

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Modélisation de l'impact d'une contrainte de ressources minérales sur les
sentiers de transition énergétique**

SIMON CHAZEL

Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Génie industriel

Juin 2020

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Modélisation de l'impact d'une contrainte de ressources minérales sur les
sentiers de transition énergétique**

présenté par **Simon CHAZEL**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Charles AUDET, président

Sophie BERNARD, membre et directrice de recherche

Hassan BENCHEKROUN, membre et codirecteur de recherche

Ngo Van LONG, membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier ma directrice et mon co-directeur de recherche Sophie et Hassan, pour vos éclairages, votre accompagnement, écoute et compréhension dans les moments difficiles. Un Grand Merci!

Félix, Simon et Ben, mes camarades de pause déjeuner, cafés et galères à l'université; et tous mes amis du Québec, pour tout, Merci!

Marie-Pierre, Christian, Jules et Simone, pour votre merveilleuse hospitalité, et sans qui la rédaction de ce mémoire aurait certainement encore pris beaucoup plus de temps, Merci!

Enfin, je remercie le Conseil de Recherche en Sciences Humaines du Canada (CRSH) pour son soutien financier.

RÉSUMÉ

A capacité équivalente, la production d'énergie décarbonée requière beaucoup plus d'apport de ressources minérales que la production d'énergies fossiles. La transition énergétique s'accompagne donc d'une explosion de la demande en ces ressources. Parmi elles, on trouve notamment des métaux rares, comme le néodyme, le gallium, l'indium ou des terres rares ; et des métaux structurels, comme le cuivre, l'aluminium ou le fer. Or certaines de ces ressources sont identifiées comme critiques par plusieurs institutions internationales, notamment la Banque Mondiale, le Programme Environnemental des Nations Unies et la Commission Européenne. En effet, la production pourrait ne pas suivre l'augmentation de la demande, à court terme (pour l'indium et les terres rares par exemple) ou long terme (pour le cuivre et l'aluminium). Parmi les causes de cette criticité soulignées dans la littérature, on retrouve, pour les métaux rares : la mauvaise répartition géographique des réserves et capacités de production qui rend l'approvisionnement dépendant du jeu géopolitique, les difficultés de recyclage inhérentes à leur usage, l'impact environnemental et les enjeux d'acceptation sociale dans un contexte de développement durable, leur statut de co-produit dans les mines qui les extraient, et l'épuisement des réserves. Cependant, le développement de technologies se passant de ces métaux ou utilisant des substituts semble envisageable, si bien que ces métaux sont moins critiques sur le long terme. Pour les métaux structurels, les restrictions de long terme à la production proviennent de l'épuisement des réserves, de l'impact environnemental des industries minières, des faibles perspectives de substituabilité, et du contexte de demande déjà fortement croissante avec le développement des pays du Sud. Il semble donc pertinent d'envisager que la production primaire d'au moins une de ces ressources clés de la transition énergétique puisse être limitée. Quel est l'impact de cette contrainte sur la transition énergétique ?

Le cuivre semble être une ressource indispensable et particulièrement à risque, même s'il est difficile d'estimer précisément à quelle échéance il pourrait venir à manquer. Nous choisissons donc le cuivre comme étude de cas pour notre modélisation, et nous étudions plusieurs scénarios de contrainte sur la production de ce métal. Nous modifions un modèle d'équilibre général dynamique souvent cité (Golosov et al., 2014) qui ne tient pas compte de l'enjeu des ressources minérales dans la transition énergétique, pour ajouter à la fonction de production de la filière d'énergie décarbonée un facteur « capital vert », construit à base de métaux. Ainsi, la production d'énergie décarbonée requière bien un apport de métaux (primaire ou recyclé), et les stocks de métaux primaires et secondaires évoluent selon les

rythmes de production.

Nous observons que le stock de métal primaire diminue au fur et à mesure de l'extraction, et le stock de métal secondaire, qui constitue un réservoir pour le recyclage, augmente. Le métal recyclé se substitue peu à peu au métal primaire dans la constitution du capital vert. Grâce à cette substitution, l'épuisement du stock de minéral primaire impacte peu la production d'énergie décarbonée dans un premier temps. Cependant, une fois que le recyclage fonctionne à pleine capacité, c'est-à-dire lorsque la totalité du stock de minéral secondaire est recyclé à chaque période, la production totale de métal ne peut plus augmenter. La quantité de capital vert atteint alors sa valeur maximale, et le taux de croissance de la production d'énergie décarbonée chute. Finalement, malgré le progrès continu de la productivité du travail, la contrainte sur les ressources minérales entraîne un plafonnement de la production d'énergie décarbonée. La chronologie de ces différentes étapes dépend du scénario de contrainte minérale considéré.

La contrainte minérale a donc un impact significatif sur la modélisation des sentiers de la transition énergétique. Dans quatre des six scénarios que nous considérons, elle entraîne une diminution de 50% de la production d'énergie décarbonnée par rapport au scénario non-contraint étudié par Golosov et al. (2014) avant 120 ans. Dans les deux pires scénarios, la production d'énergie décarbonnée stagne dès 60 à 80 ans. Cependant, en raison du paramètre de substituabilité négatif entre les différentes sources d'énergie (issu du modèle de référence de Golosov et al., 2014), cette limitation impacte peu les sentiers d'extraction de combustible fossile. Nous recommandons donc pour de futures recherches d'affiner le modèle en envisageant que ce paramètre de substitution puisse varier, afin de mieux évaluer l'impact de la contrainte minérale sur les sentiers d'extraction de carburants fossiles. Nous soulignons enfin que notre modèle ne tient pas compte des enjeux géopolitiques liés à la distribution inégale de ces ressources minérales stratégiques.

ABSTRACT

For an equivalent production capacity, low-carbon energy production is much more mineral intensive than fossil energy production. Therefore, energy transition implies a booming in mineral resources demand. Those strategic resources can be divided into rare metals, such as neodymium, gallium, indium and rare earth elements; and base metals, such as copper, aluminium and iron. But some of those are identified as critical by many international institutions, amongst which the World Bank, the United Nations Environmental Program and the European Commission. Indeed, production may not be able to match the forecasted booming demand, either in the short run (for indium, rare earth elements, and some other rare metals) or in the long run (for copper or aluminium). For rare metals, this criticality is the consequence of : a bad reserves distribution amongst countries which makes supply depends on geopolitics, many recycling limits that are inherent to the use made of those metals, environmental impact and social acceptance of the mining industry in a sustainable development context, those metals being only co-products, and resource exhaustion. However, technologies that do not use rare metals, or substitutes instead, are being developed, so that rare metals seem less critical in the long run. Base metals long term supply concerns typically come from resource exhaustion risks, environmental impact of mining industry, low substitutability perspectives, and production being cornered by emerging countries' industrialisation. In the end, it is relevant to consider than the supply of at least one of those strategic resource could face limitations. What would be the impact of such constraint on energy transition ?

Copper is both essential to energy transition and especially critical, even if there are many uncertainties on the date when supply could lack. Therefore, we use copper as a study case for our modelisation. We consider many supply constraint scenarios. We modify Golosov et al. (2014) dynamic general equilibrium model, that simulates energy transition paths but without taking into account any mineral constraint. We add a "green capital" factor to the low-carbon energy production function, in order to link low-carbon energy production to metal supply. Therefore, building and maintaining production capacities requires a mineral supply, which is eventually limited when mineral reserves declines.

We observe the variations of primary and secondary metals stocks. Recycled (secondary) metal gradually substitutes to primary metal in green capital manufacturing. Thanks to this substitution, primary mineral stock exhaustion has a limited impact on low-carbon energy

production at first. However, once mineral recycling reaches its maximum, which is when all secondary mineral stock gets recycled at each period, total metal production peaks. Green capital has then reached its maximum value, and low-carbon energy production growth rate starts to decline. In the end, in spite of continuous labour productivity gains, low-carbon energy production reaches a plateau. The timing of those events depend on the mineral constraint scenario considered.

Therefore, mineral resources limitations significantly impacts the energy transition optimal paths. In four of the six scenario we considered, the mineral constraint lowers green energy production by more than 50% in the next 12 decades, compared to the unconstrained scenario assumed by Golosov et al. (2014). In the two worst scenarios, low-carbon energy production reaches a plateau in 6 and 8 decades. However, because of the negative interfuel substitution parameter (inherited from Golosov et al., (2014) calibration), this limitation has a marginal impact on fossil fuel extraction paths. We recommend for future work allowing this parameter to vary over the course of a simulation, in order to better reflect the process of energy transition. We also highlight that our model does not consider the geopolitical mechanisms that could play a huge role in the supply of the strategic mineral resources for energy transition.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIÈRES	viii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Contexte général	1
1.2 Revue de littérature	1
1.2.1 Les filières de production d'énergies décarbonées	1
1.2.2 Scénarios prospectifs de développement des filières de production d'énergie décarbonée	2
1.2.3 Comparaison de l'intensité matérielle des diverses sources d'énergie	3
1.2.4 Les technologies d'un futur durable	4
1.2.5 Estimation des besoins en métaux pour la réalisation de la transition énergétique	4
1.2.6 Evaluation de la capacité de réponse de la production à l'explosion de la demande	5
1.2.7 Dans la modélisation en économie environnementale	7
1.3 Enjeu et objectifs	7
CHAPITRE 2 DÉMARCHE GÉNÉRALE	9
CHAPITRE 3 ARTICLE 1: A MODELLING OF THE IMPACT OF MINERAL CONSTRAINTSON ENERGY TRANSITION	10
3.1 Abstract	10
3.2 Introduction	11
3.3 The model	13

3.3.1	Equations	13
3.3.2	Optimisation problem	16
3.4	Analytical Results	16
3.4.1	Lagrangian	16
3.4.2	Labour distribution in optimal paths	17
3.4.3	Stock resources scarcity rent variation in optimal paths	19
3.4.4	Relationship to the benchmark model (GHKT)	19
3.5	Simulation	21
3.5.1	Method	21
3.5.2	Calibration	22
3.6	Results	23
3.6.1	Matching GHKT and the infinite mineral scenario	23
3.6.2	Low-carbon energy production	24
3.6.3	Primary and secondary copper production	25
3.6.4	Green capital recycled mineral content	25
3.6.5	Labour and green capital inputs to low-carbon energy production	27
3.6.6	Key dates in each scenario	28
3.6.7	Impact on GDP and optimal carbon tax	30
3.7	Robustness check : taking into account the diversity of low-carbon energy sources	31
3.8	Conclusion	32
3.9	Appendix	34
3.9.1	Calibration	34
3.9.2	Proof of Proposition 1	37
3.9.3	Proof of Proposition 2	38
3.9.4	Proof of Proposition 3	41
CHAPITRE 4 DISCUSSION GÉNÉRALE		45
CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		47
5.1	Synthèse des travaux	47
5.2	Limites	48
5.3	Recommandations	49
RÉFÉRENCES		50

LISTE DES TABLEAUX

Table 3.1	Parameter selection	23
Table 3.2	Dates of key events in each scenarios	30
Table 3.3	Calibration summary	35

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Répartition de la production d'énergie décarbonée par source (2019). Source : BP Statistical Review of World Energy (2019) [3]	2
Figure 1.2	Taux de croissance annuel prospectif de la production d'énergie décarbonée par filière sur la période 2000-2040. Source : BP Energy Outlook (2019) [2]	3
Figure 3.1	Comparison of low-carbon energy production in GHKT and our model's infinite mineral scenario	24
Figure 3.2	Low-carbon energy production in various mineral stock scenario . . .	26
Figure 3.3	Decennial primary copper extraction m_p , and copper recycling rate paths in all scenarios	27
Figure 3.4	Share of recycled copper in green capital	28
Figure 3.5	Green capital and labour inputs to low-carbon energy production, for a mineral constraint $M_{p,t=0} = 1000$ MtCu	29
Figure 3.6	Comparison of GDP with the infinite mineral scenario for various mineral constraints	31
Figure 3.7	Comparison of low-carbon energy production paths for various values of nuclear and hydroelectricity production	33

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AEI	Agence Internationale de l'Énergie
BP	British Petroleum
CES	Constant Elasticity of Substitution
GHKT	Golosov, Hassler, Krussel, Tsyvinski (2014)
Gtoe	gigatonne of oil equivalent
MtCu	megatonne of copper
USGS	United States Geological Survey

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte général

Les effets néfastes des émissions de dioxyde de carbone sur l'environnement et la société ont été documentés depuis plusieurs décennies. La nécessité d'une transition énergétique depuis les énergies fossiles fortement carbonées, vers des sources d'énergies décarbonées fait désormais consensus. Les gouvernements et institutions internationales, ainsi que de nombreux domaines de la recherche, s'attachent à mettre en oeuvre une telle transition.

Parmi les diverses sources d'énergies décarbonées, l'énergie solaire et éoliennes sont amenées à jouer un rôle particulièrement important dans la transition énergétique. Or, ces deux filières de production d'énergies sont significativement plus intensives en ressources minérales (notamment en métaux rares et métaux structurels) que les filières de production d'énergie fossile. La transition énergétique devrait donc s'accompagner d'un accroissement significatif de la demande en ces ressources.

Or, leur épuisement potentiel, leur mauvaise répartition géographique qui les rend dépendant du jeu géopolitique, et l'impact environnemental élevé des industries minières, amènent à envisager que la production de ces ressources puisse être limitée, de manière choisie ou subie.

Dans ce contexte, ce mémoire s'attache à modéliser les flux de ressources minérale induits par la transition énergétique, et à évaluer l'impact d'une limitation de l'approvisionnement en ressource minérale sur la transition énergétique.

1.2 Revue de littérature

1.2.1 Les filières de production d'énergies décarbonées

Parmi les énergies décarbonées, c'est à dire celles dont le processus de production est faiblement émetteur de dioxyde de carbone, on trouve l'énergie nucléaire, l'hydroélectricité, l'éolien, le solaire, la biomasse (bois, biocarburants...), et la géothermie. Si le nucléaire est une source d'énergie décarbonée, il est à souligner que ce n'est pas une source d'énergie renouvelable. Dans la palette énergétique actuelle, le nucléaire et l'hydroélectricité sont les

filères majeures de la production d'énergie décarbonée. Ainsi, la production annuelle totale de ces deux filères est 3.7 fois plus élevée que celle des filères solaires et éoliennes combinées (figure 1.1).

RÉPARTITION DE LA PRODUCTION D'ÉNERGIE DÉCARBONÉE PAR SOURCE

■ Hydroelectricité ■ Nucléaire ■ Éolien ■ Solaire ■ Géothermique & Biomasse

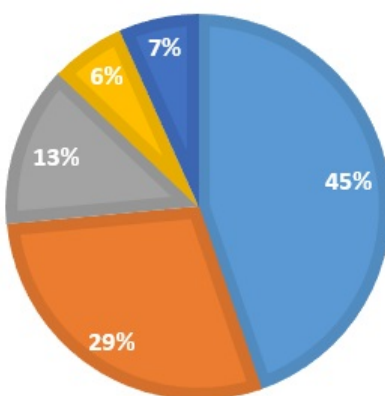


Figure 1.1 Répartition de la production d'énergie décarbonée par source (2019). Source : BP Statistical Review of World Energy (2019) [3]

1.2.2 Scénarios prospectifs de développement des filères de production d'énergie décarbonée

Dans les scénarios prospectifs de transition énergétique, la croissance de la production d'énergie décarbonée provient principalement des filères solaires et éoliennes, bien qu'elles soient encore minoritaires aujourd'hui. Par exemple, le scénario de transition énergétique édité par British Petroleum mise sur une multiplication par 20 de la production d'énergie annuelle de ces deux filères entre 2010 et 2040. Si le nucléaire et l'hydroélectricité progressent aussi (la production annuelle combinée de ces deux filères serait multipliée par 1.45 entre 2010 et 2040), les taux de croissance sont bien moindre que pour le solaire et l'éolien. Sur la période 2030-2040, ces filères ne progressent plus que de 0.5% par an, alors que dans le même temps, le taux de croissance de l'éolien et du solaire serait de 5.4% par an (figure 1.2).

