiale d'énergie et environ 35 % de l'énergie consommée par l'industrie dans le monde.**



Par ailleurs, les réserves des métaux dépendent de leurs coûts de production qui eux-mêmes dépendent de l'énergie utilisée pour cette production. Cette énergie ainsi que le coût et le prix à long terme des métaux varient comme une loi puissance inverse de la concentration dans les minerais exploités. L'or, le palladium ou le

¹ - <http://journals.openedition.org/temporalites/5677> et <https://hal.science/hal-03426222/document>

platine, dilués à moins de 2 g par tonne de roche dans les gisements exploités, sont beaucoup plus énergivores à extraire que le fer, l'aluminium ou le manganèse qui sont concentrés de 30 à 50 %. Ainsi à **technologie constante**, la baisse observée de teneur au cours du temps des gisements est associée à une croissance exponentielle de l'énergie de production.

Cette observation est utilisée comme un argument par les adeptes d'une pénurie proche en métaux, dont l'extraction atteindrait rapidement un coût prohibitif, car la quantité d'énergie nécessaire deviendrait trop importante. Les données historiques de long terme ne soutiennent pas ce point. Elles montrent même une tendance inverse : les prix corrigés de l'inflation des matières premières ont baissé entre 1900 et 2000. Pendant cette période, **l'augmentation de l'énergie de production due à la chute de la teneur des minerais a été largement compensée par l'amélioration de l'efficacité énergétique et de la productivité, du fait de l'amélioration technologique.**

Pour l'acier, le cuivre et l'aluminium, cette amélioration a été de 1 à 2 % par an entre les années 1900 et 2000. Dans le cas du cuivre, elle a compensé l'augmentation énergétique due à la baisse de la teneur des gisements.

Ces chiffres indiquent que l'amélioration technologique ne peut pas être négligée dans la modélisation du futur des ressources. Elle explique pourquoi les quantités produites de métaux et leurs réserves ont toutes deux suivi une croissance exponentielle depuis 1900 jusqu'à aujourd'hui. Cet effet de l'amélioration technologique sur les coûts de production et le prix sont observés pour toutes les ressources, fossiles ou renouvelables. Il permet de remplacer les ressources de haute qualité épuisées par des ressources de moins bonne qualité, mais plus abondantes. **(FIG 1 – FIG 2 page 9).** Cette tendance est-elle pérenne ? La réponse est clairement non.

En effet, le gain en énergie pour une amélioration technologique à taux constant devient de plus en plus faible avec le temps, alors que la quantité d'énergie supplémentaire nécessaire pour extraire les métaux de gisements de moins en moins concentrés augmente. Il existe ainsi un point critique au-delà duquel le gain ne compense plus la perte, la production demandant de plus en plus d'énergie. Passé ce point, et à l'approche de la limite physique de seuil minimal d'énergie nécessaire pour casser des molécules des minéraux, une envolée des coûts de production, donc du prix, devient inévitable sauf recours à des sources d'énergie abondante et peu chère, comme les ENR. Avec l'accès à des sources d'énergie peu chères et abondantes, le poids croissant de l'intensité énergétique dans le coût de production ne serait alors plus un problème.

LE RECYCLAGE, UN APPORT CONSIDÉRABLE, QUI NE FERA PAS TOUT

Contrairement aux combustibles fossiles, les métaux primaires ne sont pas perdus lorsqu'ils sont utilisés et les produits métalliques fabriqués aujourd'hui constituent les réserves du recyclage de demain. Le recyclage est basé sur des flux plutôt que sur des stocks.



L'augmentation de la part du recyclage ne suffit donc pas pour répondre à la demande en période de croissance, car la quantité de métal disponible dans les produits en fin de vie produits il y a plusieurs décennies est inférieure à la demande, et parce qu'on ne

recycle qu'une partie de ce métal. Par ailleurs, le potentiel de recyclage est limité par la différence entre le prix des métaux primaires et le coût de leur recyclage.

Seuls les métaux présents à des concentrations suffisamment élevées dans les produits en fin de vie sont recyclés.

Cela explique pourquoi aujourd'hui la plupart des métaux rares utilisés dans les hautes technologies ne sont pas recyclés aujourd'hui. Une augmentation future des prix due à une raréfaction des réserves primaires favorisera le recyclage.