Ainsi, si les filères solaires et éoliennes ne représentent en 2020 qu'une part minoritaire de la production d'énergie décarbonée, elles devraient croître très rapidement et devenir majoritaires dès 2035. Sur le long terme, ce sont les deux filères clés de la production d'énergie

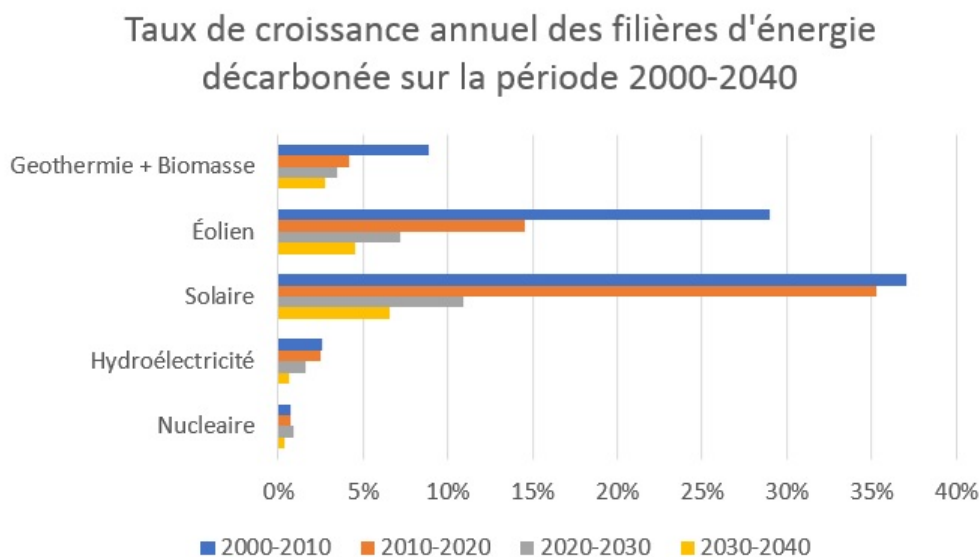


Figure 1.2 Taux de croissance annuel prospectif de la production d'énergie décarbonée par filière sur la période 2000-2040. Source : BP Energy Outlook (2019) [2]

décarbonée, et donc de la transition énergétique.

Or, ces deux filières consomment de grandes quantités de métaux rares, comme le néodyme, le terbium, ou le dysprosium, qui sont des ressources clés pour la fabrication de certains types d'éoliennes ; ou l'indium, le tellurium, le germanium, pour les panneaux photovoltaïques. Elles consomment également de grandes quantités de métaux structurels pour la construction des infrastructures nécessaires à la captation des flux d'énergie éolien et solaire, comme l'acier, le fer, le cuivre ou l'aluminium.

1.2.3 Comparaison de l'intensité matérielle des diverses sources d'énergie

Dans une méta-étude qui compare les analyses de cycle de vie des différentes sources d'énergie en distinguant au sein de chaque filière plusieurs types de technologie (par exemple les éoliennes en mer des éoliennes sur terre), Hertwich et al. (2015) montrent que la production d'énergie éolienne et solaire est 11 à 40 fois plus intensive en cuivre et 6 à 14 fois plus intensive en fer que la production d'énergie à partir de combustibles fossiles [12].

Vidal et al. (2013) estiment que la production d'énergie éolienne et solaire est 15 fois plus intensive en béton, 90 fois plus intensive en aluminium, et 50 fois plus intensive en cuivre et fer [29].

Il est à noter que la diversité des technologies au sein de chaque filière rend difficile ce processus d'estimation, et explique les différences entre les études citées précédemment. Ainsi, plusieurs types d'éoliennes, de panneaux solaires, de batteries coexistent, et tous ne requièrent pas pour leur fabrication les mêmes métaux, ou en même quantité. Par exemple, la structure des éoliennes en mer est différente de celle des éoliennes sur terre, et l'accès difficile à de tels types d'éoliennes amène souvent à privilégier des technologies nécessitant peu de maintenance. Pour une capacité installée équivalente, l'apport en ressource minérale pour la construction d'un champ d'éoliennes en mer est ainsi bien différent de celui pour un champ d'éoliennes sur terre.

1.2.4 Les technologies d'un futur durable

La transition énergétique n'implique pas seulement le développement des filières solaire et éolienne, mais également l'adaptation de l'ensemble des infrastructures en réponse à ce nouveau mix énergétique. En particulier, le développement massif des technologies de stockage d'électricité doit permettre de pallier à l'intermittence de ces sources d'énergie. L'électrification du secteur des transports et le développement de technologies de gestion de l'énergie à l'échelle des villes font aussi partie des infrastructures amenées à se développer largement. De manière générale, toutes ces technologies, identifiées par l'UNEP comme "Future Sustainable Technologies" (Technologies d'un futur durable) sont particulièrement intensives en ressources minérales, parmi lesquelles des métaux rares, des métaux structurels ou encore du béton et du ciment [25].

1.2.5 Estimation des besoins en métaux pour la réalisation de la transition énergétique

L'estimation des besoins en ressources minérales nécessaires à la transition énergétiques, ainsi que des disponibilités de ces ressources, relève du domaine de la recherche prospective, puisque cela dépend des scénarios d'évolution de mix énergétiques retenus, d'hypothèses sur le développement des technologies au sein de chaque filière énergétique, etc... Cette section présente et compare ces différentes estimations.

Un rapport publiée par la Banque Mondiale en 2017 souligne le rôle central des ressources minérales dans l'accomplissement de la transition énergétique, ainsi que le manque général de prise en compte de cet enjeu dans la modélisation. Cette étude se focalise sur les ressources mobilisées par trois secteurs clés de la transition énergétique : la production d'énergie éolienne, solaire, et les batteries électriques. Elle propose une estimation des quantités de métaux requis

par ces secteurs dans trois scénarios de transition énergétique de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), permettant de contenir le réchauffement climatique à 2, 4 et 6 degrés celsius. Dans chaque secteur, plusieurs types de technologies sont en compétition (éoliennes en mer ou sur terre, batteries au lithium ou au plomb, etc...), requérant à chaque fois des métaux différents. Les estimations sont donc basées sur des hypothèses de développement de chacune de ces technologies. La Banque Mondiale estime que les secteurs éolien, solaire, et des batteries requerront 80Mt d'aluminium, 20Mt de cuivre, 20Mt de lithium, 25000t d'indium sur la période 2013-2050, dans le scénario permettant de limiter le réchauffement climatique à 2 degrés celsius. Cela correspond à 1.5 fois la production annuelle mondiale d'aluminium, 1 fois celle de cuivre, 260 fois celle de lithium, 33 fois celle d'indium. Il est à noter que si la production de lithium (et dans une moindre mesure, celle d'indium) est déjà en grande partie dédiée à ces trois industries, la production des métaux structurels comme l'aluminium ou le cuivre, est elle destinée également à beaucoup d'autres industries (bâtiments, travaux publics...). Ainsi, même si la quantité requise par ces trois industries de métaux structurels est du même ordre que la production annuelle de ces métaux, la compétition existante entre les divers usages de ces métaux rend significatif cette augmentation de la demande.

Vidal, Goffé et Arndt (2013) estiment que le scénario de transition énergétique du World Wide Fund for Nature (WWF) requière 310Mt d'aluminium et 40Mt de cuivre, soit de 2 à 4 fois plus que l'estimation de la Banque Mondiale. Ils soulignent que l'industrialisation en cours de nombreuses régions du monde entraîne déjà une augmentation de 5% par an de la demande pour ces métaux structurels. Dans ce contexte où la production de ces métaux explose déjà, ils s'inquiètent donc de la demande supplémentaire à venir due à transition énergétique, qui pourrait venir ajouter encore 5 à 18% de croissance annuelle de la demande.

Garcia-Olivares et al. (2012) cherche à estimer les besoins en ressources minérales d'un mix énergétique décarboné. Cette étude élargit l'étendue des technologies considérées, en prenant en compte non seulement la production et le stockage de l'énergie, mais également la distribution et l'électrification du secteur des transports. Au total, une société décarbonée nécessiterait 330Mt de cuivre, soit encore 8 fois plus que l'estimation précédente.

1.2.6 Evaluation de la capacité de réponse de la production à l'explosion de la demande

Pour chaque métal, la production totale est la somme de la production de la filière d'extraction primaire et de la filière de recyclage.

Métaux rares Il existe une grande diversité de métaux rares (néodyme, indium, tellurium, terres rares...) utilisés par les industries liées à la transition énergétique. Les filières de production primaire et de recyclage de chacun d'entre eux présentent des caractéristiques différentes. Une étude du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) évalue la criticité de 26 de ces métaux [25]. Malgré la disparité des situations d'un métal à l'autre, certaines caractéristiques sont récurrentes. Ainsi, ces métaux ont un taux de recyclage faible, avec peu de perspectives d'évolution rapide, notamment en raison de la complexité technologique des produits dont ils font partie. Par exemple, le taux de recyclage en fin de vie des terres rares est inférieur à 1% [26]. Ensuite, la production primaire de ces métaux est généralement inégalement répartie géographiquement : la Chine produit par exemple 84% des terres rares, ce qui induit un risque géopolitique majeur, comme identifié par la Commission Européenne [7, 8] ou le Département de l'Énergie des États-Unis [27]. Enfin, certains métaux rares ne sont pas les produits principaux des mines qui les extraient, si bien que leur rythme de production dépend du rythme de production du métal principal de la mine. C'est par exemple le cas de l'indium, utilisé dans certains types de cellules photovoltaïques, qui est un co-produit des mines de zinc. En conséquence, la production d'indium se trouve découplée de la demande d'indium, et une explosion de la demande d'indium n'entraîne pas immédiatement une hausse de la production. Ces différents points, dans un contexte d'explosion de la demande, amènent le PNUE à identifier comme critique à court terme plusieurs de ces métaux indispensables à la transition énergétique. Pitron (2018) souligne également l'impact environnemental majeur de la production de ces métaux essentiels à la transition énergétique. Vidal (2013) estime cependant que si les métaux rares sont critiques à court terme, le développement d'infrastructures de production dans d'autres régions du monde et le fort potentiel de substituabilité de ces métaux les rend moins critiques sur le long terme.

Métaux structurels A l'inverse, les métaux structurels sont typiquement bien recyclés. Par exemple, en 2018, 20% de la production totale de cuivre provient de la filière du recyclage [13]. Pourtant, Vidal et al. (2017) estiment que ces métaux sont davantage critiques sur le long terme. En effet, contrairement aux métaux rares, il est peu probable que des substituts émergent. Or, la demande est déjà en forte croissance en raison de l'industrialisation actuelle et à venir de nombreuses régions du monde : elle double tous les 15 ans pour l'aluminium, tous les 25 ans pour le cuivre. Vidal et al. (2017) souligne également que le fort coût environnemental des industries minières constitue une limitation potentielle sur la production primaire de métaux de base. Ces métaux sont bien plus abondants que les métaux rares en valeur absolue, mais certains sont tout de même critiques au regard des rythmes de production. En particulier, les réserves actuelles de zinc et de cuivre viendraient à être

épuisées en 20 et 40 ans au rythme de production actuel. Les réserves de ressources évoluent rapidement grâce au progrès technologique qui rend économiquement viable l'extraction de nouveaux gisements, si bien qu'un épuisement des ressources à cette échéance est peu probable, mais la disponibilité sur le long terme de ces métaux reste incertaine, et débattue dans la littérature scientifique.

1.2.7 Dans la modélisation en économie environnementale

Golosov et al. (2014) propose un modèle d'équilibre général prenant en compte les dommages dus aux émissions de CO₂. Cette modélisation permet de simuler les sentiers optimaux de la taxe carbone, ainsi que de la production d'énergie pour diverses sources (fossiles et décarbonés) [11]. Il ne prend cependant pas en compte la différence d'intensité matérielle de ces diverses sources d'énergie.

Fabre, Fodha et Ricci (2020) introduisent dans leur modélisation le concept de « capital vert », constitué de ressources minérales disponibles en quantité limitée, comme facteur de production d'énergie décarbonée [9]. Mais ce n'est pas un modèle d'équilibre général.

La discussion reste succincte dans cette section car elle est reprise plus en détail dans le chapitre 3.

1.3 Enjeu et objectifs

Si l'estimation précise des besoins en ressources minérales pour la transition énergétique est difficile, toutes les études soulignent l'intensité matérielle des « technologies d'un futur durable » (PNUE, 2013), tant au niveau des métaux rares que des métaux structurels. Les métaux rares sont davantage critiques sur le court terme, en raison de leur faible recyclabilité, de leur statut de coproduit dans les mines, de la mauvaise répartition géographique de la production. Mais leur potentiel de substituabilité pourrait les rendre moins critiques sur le long terme. Les métaux structurels sont plus abondants, mais la multiplicité des usages et en particulier le contexte de l'industrialisation de nombreuses régions du monde, et leur faible substituabilité pose question. Si la question de la possibilité de leur épuisement fait l'objet de débats, l'impact environnemental des industries minières pourrait constituer une limite encore plus forte sur la production de ces métaux. Cependant, et contrairement aux métaux rares, les métaux structurels sont recyclables, et l'impact environnemental de la production de métaux recyclés est bien moindre que celui de la production primaire.

L'objectif principal de ce mémoire est donc d'étudier l'impact d'une contrainte de production de ressource minérale primaire sur la transition énergétique. Pour cela, nous proposons

d'une part, de simuler les sentiers optimaux de transition énergétique en présence d'une telle contrainte, et en particulier :

- le sentier de production d'énergie décarbonnée
- le sentier d'extraction primaire de ces métaux en réponse à l'augmentation de la demande
- le sentier optimal du recyclage de ces métaux

D'autre part, nous mettrons en évidence les modifications induites par cette contrainte, en comparant les sentiers optimaux de transition énergétique sous la contrainte de ressource minérale avec ceux calculés par le même modèle en l'absence de contrainte.

CHAPITRE 2 DÉMARCHE GÉNÉRALE

Ce chapitre précise la méthodologie employée afin de répondre aux objectifs de recherche.

Nous choisissons de modifier un modèle d'équilibre général dynamique existant afin d'y ajouter la dimension des ressources minérales. Le modèle proposé par Golosov et al. (2014) tient compte des dommages environnementaux liés à l'utilisation d'énergie fossile. Les auteurs proposent une taxe carbone, dont ils donnent une formule simple, qui permet d'internaliser ces dommages environnementaux dans la production d'énergie fossile, et donc de diminuer celle-ci afin de trouver un meilleur compromis entre production de biens et limitation des dommages environnementaux. Ainsi, ce modèle propose des sentiers optimaux de transition énergétique. Cependant, il ne prend pas en compte l'apport en ressource minérale nécessaire à la production d'énergie décarbonée, et suppose que celle-ci ne requière qu'un facteur de production « travail ».

Nous proposons donc de modifier la fonction de production d'énergie décarbonée du modèle de Golosov et al. (2014) afin d'y inclure un facteur de production « capital vert », constitué de ressources minérales. Ainsi, un apport de ressource minérale (primaire ou recyclée), permettant de construire les technologies et infrastructures appropriées (le capital vert), doit précéder la production d'énergie décarbonée. Plusieurs niveaux de contraintes sur la production de ressources minérales primaires peuvent être testés, depuis l'absence totale de contrainte, jusqu'à une contrainte forte avec un stock total de ressources minérales primaires à extraire limité à un niveau choisi.

Il s'agit alors de déterminer l'ensemble de sentiers qui permet de maximiser l'utilité totale, sous la contrainte de ressource minérale considérée. Nous pourrons ensuite comparer les sentiers optimaux en présence et en absence de contrainte. L'article présenté au chapitre 3 parcourt ces différentes étapes afin de répondre aux objectifs de recherche.

CHAPITRE 3 ARTICLE 1: A MODELLING OF THE IMPACT OF MINERAL CONSTRAINTS ON ENERGY TRANSITION

Simon Chazel, Sophie Bernard, Hassan Benchekroun (2020). A Modelling of the Impact of Mineral Constraints on Energy Transition. Article accepté pour le Congrès 2020 de la Société Canadienne de Sciences Économiques.

3.1 Abstract

According to the International Energy Agency (IEA), total renewable energy production has to grow by 7% annually to meet its sustainable development scenario level by 2030. But low-carbon energies are notably more mineral intensive than fossil fuels, so that the energy transition will lead to a booming in the demand for both rare metals, such as neodymium, indium, rare earth elements, and base metals, such as copper, aluminium, iron... However, the decline of mine deposits ore grades tends to increase primary mineral extraction cost and environmental damages. Many public actors, such as the United Nation Environmental Program (UNEP), the World Bank, the European Commission and the US Department of Energy express concerns over the capacity of those metal supply to match a booming demand, either because of scarcity or induced environmental damages. What are the consequences of a primary mineral constraint on the energy transition ? We model the mineral flows induced by an energy transition benchmark model (Golosov et al., 2014 [11]), for various scenarios of mineral constraints. In all our scenarios, the mineral constraint limits the development of green energy in the long run. More specifically, our simulations show two distinct phases in low-carbon energy production. At first, primary mineral is abundant, mineral recycling is low, and green energy production growth is accomplished with primary mineral extraction : the impact of the mineral constraint is negligible. In a second phase, primary mineral is scarce, mineral recycling is at its maximum, and low-carbon energy production has reached a plateau. Our simulations show the transition paths between those phases. We find that after the primary mineral extraction peak, mineral recycling delays by 40-60 years the plateau of green capital. In the following decades, green energy production gradually departs from the infinite mineral scenario, in spite of continuous labour productivity gains. Thus, 5-6 decades later, green energy production is 50% lower than in the benchmark model. GDP is 3-8% lower than in the infinite mineral scenario after 30 decades.

3.2 Introduction

The necessity of an energy transition toward low-carbon energy has already been widely documented. But many actors state that low-carbon energies are more material intensive than fossil energies, so that the energy transition requires huge amounts of raw materials¹.

As every other high technologies, low-carbon energy production needs large quantities of specialty metals, such as rare earths (e.g. neodymium, terbium and dysprosium), which are key components of wind turbines, or indium, tellurium and germanium, for solar photovoltaics. The World Bank (2017) [1] estimate that the energy transition would require, in a 2 degree temperature increase scenario, a cumulative demand of 140,000t of neodymium (20 times 2018's production), 20Mt of lithium (24 times 2018's production), 25,000t of indium (33 times 2018's production) for the period 2013-2050. Those rare metals typically have low recycling potential, and are often only by-products of another mine product (e.g. indium is a by-product of zinc) so that its production level can not be chosen freely. The production is concentrated in a few countries (notably, China produces 49% of indium worldwide, and 85% of Rare Earth Elements) which creates a geopolitical risk on supply. The combination of those supply risks, recycling limitations and booming demand has lead the United Nations Environmental Program to declare some of those rare metals critical on the short term [25]. The US Department of Energy (2011) and the European commission (2017, 2018) have also expressed concerns over those metals [7, 8, 27]. However, Vidal et al. (2013) [29] argue that rare metals have a high potential for substitution which makes them less critical in the long run. Beyond the discussion on availability, there are also some concerns on the environmental implications of a booming of rare metals production [22].

Low-carbon energy production also requires large infrastructures that are made of huge quantities of base metals. Vidal et al. (2013) [29] estimate that “for an equivalent installed capacity, solar and wind facilities require up to [...] 90 times more aluminium, and 50 times more iron, copper and glass than fossil fuels or nuclear energy”. Focusing on copper, Hertwich et al. (2015) [12] show that wind and solar energy production technologies are 8 times more copper intensive than coal and oil energy production. Vidal et al. (2013) [29] estimate that the World Wide Fund for Nature (WWF) energy transition scenario requires 40Mt of copper (2 times current annual production) and 310Mt of aluminium (almost 5 times current annual production), which is considerable since renewable energy infrastructures is only a small fraction of those metal use worldwide. Vidal et al. (2017) [30] highlight that those metals

1. See, for instance, [1, 7, 8, 25, 27]

production is already highly solicited by many country's current industrialization, and that an energy transition could increase this demand growth to critical levels.

Unfortunately, environmental damages of metal mining are substantial, and increase over time when mine depths increases and deposits ore grade declines [14,21]). Hence, although there is no consensus on the probability of base metals peak production due to resource exhaustion in the next centuries², the aim of a circular economy (100% of green capital input coming from recycled mineral) implies to limit primary resource mining to a certain level. If a primary production peak does not happen due to resource exhaustion, growing environmental constraints call for a decline of primary resource production.

Contrary to rare metals, base metals have a very high recycling potential, and recycling industry are already developed and cost efficient. For example, recycled copper has the exact same physical properties and value than primary copper, and one fifth of world copper production already comes from recycling. Metal recycling is also in general 50-90% more energy-efficient than primary production. However, secondary mineral production is limited by the total amount of mineral that has first been mined, so that recycling in itself can not sustain a growing demand. Even with high recycling potential, we rely on primary mineral production to match the booming demand for minerals.

In this paper, we model the impact of limited mineral availability on energy transition. As a benchmark, we use the model of Golosov, Hassler, Krussel and Tsyvinski (2014) [11], called GHKT hereafter. In GHKT, carbon-free energy production only depends on labor inputs, resulting in the implicit assumption of an unconstrained access to mineral resources. We show that a limited access to mineral resources may affect GHKT core results on the energy transition. Therefore, under the conditions described above on the availability, the substitutability, and the recyclability of resources, we construct various scenarios of mineral constraints that we calibrate with copper's specifications as a representative case study. In all scenarios, we find that the mineral constraint limits the development of green energy, which stagnates in the long run. Our simulations also suggest a mineral transition, from primary extraction to recycling in green capital constitution. Mineral recycling delays by 40-60 years the green capital plateau. In the following decades, labour productivity gains compensate this plateau, but green energy production growth rate drops. After 6-8 decades, green energy production reaches a peak.

2. See, for instance, [19,21,23] for the discussion on this topic.

Section 3.3 sets the GHKT benchmark model, our contributions, as well as the optimization model. Section 3.4 shows the analytical results. In section 3.5, we describe the simulation method and the model's calibration. In section 3.6, a series of six specific results are shown and explained. Section 3.7 explores a slightly different low-carbon energy production function. Section 3.8 concludes.

3.3 The model

3.3.1 Equations

The global architecture of the model is identical to GHKT. For readability purposes, section 3.3.1 recalls the general architecture and equations of the GHKT model, then presents the modifications and additions to the benchmark model that are specific to this paper, namely the green energy production function, the green capital production function, and the mineral sectors dynamic.

GHKT (2014)

The simulation lasts T periods and the discount factor is denoted by β .

Denote by C_t the consumption, and $U(C_t)$ the instant utility of a representative household

$$U(C_t) = \ln(C_t). \quad (3.1)$$

Denote by Y_t the total output of the economy, and K_t the amount of capital. In each period, the production of final goods is shared between immediate consumption (C_t) and savings (i.e. constituting capital for the next period). A total depreciation of capital over the course of one period is assumed. Therefore,

$$K_{t+1} + C_t = Y_t \quad (3.2)$$

$$0 \leq C_t \leq Y_t. \quad (3.3)$$

Final goods are produced from capital K_t , labour $N_{0,t}$ (where 0 stands for “final good sector”), and energy E_t . The production function is a standard Cobb-Douglas function:

$$Y_t = A_{0,t} e^{-\gamma(S_t - \bar{S})} K_t^\alpha N_{0,t}^{1-\alpha-\nu} E_t^\nu. \quad (3.4)$$

$A_{0,t}$ is the total factor productivity, α and ν are the output elasticities of capital and energy. Production of final goods also depends on climate (described here by the amount of carbon in the atmosphere S_t), with a damage factor γ . \bar{S} is the preindustrial level of atmospheric carbon.

Energy comes from three sources : oil ($E_{1,t}$), coal ($E_{2,t}$) and a low-carbon energy ($E_{3,t}$). Those energy are not perfect substitutes. Parameter ρ characterizes interfuel substitution. The share parameters κ_1 , κ_2 and κ_3 characterizes the relative efficiency of each energy sources:

$$E_t = (\kappa_1 E_{1,t}^\rho + \kappa_2 E_{2,t}^\rho + \kappa_3 E_{3,t}^\rho)^{\frac{1}{\rho}}. \quad (3.5)$$

Oil is extracted from the oil stock $R_{1,t}$. The cost of extraction, in terms of labour, capital and energy, is assumed to be negligible with respect to the cost of scarcity. Therefore, $E_{1,t}$ can be chosen freely in the range of admissible values, without any labour, capital or energy involved.

$$E_{1,t} = R_{1,t} - R_{1,t+1} \quad (3.6)$$

$$0 \leq E_{1,t} \leq R_{1,t}. \quad (3.7)$$

As an abundant resource, coal's extraction cost dominates its scarcity cost. Therefore, GHKT assumes an extraction cost :

$$E_{2,t} = A_{2,t} N_{2,t}, \quad (3.8)$$

where $A_{2,t}$ is an exogenous labour productivity variable.

Carbon emissions accumulates in the atmospheric carbon stock at each period. In the same time, this stock depreciates. Denote $(d_s)_{s=0}^\infty$ the proportions of CO2 emitted s periods ago that have been removed from the atmosphere. GHKT specifies the sequence $(d_s)_{s=0}^\infty$. Then,

$$S_t = S_{t=0} + \sum_{s=0}^t (1 - d_s) (E_{1,t-s} + E_{2,t-s}). \quad (3.9)$$

Modifications and additions to the GHKT model

Unlike GHKT, we make capital a crucial production factor of low-carbon energy production. Following Fabre et al. (2020), we refer to this capital as “green capital”, and denote it G_t . To produce low-carbon energy, one needs labour $N_{3,t}$ and green capital G_t . We use a standard

CES production function with a negative parameter of substitution $\tilde{\rho}$. $A_{3,t}$ measures labour productivity. It is an exogenous variable. Parameter ψ characterizes the energy that can be obtained from a given amount of green capital over the course of one period. $N_{3,t}$ stands for labour directly involved in low-carbon energy production:

$$E_{3,t} = (\kappa_L(A_{3,t}N_{3,t})^{\tilde{\rho}} + \kappa_G(\psi G_t)^{\tilde{\rho}})^{\frac{1}{\tilde{\rho}}}. \quad (3.10)$$

Green capital G_t is constituted from primary and secondary mineral resources. Denote $m_{p,t}$ (resp. $m_{s,t}$) the flow of primary (resp. secondary) mineral. Green capital production function is a standard CES function. The substitution parameter of primary and secondary mineral resources is $\tilde{\rho}$, and the share parameters are κ_s and κ_p . As for regular capital in GHKT, a total depreciation of green capital is assumed over the course of one period. As a consequence, it depends on the current flow of primary and secondary mineral, and does not depend on the past amount of green capital:

$$G_t = (\kappa_s m_{s,t}^{\tilde{\rho}} + \kappa_p m_{p,t}^{\tilde{\rho}})^{\frac{1}{\tilde{\rho}}}. \quad (3.11)$$

Primary mineral is extracted from a primary mineral stock $M_{p,t}$. As for coal in GHKT, primary mineral extraction requires labour, which productivity is $A_{p,t}$. Primary mineral extraction is bounded by remaining primary mineral reserves.

$$m_{p,t} = A_{p,t}N_{p,t} \quad (3.12)$$

$$m_{p,t} \leq M_{p,t} \quad (3.13)$$

$$M_{p,t+1} = M_{p,t} - m_{p,t}. \quad (3.14)$$

Similarly, secondary mineral extraction requires a labour input, which productivity is denoted by the exogenous variable $A_{s,t}$. It is bounded by the total reserve of secondary mineral available at this time.

$$m_{s,t} = A_{s,t}N_{s,t} \quad (3.15)$$

$$0 \leq m_{s,t} \leq M_{s,t}. \quad (3.16)$$

Since it is assumed that green capital depreciates entirely over the course of one period, secondary mineral stock evolution is :

$$M_{s,t+1} = M_{s,t} - m_{s,t} + (m_{s,t} + m_{p,t})$$

which gives

$$M_{s,t+1} = M_{s,t} + m_{p,t}. \quad (3.17)$$

It is assumed, as in GHKT, that labour can move freely between all sectors from one period to another. The only feasibility constraint on labour allocation is

$$N_{0,t} + N_{2,t} + N_{3,t} + N_{p,t} + N_{s,t} = N_t \quad (3.18)$$

with N_t the total labour, that is exogenously driven.

3.3.2 Optimisation problem

Equations (3.4)-(3.6), (3.8)-(3.12), (3.14)-(3.15), (3.17) allows us to write each variable as a combination of the eight decisions variables C_t , K_{t+1} , $N_{0,t}$, $E_{1,t}$, $N_{2,t}$, $N_{3,t}$, $N_{p,t}$ and $N_{s,t}$.

The social planner's problem is to maximize the total discounted utility until the end of the horizon,

$$\max_{\{C_t, K_{t+1}, N_{0,t}, E_{1,t}, N_{2,t}, N_{3,t}, N_{p,t}, N_{s,t}\}_{t=0}^{\infty}} \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t U(C_t)$$

under the feasibility constraints (3.2), (3.3), (3.7), (3.13), (3.16), (3.18). The constraints are linear, and the objective function is concave, so that there is a unique solution to the optimisation problem.

3.4 Analytical Results

We derive some analytical results from the Lagrangian, which full expression is given in section 3.4.1. Sections 3.4.2 and 3.4.3 presents a set of conditions that characterize the optimal paths. Section 3.4.4 gives a necessary condition on labour productivities initial values $A_{s,t=0}$, $A_{p,t=0}$, $A_{3,t=0}$ that guarantees junction with the benchmark model (GHKT) when mineral is infinite.

3.4.1 Lagrangian

We write the Lagrangian, using greek letters for the Lagrange multipliers. We voluntarily omit the Karush-Kuhn-Tucker multipliers here for readability purposes here, which is equiv-

alent to a situation where all inequality constraint are not binding.

$$\begin{aligned}
\mathcal{L} = & \sum_{t=0}^T \beta^t U(C_t) + \sum_{t=0}^T \beta^t \pi_{K,t} (K_{t+1} - Y_t + C_t) \\
& + \sum_{t=0}^T \beta^t \lambda_{0,t} (Y_t - A_{0,t} \exp^{-\gamma(S_t - \bar{S})} K_t^\alpha N_{0,t}^{1-\alpha-\nu} E_t^\nu) \\
& + \sum_{t=0}^T \beta^t \xi_t (E_t - (\kappa_1 E_{1,t}^\rho + \kappa_2 E_{2,t}^\rho + \kappa_3 E_{3,t}^\rho)^{\frac{1}{\rho}}) \\
& + \sum_{t=0}^T \beta^t \mu_{1,t} (E_{1,t} - R_{1,t} + R_{1,t+1}) \\
& + \sum_{t=0}^T \beta^t \lambda_{2,t} (E_{2,t} - A_{2,t} N_{2,t}) \\
& + \sum_{t=0}^T \beta^t \zeta_t (S_t - \bar{S} - \sum_{s=0}^{t+T_0} (1 - d_s) (E_{1,t-s} + E_{2,t-s})) \\
& + \sum_{t=0}^T \beta^t \lambda_{3,t} (E_{3,t} - (\kappa_L (A_{3,t} N_{3,t})^{\bar{\rho}} + \kappa_G (\psi G_t)^{\bar{\rho}})^{\frac{1}{\bar{\rho}}}) \\
& + \sum_{t=0}^T \beta^t \pi_{G,t} (G_t - (\kappa_s m_{s,t}^{\bar{\rho}} + \kappa_p m_{p,t}^{\bar{\rho}})^{\frac{1}{\bar{\rho}}}) \\
& + \sum_{t=0}^T \beta^t \lambda_{p,t} (m_{p,t} - A_{p,t} N_{p,t}) \\
& + \sum_{t=0}^T \beta^t \mu_{p,t} (M_{p,t+1} - M_{p,t} + m_{p,t}) \\
& + \sum_{t=0}^T \beta^t \lambda_{s,t} (m_{s,t} - A_{s,t} N_{s,t}) \\
& + \sum_{t=0}^T \beta^t \mu_{s,t} (M_{s,t+1} - M_{s,t} - m_{p,t}) \\
& + \sum_{t=0}^T \beta^t \chi_t^N (N_{0,t} + N_{2,t} + N_{3,t} + N_{p,t} + N_{s,t} - N_t).
\end{aligned}$$

3.4.2 Labour distribution in optimal paths

Labour force is shared between five sectors : final goods, coal extraction, low-carbon energy, primary and secondary mineral. In each sector, it contributes to final goods production, either directly ($N_{0,t}$), or indirectly via energy production ($N_{2,t}$, $N_{3,t}$, $N_{s,t}$, $N_{p,t}$). Using the Lagrangian, we prove that the optimal distribution of labour, when feasibility constraint (3.16) is not binding, is achieved when marginal benefit of labour in each sector is equal.