(FIG 3 page 9).

PLUTÔT QU'UNE PÉNURIE DES RESSOURCES, DES CHOIX ENTRE PRIX ET QUANTITÉS

Il est probable que la population mondiale se stabilise voire décroisse d'ici 2100. Avec une hypothèse du PIB moyen par habitant à 23 000 dollars 2023 /hab, le modèle développé par ISTERRE montre que le cuivre recyclé devient la source majeure au cours de la deuxième moitié du siècle.

Le même modèle, appliqué à d'autres métaux, suggère que l'offre de la plupart des métaux de base devrait satisfaire la demande jusqu'à la fin du siècle.

La situation est beaucoup moins claire pour les métaux rares, car les données historiques sur les réserves et la production manquent. C'est une des raisons pour laquelle les métaux rares utilisés dans les technologies de pointe sont considérés comme étant les plus critiques. Cette criticité est largement induite par l'usage de nouvelles technologies, qui pour bon nombre d'usages courants pourraient être remplacées par des technologies plus frustes et moins gourmandes en terres rares.

Sur d'autres matériaux, les prix sont des incitatifs à réduire les quantités. Ainsi le prix du cobalt, utilisé comme cathode dans les batteries à lithium-ion a fortement augmenté du fait d'une augmentation rapide de la consommation.

Ceci a poussé tous les grands industriels

concernés à trouver les solutions permettant de réduire ou de proscrire l'utilisation du cobalt dans les batteries lithium.

Dans le même temps, des solutions efficaces de recyclage sont développées.

GÉOPOLITIQUE DES MINÉRAIS

En 2018, La Chine a produit en moyenne 45% de l'aluminium, plomb, acier, cuivre, nickel, zinc et étain raffinés mondialement. L'Europe et les US ont consommé 14% et 8% de ces métaux raffinés, leur production domestique étant bien inférieure.

Cette position dominante de la Chine sur



les métaux de base lui donne un pouvoir très important de contrôle des prix et de l'approvisionnement et pose d'évidentes questions géopolitiques compte tenu de la nature du régime. Pour ces raisons, un rééquilibrage de la provenance des minerais de la transition énergétique va s'imposer pour les pays de l'OCDE, et l'Europe en particulier. Globalement la forte demande en minerais nécessitera l'ouverture de mines, ce qui pose la question de l'acceptabilité et de leur localisation². Il faudra très probablement ouvrir des mines également en Europe, ce qui nécessitera dans nos pays démocratiques des débats nationaux et locaux pour assurer l'acceptabilité.

(FIG 4-5 page 10). ■

2 - La principale mine de terres rares des années 80, située en Californie, a été abandonnée au profit d'importations depuis la Chine. L'Europe consomme 20 % des métaux produits dans le monde alors qu'elle en produit environ 3 %.