Proposition 1 *In the optimal paths, marginal benefit of labour in each sector is equal at all time. More specifically, coal labour's marginal benefit is equated to final good's labour marginal benefit:*

$$\frac{\partial Y_t}{\partial N_{0,t}} = \frac{\partial Y_t}{\partial E_t} \frac{\partial E_t}{\partial E_{2,t}} \frac{\partial E_{2,t}}{\partial N_{2,t}} - \Lambda_t \frac{\partial E_{2,t}}{\partial N_{2,t}} \quad (3.19)$$

where Λ_t is the optimal tax ratio defined in GHKT.

Marginal benefit of direct labour in low-carbon energy production is equated to marginal benefit of labour in final good's sector:

$$\frac{\partial Y_t}{\partial N_{0,t}} = \frac{\partial Y_t}{\partial E_t} \frac{\partial E_t}{\partial E_{3,t}} \frac{\partial E_{3,t}}{\partial N_{3,t}}. \quad (3.20)$$

When the feasibility constraint (3.16) is not binding, marginal benefit of labour in mineral recycling and in final good's sector are equal:

$$\frac{\partial Y_t}{\partial N_{0,t}} = \frac{\partial Y_t}{\partial E_t} \frac{\partial E_t}{\partial E_{3,t}} \frac{\partial E_{3,t}}{\partial G_t} \frac{\partial G_t}{\partial m_{s,t}} \frac{\partial m_{s,t}}{\partial N_{s,t}}. \quad (3.21)$$

A proof of Proposition 1 is available in appendix 3.9.2.

Notice that coal extraction contributes to welfare both via final good production and via climate externality. The positive contribution corresponds to the first term of the right-hand side in equation 3.19. The negative contribution to welfare, via the climate externality, corresponds to the second term.

When the recycling feasibility constraint (3.16) is binding, that is

$$M_{s,t} = A_{s,t} N_{s,t},$$

the Karush-Kuhn-Tucker multiplier associated to this equation in the Lagrangian is non-null. Therefore, a supplementary term appears when writing the first order condition with respect to $N_{s,t}$, and equation (3.21) does not hold anymore. However, in this situation, $N_{s,t}$ can be directly obtained from :

$$N_{s,t} = \frac{M_{s,t}}{A_{s,t}}.$$

Notice that primary mineral sector's labour contributes to welfare both directly (via the primary mineral flow $m_{p,t}$) and indirectly (via the constitution of the secondary mineral stock $M_{s,t}$ and decumulation of primary mineral stock $M_{p,t}$). Therefore, labour in primary mineral

sector contributes to both present and future welfare, so that its marginal contribution to total welfare can not be written explicitly, contrary to other sectors labour's welfare marginal contributions.

3.4.3 Stock resources scarcity rent variation in optimal paths

We derive from the Lagrangian two more optimality conditions, that goes back to Hotelling's result : stock resources scarcity rent increases at the discount rate. This result holds for both oil and mineral sectors. Proposition 2 specifies this result. A proof is given in appendix 3.9.3.

Proposition 2 *In the optimal paths, stock resources scarcity rent increase at rate $\frac{1}{\beta}$. For oil stock, we have :*

$$\left(\frac{\nu\kappa_1}{E_{t+1}^\rho E_{1,t+1}^{1-\rho}} - \widehat{\Lambda}_{t+1} \right) = \frac{1}{\beta} \left(\frac{\nu\kappa_1}{E_t^\rho E_{1,t}^{1-\rho}} - \widehat{\Lambda}_t \right). \quad (3.22)$$

For primary and secondary mineral stocks, we have :

$$\left(\kappa_p \pi_{G,t+1} \left(\frac{G_{t+1}}{m_{p,t+1}} \right)^{1-\tilde{\rho}} - \frac{1-\alpha-\nu}{A_{p,t+1} N_{0,t+1}} \right) = \frac{1}{\beta} \left(\kappa_p \pi_{G,t} \left(\frac{G_t}{m_{p,t}} \right)^{1-\tilde{\rho}} - \frac{1-\alpha-\nu}{A_{p,t} N_{0,t}} \right) \quad (3.23)$$

where $\pi_{G,t}$ is the marginal contribution of green capital to welfare

$$\begin{aligned} \pi_{G,t} &= U'(C_t) \frac{\partial Y_t}{\partial E_t} \frac{\partial E_t}{\partial E_{3,t}} \frac{\partial E_{3,t}}{\partial G_t} \\ &= -\frac{Y_t}{C_t} \frac{\nu\kappa_3 \kappa_G \psi}{E_t} \left(\frac{E_t}{E_{3,t}} \right)^{1-\rho} \left(\frac{E_{3,t}}{\psi G_t} \right)^{1-\tilde{\rho}} \end{aligned}$$

and $\widehat{\Lambda}_t = \frac{\Lambda_t}{Y_t}$.

Equation (3.22) gives a condition that links $E_{1,t}$ to $E_{1,t+1}$. It is identical to GHKT's result. Equation (3.23) links $N_{p,t}$ to $N_{p,t+1}$. It is specific to our model.

3.4.4 Relationship to the benchmark model (GHKT)

We find that with proper calibration of parameters, our model's infinite mineral scenario is identical to GHKT's model. Therefore, we show that GHKT's model implicitly assumes that there is no mineral constraint. In the next paragraphs, we identify GHKT variables with a \sim to differentiate with our model's variable. Moreover, growth rates of labour productivity A_i is denoted g_{A_i} .

In GHKT, renewable energy production function is

$$\tilde{E}_{3,t} = \tilde{A}_{3,t} \tilde{N}_{3,t}$$

where labour productivity $\tilde{A}_{3,t}$, follows the exogenous paths defined by

$$\begin{cases} \tilde{A}_{3,t=0} = 1311 \\ \tilde{A}_{3,t+1} = 1.02^{10} \times \tilde{A}_{3,t}. \end{cases}$$

When we use an infinite amount of mineral, our model should be identical to GHKT's one. We find analytically a set of sufficient conditions that guarantees this result.

Proposition 3 *Assume that $M_{p,t=0} = M_{s,t=0} = +\infty$.*

If

$$\begin{cases} g_{A3} = g_{As} = g_{Ap} = 1.02^{10} \\ \hat{A}_{3,t=0} \equiv F(A_{3,t=0}, A_{s,t=0}, A_{p,t=0}) = 1311 \end{cases}$$

(see appendix 3.9.4 for details on the function F), then,

- *total labour in low-carbon energy production (direct and indirect) is shared in constant proportion between the three sectors $N_{3,t}$, $N_{p,t}$ and $N_{s,t}$*
- *low-carbon energy production function can be written as the product of an aggregated low-carbon labour productivity $\hat{A}_{3,t}$ times aggregated low-carbon energy labour $N_{3,t} + N_{s,t} + N_{p,t}$*
- *this aggregated labour productivity $\hat{A}_{3,t}$ has the same initial value and growth rate as GHKT's low-carbon labour productivity.*

Mathematically:

$\forall t \geq 0,$

$$E_{3,t} = \hat{A}_{3,t}(N_{3,t} + N_{s,t} + N_{p,t}) \tag{3.24}$$

$$\frac{N_{p,t}}{N_{s,t}} = \alpha_1 \tag{3.25}$$

$$\frac{N_{3,t}}{N_{s,t} + N_{p,t}} = \alpha_2 \tag{3.26}$$

$$\tag{3.27}$$

with

$$\begin{cases} \hat{A}_{3,t=0} = 1311 \\ \hat{g}_{A3} = 1.02^{10}. \end{cases}$$

Appendix 3.9.4 provides a proof of proposition 3, and detailed expressions of aggregated

labour productivity $\widehat{A}_{3,t=0}$ and labour share ratios expressions α_1 and α_2 .

Under the conditions of proposition 3, our model is mathematically equivalent to GHKT model. In other words, we generate GHKT's optimal paths as a particular case of our model where the amount of mineral is infinite.

Sections 3.4.2 and 3.4.3 results are used for the numerical resolution of the model. Section 3.4.4 result is used for the calibration of the model.

3.5 Simulation

Section 3.5.1 details the method used for the simulation. Section 3.5.2 provides informations on the calibration of the model.

3.5.1 Method

The simulation is made on Matlab. Following GHKT, we compute an approximate finite horizon solution, with a 300 years horizon, that is 30 periods of 10 years. As in GHKT, the consumption level is a constant ratio of total output Y_t . Constraints (3.2) and (3.18) allow to eliminate 2 more decisions variables, for instance K_{t+1} and $N_{0,t}$. At this point, 5 decisions remain in each period: labour distribution N_2, N_3, N_s, N_p , and primary mineral extraction level E_1 . Since the simulation lasts 30 periods, there is a total of 150 decisions.

We use propositions 1 and 2 to reduce the problem to a two variable optimisation problem. First, proposition 1 allows to compute $N_{2,t}$, $N_{3,t}$ and $N_{s,t}$, when $N_{p,t}$ and $E_{1,t}$ are given by solving a non-linear 3 equation system. Then, proposition 2 allows to deduce the optimal $N_{p,t+1}$ and $E_{1,t+1}$ when $N_{p,t}$ and $E_{1,t}$ are given, by solving a non-linear 2 equations system. Both of those systems are solved using *fsolve*. In the end, for any duplet of initial values $(E_{1,t=0}, N_{p,t=0})$, we are able to compute the paths that:

- start with the given initial values for $E_{1,t}$ and $N_{p,t}$
- respect optimality conditions given in propositions 1 and 2
- respect all feasibility conditions

Finally, we optimise on those two initial values to maximise the total discounted value, using *fminsearch*.

3.5.2 Calibration

For every parameter that already exists in GHKT, we use the same values than the benchmark model. Then, we calibrate the parameters that are specific to our model using the case of copper in wind energy production. Values are given in Table 3.1, and appendix 3.9.1 gives more detail on the calibration conditions used. The next paragraph details the various mineral constraint scenarios studied here.

Primary mineral initial stock $M_{p,t=0}$ There is no consensus in the literature in the estimation of total copper resources ultimately available for mining. Indeed, although there are more than 100Mt of copper in the top kilometers of earth crust, most of deposits have such a low ore grade, or are located so deep that it is not technically possible or economically viable to recover it.

The commonly used notion of resource does not include all those deposits, but only those that have “reasonable prospect for economic extraction” [4]. As a consequence, resources estimates depend on many economic parameters, and can change if extraction costs are reduced, or if technological innovations grants (economically viable) access to further deposits. Thus, US Geological Survey identified world copper resource estimation have increased fourthfold between 1998 and 2014, from 550MtCu to 2100MtCu [17, 28]. However, it is unclear if technological innovations and productivity gains can maintain on the long run constant copper extraction cost while deposits inevitably become poorer and more remote. In other words, as Meinert et al. (2016) highlights, it is hard to provide an estimate of ultimate recoverable resource. Moreover, our model only consider one specific use of copper, that is the manufacturing of green capital for low-carbon energy production. However, copper production is dedicated to many different uses, that are not accounted for in this model. Therefore, only a small ratio of total copper resources will be used for green capital manufacturing. This is an additional difficulty in the calibration of the initial stock of copper in our model.

Finally, we argue that in a sustainable development perspective, environmental damages caused by booming primary metal mining makes it relevant to consider a primary mineral constraint lower than ultimate available resources. Indeed, mining is one of the top polluting industry [22] [30]. Additionally, the inevitable ore grade decline tends to increase environmental damages, since more material have to be removed from the mine to recover the same copper amount [21].

Table 3.1 Parameter selection

Parameter	Value	Unit
κ_s (κ_p)	0.3085 (0.6915)	-
$\tilde{\rho}$	0.5	-
$A_{p,t=0}$	132000	MtCu/labour
$A_{s,t=0}$	132000	MtCu/labour
ψ	1.877	Gtoe/MtCu
κ_g (κ_L)	0.75 (0.25)	-
$\ddot{\rho}$	-3	-
$A_{3,t=0}$	865.1	Gtoe/labour
$g_{A2} = g_{A3} = g_{As} = g_{Ap}$	1.02 ¹⁰	-
$M_{s,t=0}$	19	MtCu

For all those reasons, our model's initial primary copper stock has to be understood as a copper budget for energy transition (analog to the carbon budget notion) rather than ultimate recoverable resources. It is an upper limit of copper available for green capital manufacturing, which level depends both on global copper scarcity hypothesis and on environmental degradation mitigation goals. We model various scenarios of copper budget for wind energy production, from 50MtCu (2.5 year of current annual copper primary production, and 20 times the current amount of copper used in wind turbines worldwide) to a very liberal 2000MtCu (recall that current estimate of total copper resources, identified and undiscovered, is 5000Mt).

3.6 Results

This section presents the results of the set of simulation performed. They are the first best solution to the social planner's problem. As in GHKT, we use in the simulation a time unit of 10 years : for instance, t=10 stands for year 2110 (time starts in 2010).

3.6.1 Matching GHKT and the infinite mineral scenario

In the infinite mineral scenario, there is no scarcity rent for primary and secondary minerals. We prove that low-carbon energy production function can be written as the product of a labour share times an aggregated labour productivity. We calibrate our model so that this aggregated labour productivity matches GHKT low-carbon energy labour's productivity. Consequently, our model's infinite mineral scenario matches the benchmark simulation. Appendix 3.9.4 gives an analytical proof of this result. Figure 3.1 shows the low-carbon

energy path in both simulation. There is less than 1% relative error. The results are analog or better for every other variables.

Result 1 *GHKT model is equivalent to our model's infinite mineral scenario.*

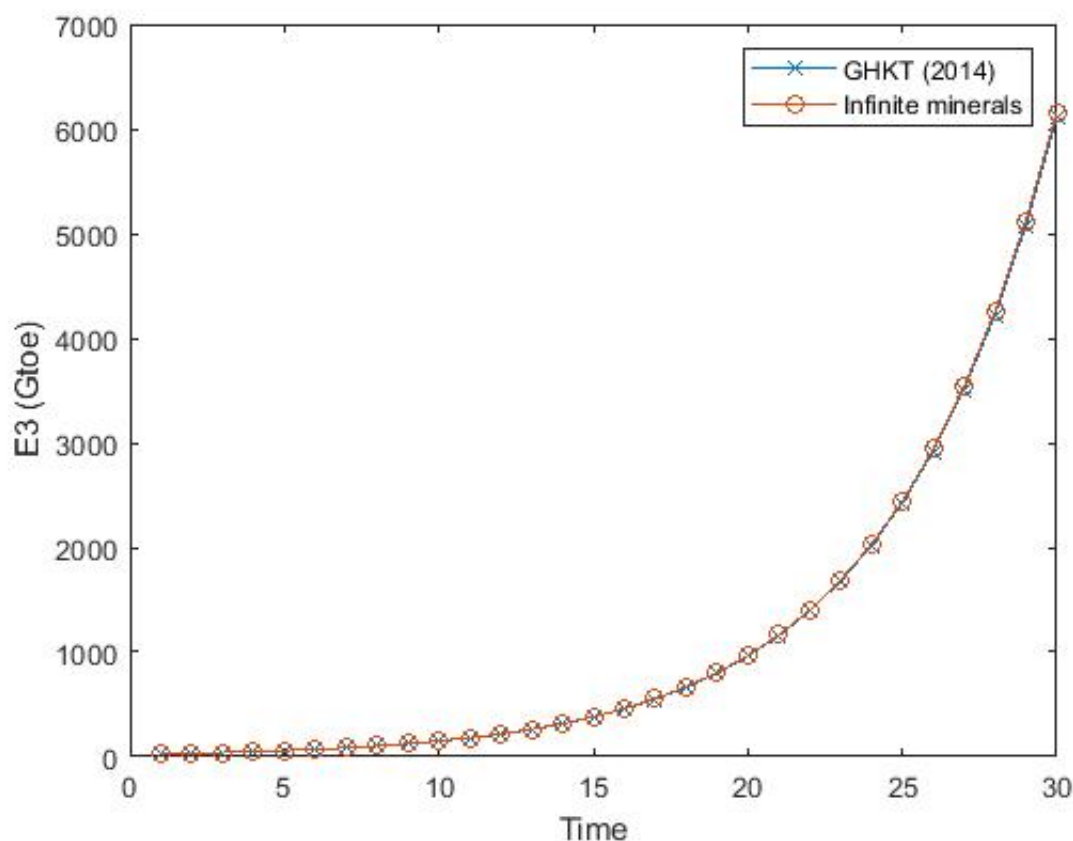


Figure 3.1 Comparison of low-carbon energy production in GHKT and our model's infinite mineral scenario

This is an important feature of our model, since we intend to measure the impact of a mineral constraint on the optimal energy transition paths computed by GHKT.