PA NO RA MAS

**RESSOURCES
ANNEXES**

FIG. 1

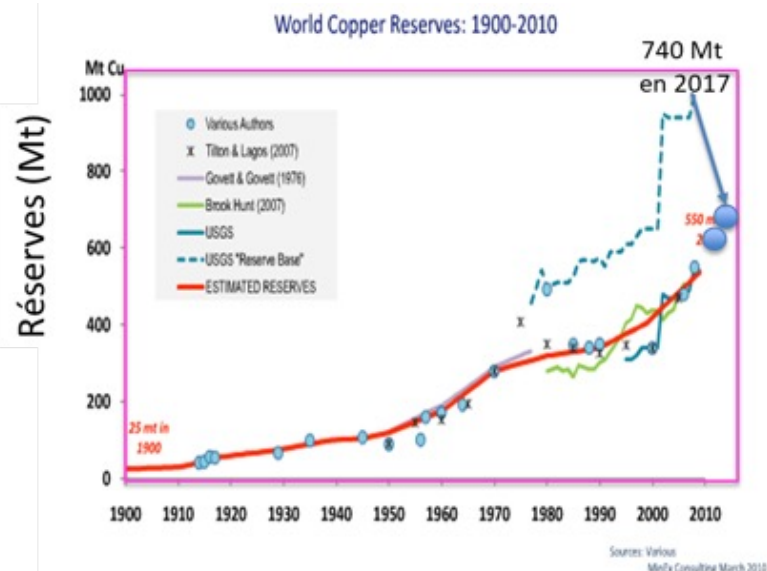


FIG. 2

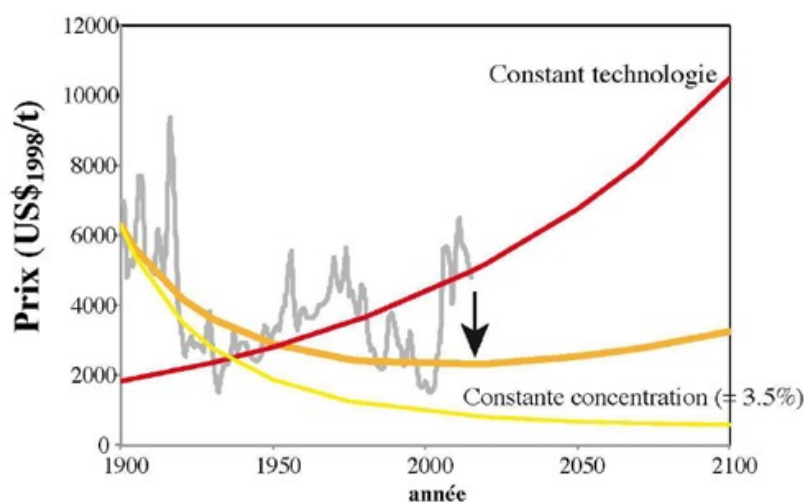
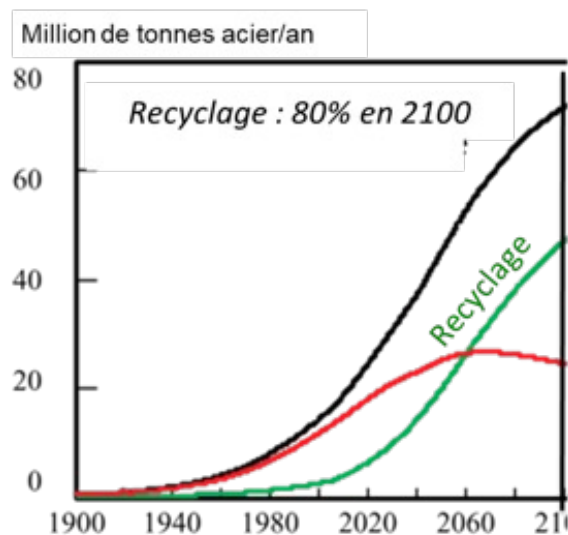


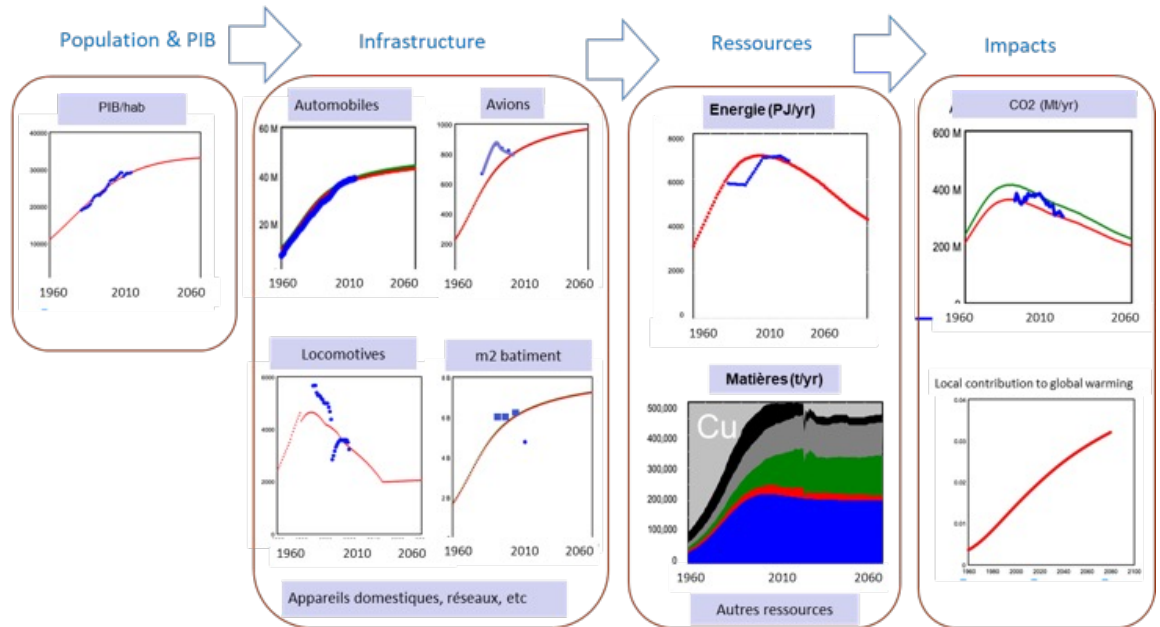
Fig. 2 : Gris : prix réel du cuivre en dollars constants ; rouge : prix calculé pour une technologie constante et une concentration en cuivre des gisements exploités diminuant à -1.125 % an ; jaune : prix calculé pour l'amélioration technologique observée (1 % an) à concentration constante ; orange : prix calculé pour les concentrations observées et une amélioration technologique de 1 % an. La flèche verticale indique le moment où l'amélioration technologique ne compense plus la baisse de concentration des gisements exploités. Après cette date, le prix long terme augmente.

FIG. 3



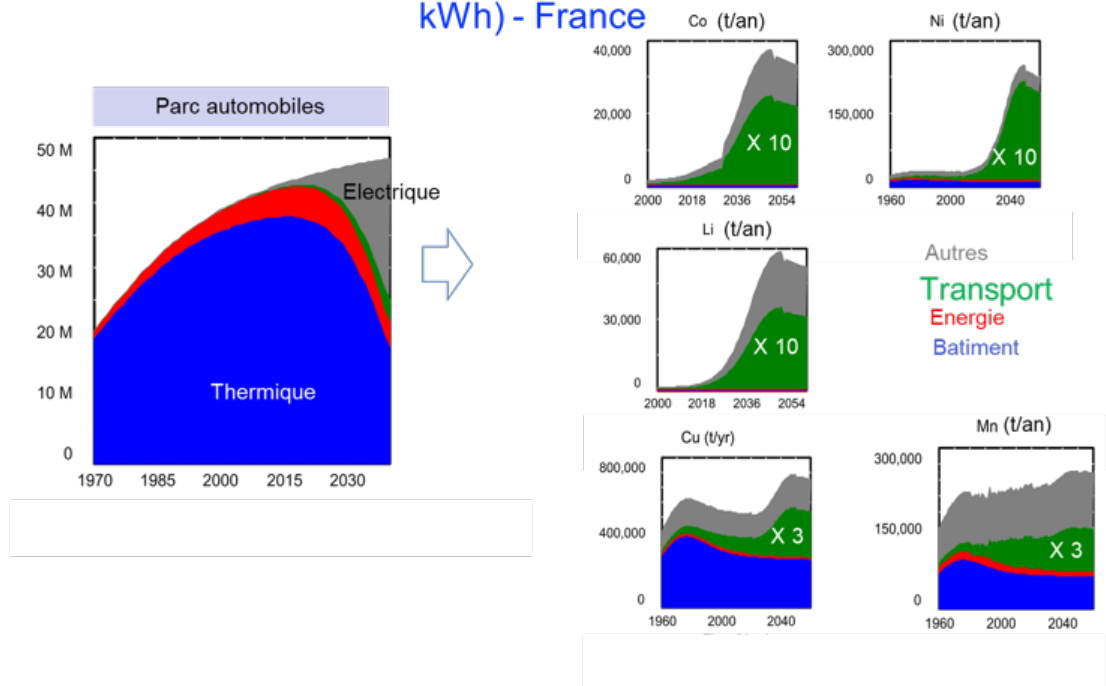
Evolution *tendancielle* de l'infrastructure - FRANCE

FIG. 4



Besoins matières pour les VE (Avec les technologies actuelles, 50 kWh) - France

FIG. 5



QUOI DE NEUF AU THINKTANK?

Le débat des experts de la mobilité



VOTRE PROCHAIN THINKTANK :
18 MAI 2024

**CONSULTER L'INTÉGRALITÉ
DES COMPTES RENDUS**



9, rue de Berri – 75008 Paris
01 44 13 37 17 – contact@unionroutiere.fr
www.unionroutiere.fr