3.6.2 Low-carbon energy production

When there is a finite amount of mineral in the model, primary and secondary mineral flows are bounded. Therefore, green capital is also bounded. But low-carbon energy is produced with labour and green capital inputs. Since the the labour-capital substitution parameter is negative, the upper limit on green capital induces an upper limit on low-carbon energy

production. Therefore, the mineral constraint leads to a limitation on low-carbon energy production.

Figure 3.2 shows low-carbon energy production paths in various mineral stock scenarios. In the infinite mineral scenario, production grows unlimited at a yearly growth rate of 1.9%. In each scenario with a mineral constraint, low-carbon energy first follows the benchmark paths, before reaching a peak and converging to a long term plateau. Low-carbon energy yearly growth rate departs from the infinite mineral scenario at a date that depends on the mineral constraint. The long term low-carbon energy production level also depends on the mineral constraint.

Result 2 *Under a primary mineral constraint scenario, low-carbon energy production reaches a plateau, which date and value depends on total mineral amount.*

3.6.3 Primary and secondary copper production

Figure 3.3 shows primary copper extraction paths in all scenarios. In the infinite mineral scenario, primary copper extraction grows by 1.9% annually. In all other scenarios, primary copper production peaks in the next century. In the 3 scenarios with the hardest primary mineral constraint ($M_{p,t=0} = 50, 100, 200$ MtCu), the peak has already been reached at the beginning of the simulation.

After the primary copper production peaks, recycled copper production growth increases to compensate for the decline of primary copper. The recycling rate (defined here as the ratio of the secondary mineral stock that is recycled in a given period) increases, until it reaches its maximum of 100%, which takes 4-6 decades. Once this maximum is reached, green capital can not increase anymore. This moment coincides with the low-carbon energy production growth drop. Therefore, we conclude that mineral recycling delays the peak of green energy production by 40-60 years.

Result 3 *After the primary mineral extraction peak, mineral recycling increases, which delays by 40-60 years the green energy production growth drop. This delay does not depend on the total amount of mineral in the model.*

3.6.4 Green capital recycled mineral content

Green capital is made of primary and secondary minerals. Figure 3.4 shows the evolution of the recycled mineral ratio in green capital manufacturing. In the infinite mineral scenario,

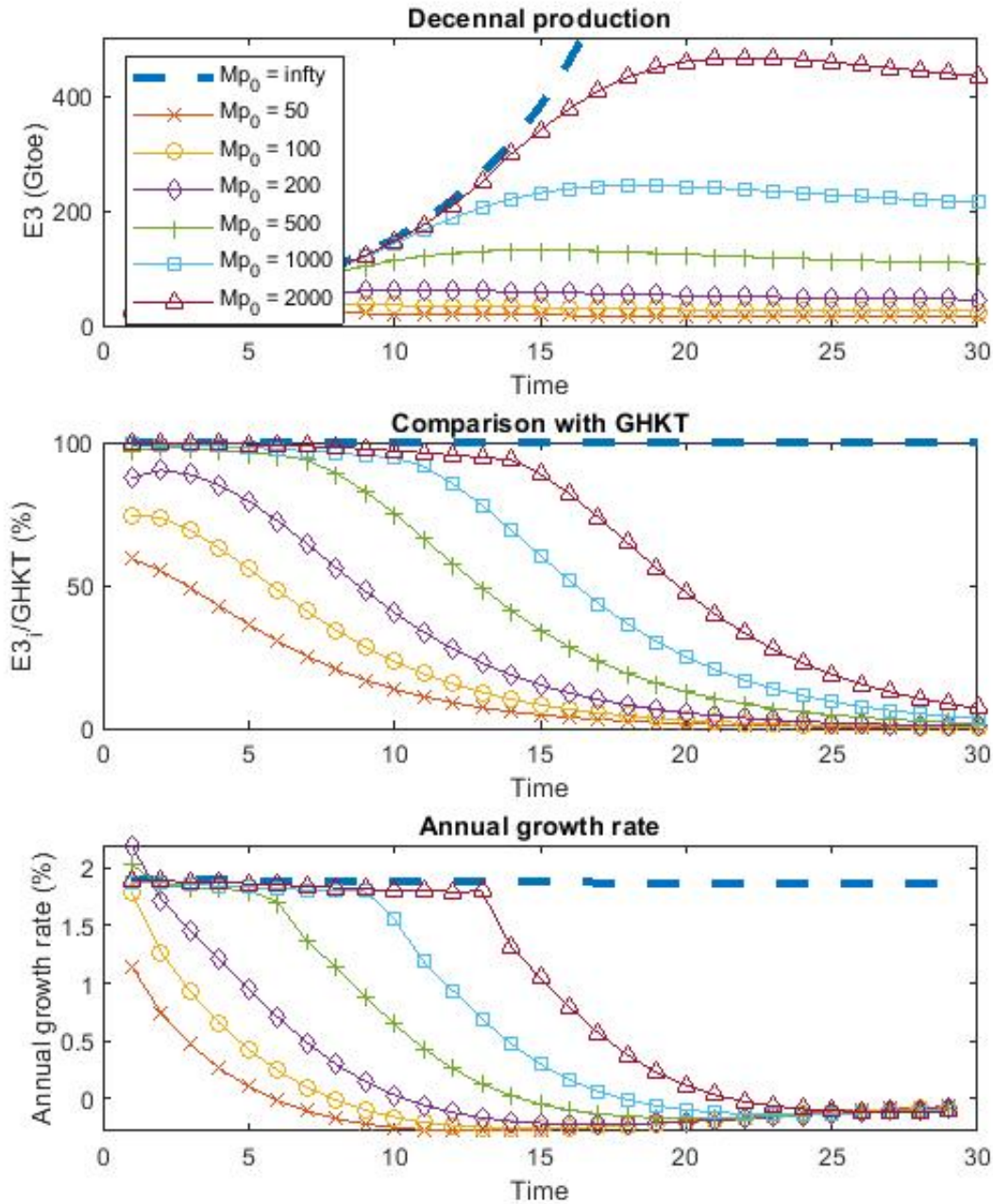


Figure 3.2 Low-carbon energy production in various mineral stock scenario

this ratio is constant at 15%. In all other scenarios, recycled mineral gradually substitutes to primary mineral in green capital manufacturing. Within 10 to 12 decades, the share of recycled mineral in green capital increases from 20% to 90%. In the long run, green capital is

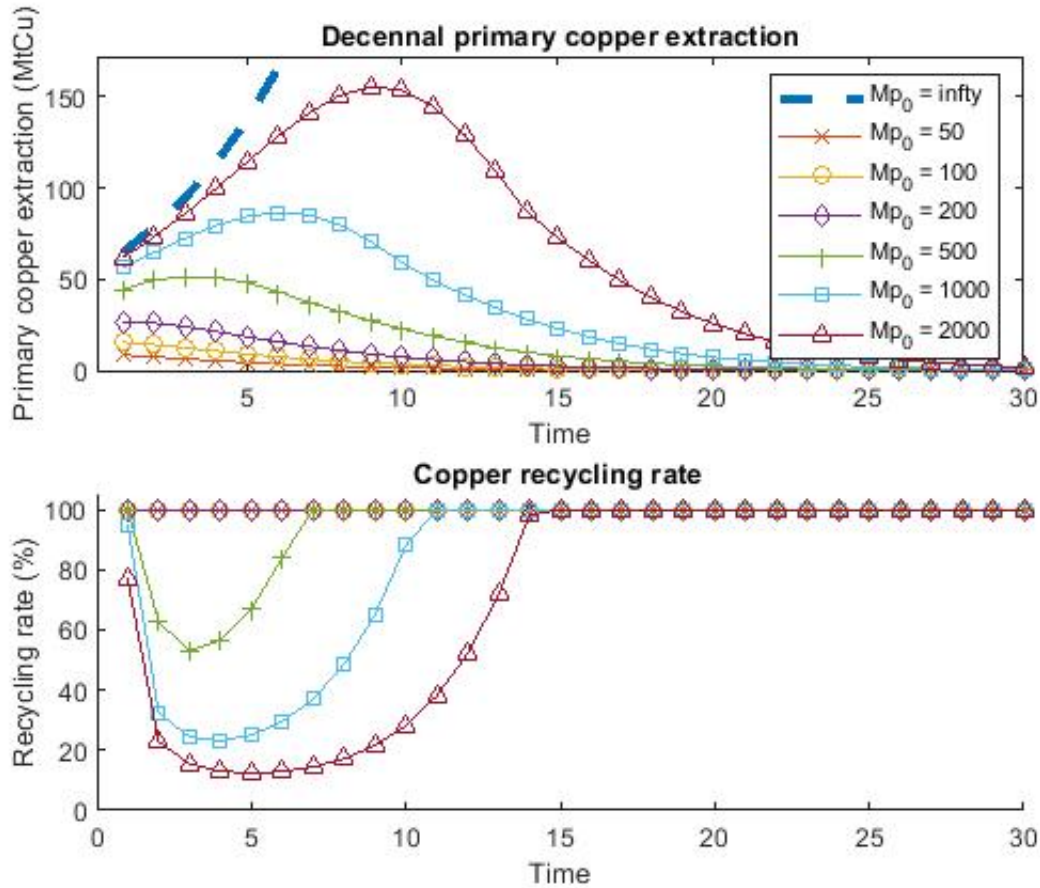


Figure 3.3 Decennial primary copper extraction m_p , and copper recycling rate paths in all scenarios

made of 100% recycled minerals. A comparison between Figure 3.3 and Figure 3.4 shows that recycled mineral share in green capital starts to increase before primary mineral production peak, when primary mineral production growth starts to slow down and depart from the infinite mineral scenario. When primary mineral production peak occurs (Figure 3.3), the recycled mineral content of green capital has already reached 55% ($\pm 5\%$) in all scenarios.

Result 4 *When primary mineral is abundant, green capital's recycled mineral content is stable at 15%. The slowdown and decline of primary mineral production leads to a gradual increase of recycled mineral share in green capital, until it eventually reaches 100%.*

3.6.5 Labour and green capital inputs to low-carbon energy production

Figure 3.5 shows the paths of green capital and labour inputs to low-carbon energy production in the $M_{p,t=0} = 1000$ MtCu scenario. Green capital input reaches a peak, but labour input

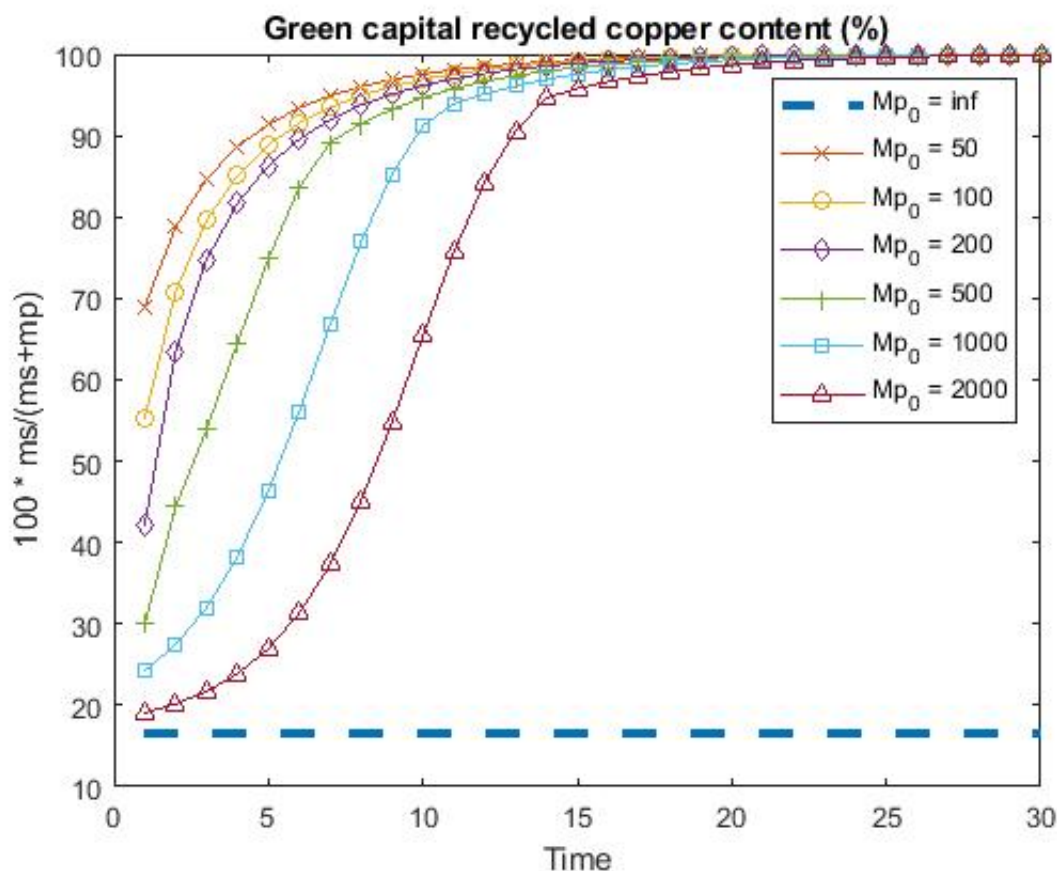


Figure 3.4 Share of recycled copper in green capital

keep increasing thanks to labour productivity gains, in spite of a gradual decline of low-carbon energy labour share. In the long run, the non-substitutability of green capital and labour input limits low-carbon energy production. Labour productivity gains delay by 6-8 decades the low-carbon energy production peak.

Result 5 *After the green capital peak, labour productivity gains delay low-carbon energy production peak by 6-8 decades.*

3.6.6 Key dates in each scenario

The previous sections describe some key steps that occur in every finite mineral scenario, namely:

- primary copper extraction peak
- 100% recycling rate
- low-carbon energy production peak

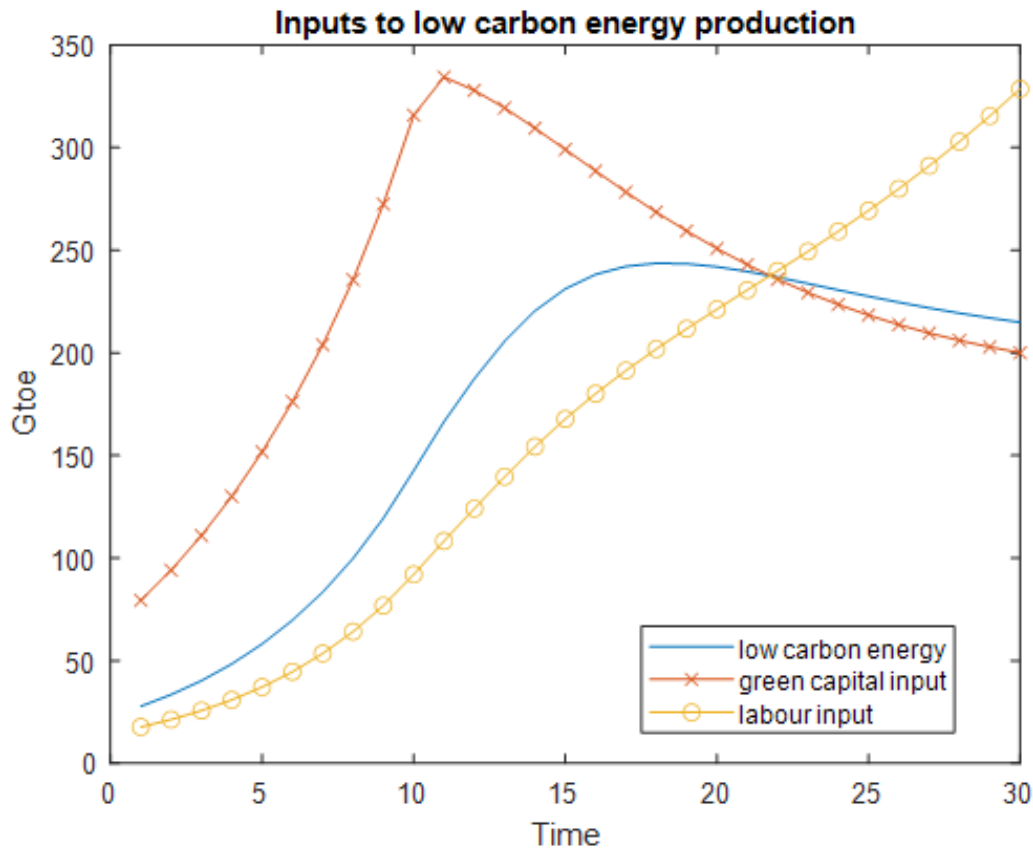


Figure 3.5 Green capital and labour inputs to low-carbon energy production, for a mineral constraint $M_{p,t=0} = 1000$ MtCu

The date of those events differs according to the magnitude of the mineral constraint. Thus, a higher $M_{p,t=0}$ delays the primary copper peak and the low-carbon energy peaks. This section gives the dates of those events in each scenario.

In order to highlight the growing difference between low-carbon energy production in finite and infinite mineral scenario, we also denote the dates of the following events :

- low-carbon energy production is 10% inferior to the infinite mineral scenario
- low-carbon energy production is 20% inferior to the infinite mineral scenario
- low-carbon energy production is 50% inferior to the infinite mineral scenario
- low-carbon energy production is 66% inferior to the infinite mineral scenario

Table 3.2 summarizes all those results. Notice that in all scenarios, the low-carbon energy peak coincides with the moment when low-carbon energy production is approximately 2/3

lower than in the infinite mineral scenario. The time unit is 10 years, and time starts in 2010: $t=6$ refers to an event that happens in 2070. “10% < *infty*” refers to the moment when low-carbon energy production is 10% lower than in the infinite mineral scenario. Dates are given with a precision of ± 0.5 decade.

Table 3.2 Dates of key events in each scenarios

Mineral constraint (MtCu)	50	100	200	500	1000	2000
Primary copper peak	< 1	< 1	1	3	6	9
100% recycling rate	< 1	< 1	1	7	11	15
10% < <i>infty</i>	< 1	< 1	2	7.9	11.1	15
20% < <i>infty</i>	< 1	< 1	5	9.3	12.7	16.2
50% < <i>infty</i>	3	5.7	8.7	12.8	16.2	19.6
66% < <i>infty</i>	6	8	11	15	18	22
Low-carbon energy peak	6	8	11	15	18	22

3.6.7 Impact on GDP and optimal carbon tax

In the infinite mineral scenario, low carbon energy production grows unlimited. In all constrained scenarios, it reaches a peak at one point. Since energy are assumed to be non-substitutable, fossile energies can’t compensate for this limitation. As a consequence, total available energy for final good production E_t can’t follow the infinite mineral scenario path. This engenders a relative loss of GDP compared to the unconstrained scenario.

Figure 3.6 shows that in all constrained scenarios considered, GDP starts to depart from the infinite mineral scenario path at one point. When comparing with the key dates from Table 3.2, we observe that GDP drops from the moment when mineral recycling rate as reached its maximum level of 100%, that is for instance at $t=7$ in the 500Mt primary copper budget scenario. 7 decades after this date, GDP is 1% lower in the constrained scenario. It is 5% lower at the end of the simulation.

As in GHKT, the optimal carbon tax is a stationary ratio of the GDP. Therefore, plotting relative variations of GDP or optimal carbon tax paths is equivalent. Thus, figure 3.6 also shows how the optimal carbon tax path is changed by the mineral constraint. In constrained scenarios, the optimal carbon tax is 3-8% lower than in the infinite mineral scenario after 30 decades, depending on the mineral constraint considered.

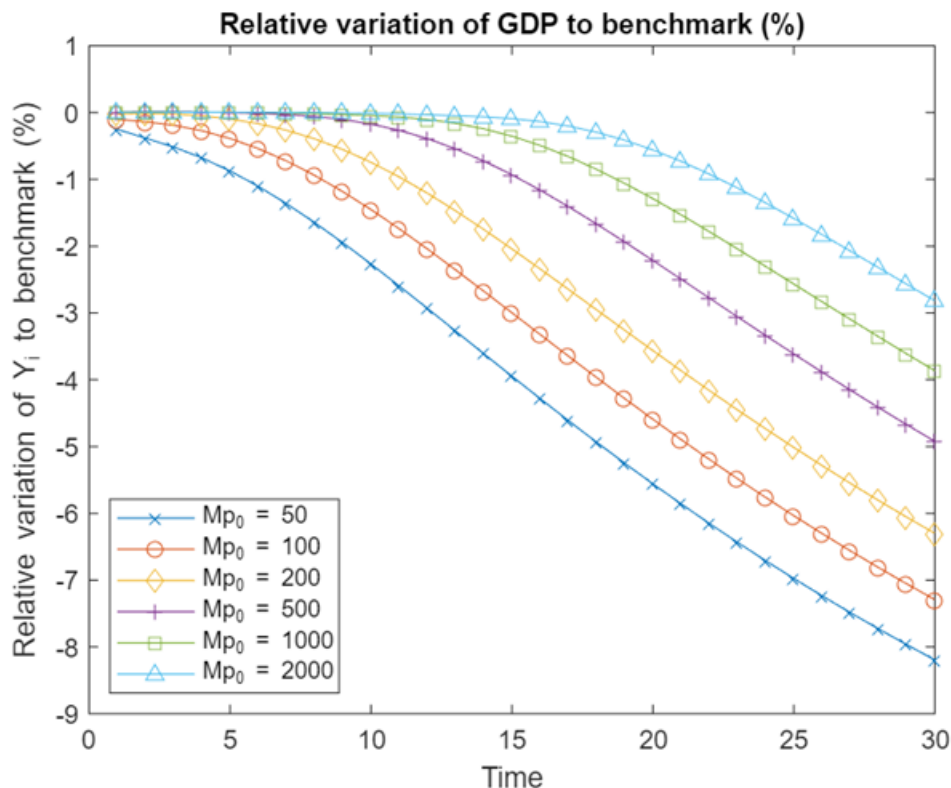


Figure 3.6 Comparison of GDP with the infinite mineral scenario for various mineral constraints

3.7 Robustness check : taking into account the diversity of low-carbon energy sources

In our model, as in GHKT, low-carbon energy production is aggregated into a single sector, ignoring the diversity of low-carbon energy sources (solar, wind, but also hydroelectricity and nuclear). Our model differs from GHKT only in the production function of low-carbon energy. Contrary to GHKT, we assume that low-carbon energy production requires a green capital input, that cannot be fully substituted by the labour input. This modelling choice is the consequence of the significant mineral requirement of wind and solar energy production, that are expected to be the two main low-carbon energy sources in the future [2] [15]. However, nuclear energy and hydroelectricity generation, which currently account for the main part of low-carbon energy production, are not as mineral intensive as solar and wind energy production [12] [30]. However, in the medium term, nuclear and hydroelectricity production are expected to stabilize, while solar and wind keep growing. In the long run, solar and wind energy production are expected to be the two main low-carbon energy sources. What

happens if we take into account nuclear energy and hydroelectricity generation in our model ?

In BP energy outlook, nuclear energy and hydroelectricity production growth rate declines gradually, from 1.7% annually between 2010 and 2020, to 0.57% per year between 2030 and 2040. For simplicity, we assume that nuclear energy and hydroelectricity generation is constant to its projected 2040 level during all the simulation. Therefore, the production function for total low-carbon energy becomes :

$$E_{3,t} = (\kappa_L(A_{3,t}N_{3,t})^{\dot{\rho}} + \kappa_G(\psi G_t)^{\dot{\rho}})^{\frac{1}{\dot{\rho}}} + NH, \quad (3.28)$$

where NH is a constant that denotes nuclear and hydroelectricity production. In this production function, the first term accounts for solar and wind energy, whereas the second term accounts for nuclear and hydroelectricity. Following BP energy outlook [2], we use a decennial nuclear and hydroelectricity production

$$NH = 20 \text{ Gtoe}$$

We re-calibrate $A_{3,t=0}$ so that the initial low-carbon energy production matches GHKT. We re-run the simulation in the infinite mineral scenario. We observe that the variable part of low-carbon energy production (solar and wind energy) grows at 1.9% per year, as in the base model. However, this variable part is initially lower than in the base model, so that total low-carbon energy production grows slower in this model than in the base model. The constant term (nuclear and hydroelectricity) quickly becomes negligible with respect to the variable term (solar and wind energy). In the long run, total low-carbon energy grows at the same pace in both models, that is 1.9% per year, but the initial difference induces a 7 decades shift between both paths.

3.8 Conclusion

Many actors point the key role of minerals in the energy transition. We model the primary and secondary mineral sector response to a booming demand caused by a growing low-carbon energy production. We observe the impact of a mineral constraint on green energy production paths in various mineral scarcity scenarios.

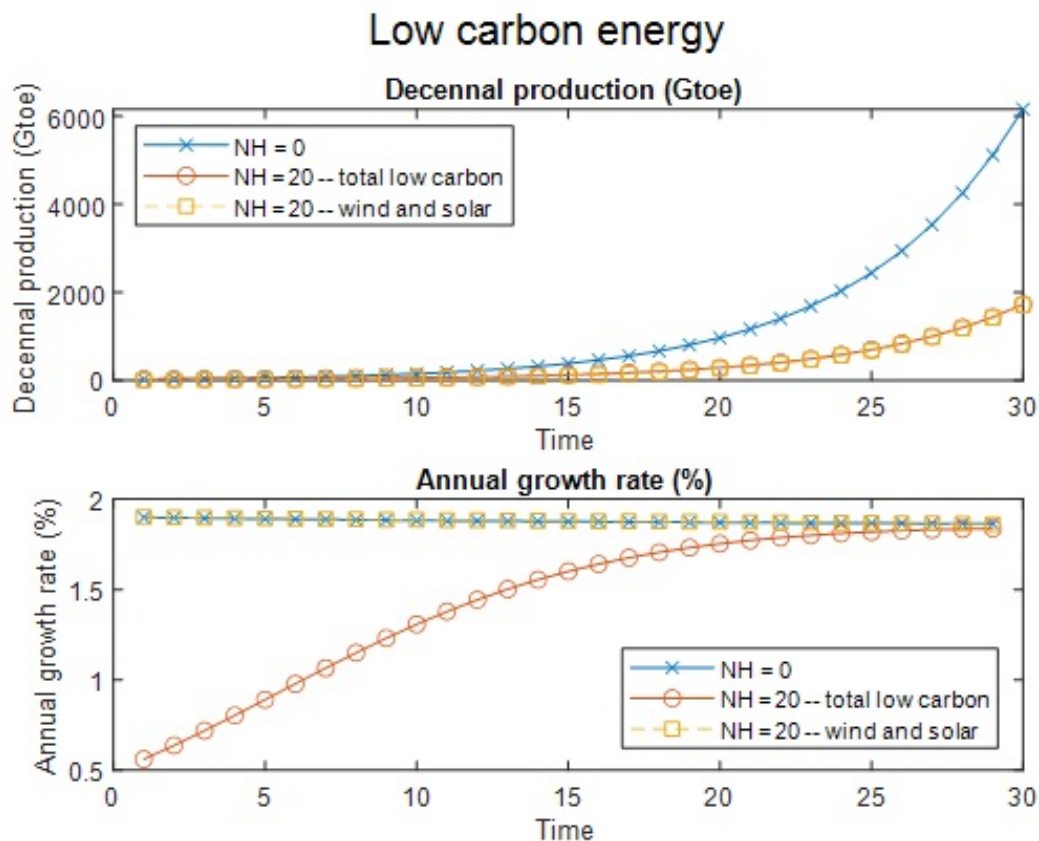


Figure 3.7 Comparison of low-carbon energy production paths for various values of nuclear and hydroelectricity production

For this purpose, we add to a benchmark energy transition model (Goloso, Hassler, Krusell, and Tsyvinski, 2014) a "green capital" input for renewable energy transition made from primary or recycled minerals. Following GHKT, we use for our simulations a 3 energy sources case (oil, coal and low-carbon energy). We use as a case study the copper input to low-carbon energy production.

When there is an infinite amount of minerals, the result of our model simulation is identical to the benchmark case : our model matches GHKT. When there is a finite amount of mineral, the energy transition paths, and particularly low-carbon energy production, eventually departs from the infinite mineral scenario. We simulate the model's response to various levels of mineral constraint. If the primary copper budget for low-carbon energy green capital is 50 MtCu (which is 20 times the current amount of copper involved in wind energy production worldwide), low-carbon energy production path will be 50% lower than in the infinite min-

eral scenario in three decades, and will peak in 6 decades. More generally, a doubling (resp. 2-fold division) of the primary copper budget postpones (resp. brings forward) this date by 30 years (± 10 years). Along the energy transition, green capital recycled mineral content grows, as a consequence of the combined decline of primary mineral extraction and increase of mineral recycling. When mineral recycling rate reaches 100%, which happens 4 to 6 decades after primary mineral extraction peaks, green capital also peaks. Once green capital's upper bound is reached, low-carbon energy production's growth rate declines. Labour productivity gains notably mitigates the slowdown of low-carbon energy production, but in the long run, low-carbon energy production stabilizes at a plateau, which value depends on the mineral constraint considered.

Our simulations show that the mineral constraint has to be taken into account in energy transition modelisation, since it significantly impacts low-carbon energy production paths. It reveals the successive steps that ultimately lead to low-carbon energy production limitation, and gives some insights on the date of those key events for many mineral constraint scenarios.

3.9 Appendix

3.9.1 Calibration

Table 3.3 Calibration summary

Parameter	Interpretation	Calibration condition	Value	Unit
$\kappa_s, \kappa_p, \tilde{\rho}$	Production function of green capital – substitution and share parameters of primary and secondary mineral inputs	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $\kappa_s + \kappa_p = 1$ ▪ $\frac{\kappa_s}{\kappa_p} \left(\frac{m_{s,t=0}}{m_{p,t=0}}\right)^{\tilde{\rho}-1} = 1$ ▪ $\tilde{\rho} = 0.5$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $\kappa_s = 0.3085$ ▪ $\kappa_p = 0.6915$ ▪ $\tilde{\rho} = 0.5$ 	-
$A_{p,t=0}, A_{s,t=0}$	Initial labour productivity in primary and secondary mineral production sectors	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $\frac{(1-\alpha-\nu)Y_{t=0}}{A_{p,t=0}} = 3.5e^9$ ▪ $\frac{(1-\alpha-\nu)Y_{t=0}}{A_{s,t=0}} = 3.5e^9$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $A_{p,t=0} = 132000$ ▪ $A_{s,t=0} = 132000$ 	$\frac{MtCu}{Labour}$
ψ	Amount of energy produced (over the course of one period) for 1 unit of green capital	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $\frac{G_{t=0}}{E_{3,t=0}} = 4 tCu/MW$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $\psi = 1.877$ 	$\frac{Gtoe}{Labour}$
$\kappa_G, \kappa_L, \ddot{\rho}$	Green energy production function– substitution and share parameters of labour and green capital inputs	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $\kappa_G + \kappa_L = 1$ ▪ $\frac{\kappa_L}{\kappa_G} \left(\frac{A_{3,t=0}N_{3,t=0}}{\psi G_{t=0}}\right)^{\ddot{\rho}-1} = \frac{1}{3}$ ▪ $\ddot{\rho} = -3$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $\kappa_G = 0.75$ ▪ $\kappa_L = 0.25$ ▪ $\ddot{\rho} = -3$ 	-
$A_{3,t=0}$	Initial labour productivity in green energy sector	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $F(A_{3,t=0}, A_{s,t=0}, A_{p,t=0}) = 1311$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $A_{3,t=0} = 865.14$ 	$\frac{Gtoe}{Labour}$
g_{A3}, g_{As}, g_{Ap}	Growth rate of labour productivities	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $g_{A3}, g_{As}, g_{Ap} = 1.02^{10}$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $g_{A3}, g_{As}, g_{Ap} = 1.02^{10}$ 	-
$M_{s,t=0}, M_{p,t=0}$	Initial primary and secondary mineral stocks	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $M_{s,t=0} = 19 MtCu$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $M_{s,t=0} = 19$ ▪ $M_{p,t=0} = 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 20000, 50000$ 	$MtCu$

Table 3.3 summarizes all the parameter choices and equations used for the calibration. The following paragraphs provide sources and details about the calibration.

$\kappa_s, \kappa_p, \tilde{\rho}$ are the parameters of the green capital CES production function. The relative price of primary mineral to recycled mineral is one [6]. Current primary and recycled copper production is given in [13]. On the one hand, copper is 100% recyclable and does not degrades in the process, so that primary and secondary copper can equivalently be used [20], which suggests a high substitution parameter. On the other hand, if primary and secondary copper were perfect substitutes, the simulation would lead to situations where only the current cheapest industry is active at a time, which is not what is observed in reality, where primary and secondary copper industries coexists. Therefore, we choose a very high substitution parameter, but strictly lower than one. $\tilde{\rho} = 0.5$ is our guess. The choice of this parameter has an impact on the difference between the peak low-carbon energy production, and the long run plateau low-carbon energy production. The better substitutes primary and secondary mineral are, the lower the difference. In the limit, if primary and secondary mineral are perfect substitutes ($\tilde{\rho} = 1$), green energy production in the long run is equal to peak production.

$A_{p,t=0}, A_{s,t=0}$. Primary copper production cost is estimated to 3500\$/tCu [14]. We don't have an estimate for secondary copper production cost, but good quality scrap copper is currently worth 3400\$/tCu. For simplicity, we assume that the total production cost of secondary copper is 3500\$/tCu (including capital and labour cost).

ψ is the amount of wind energy produced over the course of one period for each unit of green capital. It depends on the technology, and especially the location of the wind turbine. Garcia-Olivares (2012) estimates that onshore wind turbines needs 2 tons of copper per MW installed, whereas offshore wind turbines need 10 tons per MW [10]. Copper Development Association's estimation is 2.4 - 6.5 t/MW [5]. We use 4t/MW in order to take into account both onshore and offshore wind turbines, since offshore wind turbines are expected to have a growing role in the future of wind energy production.

$\kappa_G, \kappa_L, \dot{\rho}$ characterize the substitution between labour and green capital input in wind energy production. Labour cost share over capital cost share in wind energy production varies from one country to another, but it is around 1 to 3 on average: labour represents 25% of wind energy production cost, and capital 75% [16]. Knoblach et al. (2020) metastudy estimates that the elasticity of substitution between labour and capital is between 0.45 and 0.87 at the most aggregated level, and that it is 0.2 points lower at the industry level [18].

We take the lowest value of the interval, assuming that green capital is not easily substituted by labor. Therefore, we get an elasticity of substitution of 0.25, which gives a substitution parameter of -3. Arguing that green capital and labour are bad substitutes, we approximate labour input to green capital input ratio to one. With this assumption, we simplify table 3.3 equation to $\frac{\kappa_L}{\kappa_G} = \frac{1}{3}$. This leads to $\kappa_L = 0.25$. This result states that wind energy production is more capital intensive than labour intensive.

$\mathbf{A}_{3,t=0}$. We use proposition (3) to calibrate $A_{3,t=0}$

$\mathbf{g}_{A3}, \mathbf{g}_{As}, \mathbf{g}_{Ap}$. Following GHKT, we assume an annual 2% labour productivity growth rate in each sector.

$\mathbf{M}_{s,t=0}$. We assume that the initial secondary mineral stock corresponds to one year of current primary copper production, that is 19Mt copper.

3.9.2 Proof of Proposition 1

Equation (3.19) This result also holds in GHKT's model; we enhance that the modifications and additions that are specific to our model keep this result and its proof unchanged.

We combine the first order conditions with respect to $N_{0,t}$ and $N_{2,t}$ to obtain the following equality :

$$\lambda_{0,t} \frac{\partial Y_t}{\partial N_{0,t}} = \lambda_{2,t} \frac{\partial E_{2,t}}{\partial N_{2,t}}.$$

Then, the first order conditions with respect to $E_{2,t}$, E_t and S_t give an expression of coal's marginal production cost $\lambda_{2,t}$:

$$\lambda_{2,t} = \lambda_{0,t} \frac{\partial Y_t}{\partial E_t} \frac{\partial E_t}{\partial E_{2,t}} - \lambda_{0,t} \Lambda_t,$$

where the expression of the marginal climate externality damage Λ_t is identical to GHKT. We replace in the first equality $\lambda_{2,t}$ by its expression to obtain result 3.19.

Equation (3.20)

Since we use a new production function for low-carbon energy production (that includes green capital), equation (3.20) differs from GHKT's result, but the proof is analog.

We combine the first order conditions with respect to $N_{0,t}$ and $N_{3,t}$ to obtain the following equality :

$$\lambda_{0,t} \frac{\partial Y_t}{\partial N_{0,t}} = \lambda_{3,t} \frac{\partial E_{3,t}}{\partial N_{3,t}}.$$

Then, we obtain from the first order conditions with respect to $E_{3,t}$ and E_t that

$$\lambda_{3,t} = \lambda_{0,t} \frac{\partial Y_t}{\partial E_t} \frac{\partial E_t}{\partial E_{3,t}},$$

which leads immediately to result (3.20).

Equation (3.21)

Equation (3.21) is specific to our model, since there is no secondary mineral sector in GHKT.

We combine the first order conditions with respect to $N_{0,t}$ and $N_{s,t}$ to obtain :

$$\lambda_{0,t} \frac{\partial Y_t}{\partial N_{0,t}} = \lambda_{s,t} \frac{\partial m_{s,t}}{\partial N_{s,t}}.$$

Then, we get from the first order conditions with respect to $m_{s,t}$ and G_t that :

$$\lambda_{s,t} = \lambda_{3,t} \frac{\partial E_{3,t}}{\partial G_t} \frac{\partial G_t}{\partial m_{s,t}}.$$

Using the intermediate result from the proof of equation (3.20), we obtain :

$$\lambda_{s,t} = \lambda_{0,t} \frac{\partial Y_t}{\partial E_t} \frac{\partial E_t}{\partial E_{3,t}} \frac{\partial E_{3,t}}{\partial G_t} \frac{\partial G_t}{\partial m_{s,t}},$$

which leads to result (3.21).

3.9.3 Proof of Proposition 2

Equation (3.22)

Equation (3.22) and its proof are identical as in GHKT.

The first order conditions with respect to $E_{1,t}$, E_t , and S_t gives

$$\mu_{1,t} = U'(C_t) \frac{\partial Y_t}{\partial E_t} \frac{\partial E_t}{\partial E_{1,t}} + \frac{1}{\beta^t} \sum_{j=t}^T U'(C_j) \frac{\partial Y_j}{\partial S_j} \frac{\partial S_j}{\partial E_{1,t}} \quad (3.29)$$

For readability purposes, denote by A_t the first term in the right-hand side of equation (3.29), and B_t the second term. Then,

$$\mu_{1,t} = A_t + B_t,$$

where $\mu_{1,t}$ is the Lagrange multiplier that stands for oil's scarcity cost.

The first order condition with respect to $R_{1,t+1}$ gives a necessary condition on the evolution of the Lagrange multiplier over time :

$$\mu_{1,t} = \beta \mu_{1,t+1} \quad (3.30)$$

A_t is the contribution of $E_{1,t}$ to final good consumption. Using equations (3.1), (3.4) and (3.5), it becomes :

$$A_t = -\frac{Y_t}{C_t} \frac{\nu \kappa_1}{E_t^\rho E_{1,t}^{1-\rho}}$$

B_t accounts for all the present and future damages induced by a present carbon emission $E_{1,t}$.

Using equations (3.4) and (3.9), we obtain

$$\text{for all } j > t, \quad \frac{\partial Y_j}{\partial S_j} \frac{\partial S_j}{\partial E_{1,t}} = -\gamma_j Y_j (1 + d_{j-t}).$$

Therefore, B_t can be written, after a variable change :

$$B_t = \sum_{j=0}^{T-t} \beta^j \gamma_{t+j} \frac{Y_{t+j}}{C_{t+j}} (1 - d_j).$$

Define

$$\hat{\Lambda}_t = \sum_{j=0}^{T-t} \beta^j \gamma_{t+j} (1 - d_j).$$

Using GHKT's result that the optimal saving rate is constant over time, B_t becomes

$$B_t = \hat{\Lambda}_t \frac{Y_t}{C_t}.$$

Finally, when replacing $\mu_{1,t}$ and $\mu_{1,t+1}$ by their expression in equation (3.30), we obtain result (3.22).

Equation (3.23)

The first order condition with respect to $m_{p,t}$ is

$$\lambda_{p,t} + \mu_{p,t} - \mu_{s,t} - \pi_{G,t} \frac{\partial G_t}{\partial m_{p,t}} = 0.$$

The first order conditions with respect to $N_{p,t}$ and $N_{0,t}$ give :

$$\begin{aligned} \chi_t^N - \lambda_{p,t} \frac{\partial m_{p,t}}{\partial N_{p,t}} &= 0 \\ \chi_t^N - \lambda_{0,t} \frac{\partial Y_t}{\partial N_{0,t}} &= 0. \end{aligned}$$

Therefore,

$$\begin{aligned} \lambda_{p,t} &= \lambda_{0,t} \frac{\partial Y_t / \partial N_{0,t}}{\partial m_{p,t} / \partial N_{p,t}} \\ &= \frac{Y_t}{C_t} \frac{1 - \alpha - \nu}{A_{p,t} N_{0,t}}. \end{aligned}$$

We now have an expression of $\lambda_{p,t}$. Then, consecutively substituting Lagrange multiplier by their expressions obtained from the first order conditions with respect to G_t , $E_{3,t}$, E_t , E_t^0 one obtains

$$\pi_{G,t} = U'(C_t) \cdot \frac{\partial Y_t}{\partial E_t^0} \cdot \frac{\partial E_t}{\partial E_{3,t}} \cdot \frac{\partial E_{3,t}}{\partial G_t}.$$

Finally, the first order conditions with respect to $M_{p,t+1}$ and $M_{s,t+1}$ give:

$$\begin{aligned} \mu_{p,t} - \beta \mu_{p,t+1} &= 0 \\ \mu_{s,t} - \beta \mu_{s,t+1} &= 0, \end{aligned}$$

so that

$$\mu_{p,t} - \mu_{s,t} = \beta(\mu_{p,t+1} - \mu_{s,t+1}).$$

In the end, we obtain equation (3.23).

3.9.4 Proof of Proposition 3

This section provides detail on the analytical resolution of the infinite mineral case. We prove that under some conditions, the infinite mineral case in our modelling is equivalent to GHKT's model. We first aim to express green capital G_t as a function of labour shares $N_{p,t}$ and $N_{s,t}$.

Assume that $M_{p,t=0} = \infty$, $M_{s,t=0} = \infty$, and $g_{As} = g_{Ap} = g_{A3}$. The first order condition with respect to $m_{p,t}$ can be written:

$$\lambda_{p,t} + \mu_{p,t} - \mu_{s,t} - \pi_{G,t} \frac{\partial G_t}{\partial m_{p,t}} = 0.$$

However, since the primary and secondary mineral stocks are infinite, mineral scarcity rents $\mu_{p,t}$ and $\mu_{s,t}$ are equal to zero. Therefore,

$$\lambda_{p,t} = \pi_{G,t} \frac{\partial G_t}{\partial m_{p,t}}. \quad (3.33)$$

Moreover, the first order condition with respect to $N_{p,t}$ gives :

$$-\lambda_{p,t} \frac{\partial m_{p,t}}{\partial N_{p,t}} + \chi_t^N = 0,$$

and the first order condition with respect to $N_{0,t}$ gives :

$$-\lambda_{0,t} \frac{\partial Y_t}{\partial N_{0,t}} + \chi_t^N = 0,$$

so that we have

$$\lambda_{p,t} \frac{\partial m_{p,t}}{\partial N_{p,t}} = \lambda_{0,t} \frac{\partial Y_t}{\partial N_{0,t}}. \quad (3.34)$$

We combine equations 3.33 and 3.34 to obtain :

$$\pi_{G,t} \frac{\partial G_t}{\partial m_{p,t}} \frac{\partial m_{p,t}}{\partial N_{p,t}} = \lambda_{0,t} \frac{\partial Y_t}{\partial N_{0,t}}. \quad (3.35)$$

We repeat the same process with the secondary mineral flow variables $m_{s,t}$ and $N_{s,t}$. The first order condition with respect to $m_{s,t}$ gives :

$$\lambda_{s,t} = \pi_{G,t} \frac{\partial G_t}{\partial m_{s,t}},$$

and the first order conditions with respect to $N_{s,t}$ and $N_{0,t}$ lead to :

$$\lambda_{s,t} \frac{\partial m_{s,t}}{\partial N_{s,t}} = \lambda_{0,t} \frac{\partial Y_t}{\partial N_{0,t}},$$

so that

$$\pi_{G,t} \frac{\partial G_t}{\partial m_{s,t}} \frac{\partial m_{s,t}}{\partial N_{s,t}} = \lambda_{0,t} \frac{\partial Y_t}{\partial N_{0,t}}. \quad (3.36)$$

We combine equations 3.35 and 3.36:

$$\frac{\partial G_t}{\partial m_{s,t}} \frac{\partial m_{s,t}}{\partial N_{s,t}} = \frac{\partial G_t}{\partial m_{p,t}} \frac{\partial m_{p,t}}{\partial N_{p,t}}. \quad (3.37)$$

Equation 3.37 states that labour's marginal contribution to green capital manufacturing in primary and secondary mineral sectors are equal. It extends Proposition 1 result and is only valid when primary and secondary mineral stocks are infinite. Equation 3.37 can now be written using the formula that define G_t as a function of $m_{p,t}$ and $m_{s,t}$:

$$\kappa_p A_{p,t} \left(\frac{G_t}{m_{p,t}} \right)^{1-\tilde{\rho}} = \kappa_s A_{s,t} \left(\frac{G_t}{m_{s,t}} \right)^{1-\tilde{\rho}},$$

which leads to

$$\frac{N_{p,t}}{N_{s,t}} = \frac{A_{s,t}}{A_{p,t}} \left(\frac{\kappa_p A_{p,t}}{\kappa_s A_{s,t}} \right)^{\frac{1}{1-\tilde{\rho}}}.$$

Denote by α_1 the primary to secondary mineral labour shares ratio :

$$\alpha_1 = \frac{A_{s,t}}{A_{p,t}} \left(\frac{\kappa_p A_{p,t}}{\kappa_s A_{s,t}} \right)^{\frac{1}{1-\tilde{\rho}}}.$$

We write the expression of G_t using α_1 :

$$G_t = \left(\kappa_s \left(A_{s,t} \frac{1}{1+\alpha_1} \right)^{\tilde{\rho}} + \kappa_p \left(A_{p,t} \frac{\alpha_1}{1+\alpha_1} \right)^{\tilde{\rho}} \right)^{\frac{1}{\tilde{\rho}}} (N_{p,t} + N_{s,t}),$$

and define the aggregated green capital labour productivity

$$\hat{A}_{G,t} = \left(\kappa_s \left(A_{s,t} \frac{1}{1+\alpha_1} \right)^{\tilde{\rho}} + \kappa_p \left(A_{p,t} \frac{\alpha_1}{1+\alpha_1} \right)^{\tilde{\rho}} \right)^{\frac{1}{\tilde{\rho}}},$$

so that

$$G_t = \hat{A}_{G,t} (N_{p,t} + N_{s,t}). \quad (3.38)$$

Equation 3.38 expresses green capital as a function of primary and secondary labour shares, using the aggregated green capital labour productivity $\widehat{A}_{G,t}$. This result is only valid when mineral stocks are infinite.

Using the intermediate result of equation 3.38, the following steps aim to express low-carbon energy production $E_{3,t}$ as a function of labour shares $N_{p,t}$, $N_{s,t}$ and $N_{3,t}$. Combine equations 3.20 and 3.21 to obtain that low-carbon energy labour and secondary mineral labour's marginal contribution to low-carbon energy production are equal :

$$\frac{\partial E_{3,t}}{\partial N_{3,t}} = \frac{\partial E_{3,t}}{\partial G_t} \frac{\partial G_t}{\partial N_{s,t}}. \quad (3.39)$$

In equation 3.39, we replace $E_{3,t}$ and G_t by their expression :

$$\kappa_L A_{3,t} \left(\frac{E_{3,t}}{A_{3,t} N_{3,t}} \right)^{1-\bar{\rho}} = \kappa_G \psi \widehat{A}_{G,t} \left(\frac{E_{3,t}}{\psi G_t} \right)^{1-\bar{\rho}},$$

which leads, using equation 3.38, to :

$$\frac{N_{3,t}}{N_{s,t} + N_{p,t}} = \frac{\psi \widehat{A}_{G,t}}{A_{3,t}} \left(\frac{\kappa_L A_{3,t}}{\kappa_G \psi \widehat{A}_{G,t}} \right)^{\frac{1}{1-\bar{\rho}}}$$

Denote by α_2 the direct to indirect low-carbon energy labour ratio:

$$\alpha_2 = \frac{\psi \widehat{A}_{G,t}}{A_{3,t}} \left(\frac{\kappa_L A_{3,t}}{\kappa_G \psi \widehat{A}_{G,t}} \right)^{\frac{1}{1-\bar{\rho}}}.$$

We write the expression of $E_{3,t}$ using α_2 :

$$E_{3,t} = \left(\kappa_L \left(A_{3,t} \frac{\alpha_2}{1 + \alpha_2} \right)^{\bar{\rho}} + \kappa_G \left(\psi \widehat{A}_{G,t} \frac{1}{1 + \alpha_2} \right)^{\bar{\rho}} \right)^{\frac{1}{\bar{\rho}}} (N_{3,t} + N_{p,t} + N_{s,t})$$

and define the aggregated low-carbon energy labour productivity

$$\widehat{A}_{3,t} = \left(\kappa_L \left(A_{3,t} \frac{\alpha_2}{1 + \alpha_2} \right)^{\bar{\rho}} + \kappa_G \left(\psi \widehat{A}_{G,t} \frac{1}{1 + \alpha_2} \right)^{\bar{\rho}} \right)^{\frac{1}{\bar{\rho}}},$$

so that

$$E_{3,t} = \widehat{A}_{3,t} (N_{s,t} + N_{p,t} + N_{3,t}). \quad (3.40)$$

Equation 3.40 expresses low-carbon energy as a function of labour shares of all sectors that

are involved in low-carbon energy production. Thus, when primary and secondary mineral stocks are infinite, low-carbon energy production function can be written in a form that is analog to GHKT's low-carbon energy production function. Assume now that the aggregated labour productivity $\hat{A}_{3,t}$ has the same initial value and growth-rate than GHKT's low-carbon energy labour productivity. Then, our model is mathematically equivalent to GHKT's model.

CHAPITRE 4 DISCUSSION GÉNÉRALE

Un certain nombre de caractéristiques de notre modèle sont héritées de la modélisation et de la calibration de Golosov et al. (2014). Nous avons fait le choix de conserver lorsque c'était possible ces similarités, afin de pouvoir comparer les résultats issus de notre modèle avec ceux de GHKT. Ainsi, les seules modifications de paramètres et d'équations que proposent notre modèle touchent à la production d'énergie décarbonée en y ajoutant l'apport de minéral nécessaire. Cependant, certains paramètres de la calibration proposée par GHKT pourraient être discutés.

Tout d'abord, GHKT utilise dans les simulations un paramètre de substitution entre les différentes sources d'énergie (fossiles et décarbonées) négatif, sur la base de l'estimation de Stern (2012). Ainsi, les énergies décarbonées ne peuvent se substituer aux énergies fossiles au niveau macroéconomique, et réciproquement. Or, le principe même de la transition énergétique est de parvenir à une telle substitution. L'estimation de Stern (2012) indique donc que l'état actuel des infrastructures ne permet pas de réaliser cette substitution. Cependant, les technologies et infrastructures évoluent justement pour permettre cette substitution. Par exemple, le secteur du transport automobile est en cours d'électrification dans plusieurs régions du monde afin de diminuer la dépendance aux carburants fossiles. Le fait de considérer un paramètre de substitution entre les sources d'énergie constant et négatif semble donc être une faiblesse dans la modélisation de la transition énergétique. A l'avenir, il pourrait être pertinent d'envisager que ce paramètre puisse augmenter au cours de la simulation, ou, dans une recherche de simplicité, d'utiliser une valeur positive de ce paramètre, qui correspondrait à la valeur projetée que ce paramètre pourrait atteindre.

Ensuite, le paramètre caractérisant les dommages environnementaux, noté γ , utilisé par GHKT, est basé sur des travaux publiés en 2007. La valeur utilisée pour ce paramètre suppose qu'un réchauffement de 2 degrés par rapport au niveau pré-industriel entraîne une perte de PIB de 0.80%. Cela semble étonnamment faible. Dans de futures recherches affranchies de l'impératif de comparabilité avec le modèle de GHKT, nous proposons donc de recalibrer ce paramètre afin de respecter l'objectif de l'accord de Paris de +2 degrés de réchauffement.

Dans notre modèle, nous choisissons de fixer l'intensité matérielle de la production d'énergie décarbonée à un niveau constant, mesuré par le paramètre ψ . Or, cette intensité matérielle pourrait évoluer dans un sens ou l'autre, en fonction des choix et progrès technologiques. Par

exemple, le choix de développer massivement l'éolien offshore amènerait à une augmentation de l'intensité matérielle globale de la filière éolienne. A l'inverse, des innovations technologiques pourraient permettre de réduire l'intensité matérielle de la production d'énergie décarbonée. Cependant, nous considérons qu'il existe certaines limites à la réduction de l'intensité matérielle de ces filières énergétiques. En particulier, la production d'énergie solaire et éolienne consiste en la captation de flux d'énergie très dilué, et nécessite donc de très grandes surfaces de captation, et des infrastructures en conséquence. La forte intensité matérielle de ces filières énergétiques semble donc être intrinsèque au type d'énergie considéré.

Enfin, notre modèle prend en compte les besoins en ressource minérale liés uniquement à la *production* d'énergie décarbonée. Or, comme souligné par Garcia-Olivares (2012), la transition énergétique requiert également un apport très important de ressources minérales pour le développement des infrastructures de stockage et de transport de l'électricité.

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

5.1 Synthèse des travaux

Nous proposons un modèle d'équilibre général dynamique permettant de simuler les sentiers de transition énergétique en prenant en compte l'aspect des ressources minérales. Cette étude s'inscrit donc dans la littérature en réponse à l'appel de multiples institutions internationales à améliorer la prise en compte des enjeux de disponibilité des ressources nécessaires à la transition énergétique. Nous simulons l'impact de plusieurs scénarios de contrainte de disponibilité de ces ressources minérales sur ces sentiers. En particulier, nous montrons comment les sentiers de transition énergétique simulés par un modèle de référence (Golosov et al. (2014)) sont modifiés par de telles contraintes.

Nous montrons que le scénario non-contraint (hypothèse implicite dans GHKT) implique une croissance exponentielle de l'extraction primaire de métaux, au rythme de 1.9% par an. La production secondaire de métal croît au même rythme, de telle sorte que la part de métal recyclé dans le capital vert est constante. A l'inverse, dans les scénarios avec une quantité de ressource minérale finie, la production primaire atteint un pic, qui est compensé par une hausse du taux de recyclage de métaux, si bien que la part de métal recyclé dans le capital vert augmente jusqu'à atteindre 100%. Lorsque la filière de recyclage atteint son maximum de production (c'est-à-dire lorsqu'elle recycle la totalité du stock de déchets de métaux disponible à une période donnée), le capital vert atteint également son maximum. En dépit de l'augmentation continue de la productivité du travail, le taux de croissance de la production d'énergie décarbonée chute. La production d'énergie décarbonée atteint un pic, puis converge vers sa valeur de long terme. En fin de simulation, la production d'énergie décarbonée est stationnaire.

Nos simulations montrent que la contrainte minérale impacte significativement le sentier de production d'énergie décarbonée. Cette contrainte doit donc être prise en compte dans la modélisation de la transition énergétique. Nous identifions les différentes étapes menant graduellement à la limitation de la production d'énergie décarbonée, et proposons une estimation des dates de ces événements.

5.2 Limites

A l’instar de GHKT, notre modélisation est très macroéconomique. En particulier, notre modèle fait l’approximation d’une firme représentative dans chaque secteur. L’hétérogénéité des entreprises et la dimension géopolitique sont donc ignorées. Cette dernière est pourtant essentielle dans les secteurs de production des ressources minérales (avec la répartition inégale des ressources sur la planète, certains pays sont en situation de monopole pour ces ressources stratégiques).

Une autre simplification importante réalisée est la réduction à une seule source d’énergie décarbonée, et à un seul type de minéral. La diversité des sources d’énergies décarbonées, des technologies de captation et de transformation de ces énergies, des ressources nécessaires à ces technologies sont donc également ignorées ici. Nous pensons toutefois que ces simplifications sont raisonnables pour un modèle visant à représenter les effets macroéconomiques en jeu, sur le long terme.

L’objectif de notre recherche étant de simuler l’impact de la contrainte de disponibilité d’une ressource minérale sur le modèle de GHKT, notre modèle reprend l’essentiel des caractéristiques de GHKT. En particulier, les simulations de GHKT sont réalisées avec un paramètre de substitution entre les différentes sources d’énergie constant et négatif ($\rho = -0.058$), sur la base d’une méta-étude de 2012 [24]. Or, le paramètre de substitution entre les différents vecteurs d’énergie (carburants fossiles et électricité) dépend des infrastructures et technologies utilisées. Il peut donc évoluer, et en particulier augmenter, avec l’adaptation des infrastructures. Par exemple, l’électricité peut se substituer aux carburants fossiles dans le secteur du transport automobile, à condition que les véhicules à essence soient remplacés par des véhicules hybrides ou électriques. La transition énergétique consiste donc à la fois en une évolution du mix énergétique, et en une adaptation des infrastructures pour les rendre compatibles avec cette évolution. Le modèle de GHKT, en utilisant un paramètre de substitution entre sources d’énergies constant et égal à sa valeur actuelle estimée (donc négatif), considère que les infrastructures ne permettent pas la substitution des carburants fossiles par l’électricité provenant des sources d’énergie décarbonée, et que ceci ne peut évoluer. La croissance de la production d’énergie décarbonée est donc portée uniquement par le progrès de la productivité du travail dans ce secteur, et non également par la nécessité de substituer l’énergie décarbonée aux énergies fossiles.

5.3 Recommandations

La section précédente souligne plusieurs limites de cette étude. Il serait pertinent d'explorer certaines de ces limites dans de futures recherches. En particulier, la dimension géopolitique du marché de ces ressources minérales stratégiques pourrait être intégrée dans de futurs modèles. Ensuite, nous recommandons d'ajouter au modèle la possibilité de faire varier le paramètre de substitution entre les différentes sources d'énergie au cours de la simulation, afin de mieux représenter l'évolution des infrastructures au cours de la transition énergétique.

RÉFÉRENCES

- [1] D. L. P. Arrobas *et al.*, *The growing role of minerals and metals for a low carbon future*. World Bank Group, 2017.
- [2] British Petroleum, *BP Energy Outlook*, 2019.
- [3] ———, *Statistical Review of World Energy*, 2019.
- [4] Canadian Institute of Mining. (2014) CIM definition standards for mineral resources mineral reserves. [En ligne]. Disponible : <https://mrmr.cim.org/en/standards/canadian-mineral-resource-and-mineral-reserve-definitions>
- [5] Copper Development Association. (2018) Copper in wind power 2. [En ligne]. Disponible : <https://copperalliance.org.uk/knowledge-base/education/education-resources/copper-wind-power-2/>
- [6] Copper Development Association Inc. (2020) Copper in the USA : Bright future glorious past. [En ligne]. Disponible : https://www.copper.org/education/history/us-history/g_fact_future.html
- [7] European Commission, *Study on the review of the list of critical raw materials*, 2017.
- [8] ———, *Report on critical raw materials and the circular economy*, 2018.
- [9] A. Fabre, M. Fodha, and F. Ricci, “Mineral resources for renewable energy : optimal timing of energy production,” *Resource and Energy Economics*, vol. 59, p. 101131, 2020.
- [10] A. García-Olivares *et al.*, “A global renewable mix with proven technologies and common materials,” *Energy Policy*, vol. 41, pp. 561–574, 2012.
- [11] M. Golosov *et al.*, “Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium,” *Econometrica*, vol. 82, no. 1, pp. 41–88, 2014.
- [12] E. G. Hertwich *et al.*, “Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112, no. 20, pp. 6277–6282, 2015.
- [13] International Copper Study Group. (2020) Copper : Preliminary data for october 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.icsg.org/index.php/component/jdownloads/finish/114/2993?Itemid=>
- [14] International Council on Mining and Metals, *The role of mining in national economies*, 2014.
- [15] International Energy Agency, *IEA World Energy Outlook*, 2019.

- [16] International Renewable Energy Agency, *Renewable Energy Cost Analysis - Wind Power*, 2012.
- [17] K. M. Johnson *et al.*, “Estimate of undiscovered copper resources of the world, 2013,” *US Geological Survey Fact Sheet*, vol. 3004, p. 2014, 2014.
- [18] M. Knoblach, M. Roessler, and P. Zwerschke, “The elasticity of substitution between capital and labour in the US economy : A meta-regression analysis,” *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, vol. 82, no. 1, pp. 62–82, 2020.
- [19] L. D. Meinert, G. R. Robinson, and N. T. Nassar, “Mineral resources : Reserves, peak production and the future,” *Resources*, vol. 5, no. 1, p. 14, 2016.
- [20] National Resources Canada. (2019) Copper facts. [En ligne]. Disponible : <https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/minerals-mining/minerals-metals-facts/copper-facts/20506>
- [21] S. Northey *et al.*, “Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 83, pp. 190–201, 2014.
- [22] G. Pitron, *La guerre des métaux rares. La face cachée de la transition énergétique et numérique*. Les Liens qui Libèrent, 2018.
- [23] N. Rötzer and M. Schmidt, “Decreasing metal ore grades—is the fear of resource depletion justified?” *Resources*, vol. 7, no. 4, p. 88, 2018.
- [24] D. I. Stern, “Interfuel substitution : a meta-analysis,” *Journal of Economic Surveys*, vol. 26, no. 2, pp. 307–331, 2012.
- [25] United Nations Environmental Program, *Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential*, 2009.
- [26] —, *Metal Recycling – Opportunities, Limits, Infrastructure*, 2013.
- [27] US Department of Energy, *Critical Materials Strategy*, 2011.
- [28] US Geological Survey, “Assessment of undiscovered deposits of gold, silver, copper, lead, and zinc in the united states,” *US Geological Survey Circular 1178*, p. 19, 1998.
- [29] O. Vidal, B. Goffé, and N. Arndt, “Metals for a low-carbon society,” *Nature Geoscience*, vol. 6, no. 11, p. 894, 2013.
- [30] O. Vidal *et al.*, “Global trends in metal consumption and supply : the raw material–energy nexus,” *Elements : An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, vol. 13, no. 5, pp. 319–324, 2017.