

Titre: Aura-t-on assez de métaux pour réaliser la transition énergétique d'ici à 2050? Évaluation de la flexibilité technologique pour atténuer les risques de pénuries métalliques
Title:

Auteur: Pénélope Bieuville
Author:

Date: 2024

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Bieuville, P. (2024). Aura-t-on assez de métaux pour réaliser la transition énergétique d'ici à 2050? Évaluation de la flexibilité technologique pour atténuer les risques de pénuries métalliques [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/61666/>
Citation:

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/61666/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Guillaume Majeau-Bettez, & Anne De Bortoli
Advisors:

Programme: Génie chimique
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Aura-t-on assez de métaux pour réaliser la transition énergétique d'ici à 2050 ?

**Évaluation de la flexibilité technologique
pour atténuer les risques de pénuries métalliques**

PÉNÉLOPE BIEUVILLE

Département de génie chimique

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

Génie chimique

Décembre 2024

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Aura-t-on assez de métaux pour réaliser la transition énergétique d'ici à 2050 ?
Évaluation de la flexibilité technologique
pour atténuer les risques de pénuries métalliques**

présenté par **Pénélope BIEUVILLE**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Anne-Marie BOULAY, présidente

Guillaume MAJEAU-BETTEZ, membre et directeur de recherche

Anne DE BORTOLI, membre et codirectrice de recherche

Romain BILLY, membre

DÉDICACE

*À ma très chère grand-mère, Brigitte Bieuville, née Guton,
dont les convictions féministes ont transcendé les générations
et m'ont donné la force de croire que rien ne m'était impossible . . .*

*À ma sœur, Bérénice Bieuville, au courage impressionnant,
qui m'a transmis son amour inconditionnel pour la nature
et qui m'inspire à envisager une nouvelle vision du monde . . .*

*À mon meilleur ami et plus grand soutien, Baptiste Matagrín,
avec qui je construirai, je l'espère, ce village en pleine nature,
rempli de vie, d'art, de danse et de joie . . .*

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mes directeurs de recherche, Guillaume Majeau-Bettez et Anne De Bortoli. J'aimerais remercier Guillaume de m'avoir offert l'opportunité de travailler au CIRAIG et de m'avoir fait découvrir le monde de la recherche, ces deux années ont réellement été une expérience extraordinaire pour moi. Merci d'avoir été à l'écoute tout au long de ma maîtrise, et d'avoir priorisé le bien-être des étudiants avant le résultat final de notre travail. Je souhaiterais également exprimer ma reconnaissance envers Anne, pour les conseils qu'elle m'a partagés et l'empathie dont elle a toujours fait preuve. Je les remercie tous les deux pour les échanges enrichissants que nous avons eus lors de nos réunions, qui ont nourri mon enthousiasme pour ma recherche. J'aimerais vous remercier d'avoir autant revalorisé mon travail ; cela m'a aidée à renforcer ma confiance et à aller plus loin dans mon projet.

Je souhaite également remercier CREATE SEED pour le partage de connaissances interdisciplinaire. C'était un plaisir de partager l'Analyse de Cycle de Vie à des personnes extérieures du secteur environnemental et de voir l'engouement pour cette méthode. Merci de m'avoir fait découvrir d'autres recherches provenant de secteurs variés.

J'aimerais exprimer ma gratitude envers les étudiants qui m'ont aidé durant mon parcours au CIRAIG, et sans qui ma recherche n'aurait pas été la même. J'aimerais remercier Marguerite Fauroux, de m'avoir accompagnée lors de la collecte et la compréhension de données de l'AIE. Je souhaiterais remercier Han de Watcher pour son inclusion au début de mon parcours et pour son assistance durant la rédaction de mon code. J'aimerais également remercier Titouan Greffe, pour son partage de connaissances sur les métaux et sa curiosité pour les projets autour de lui, qui ont mené à de nombreuses discussions passionnantes. J'aimerais le remercier ainsi que les étudiants du 4ème étage, et plus précisément Juliette Louvet, Marie Lourieux, Louisa Ospital, Nadim Saadi et Mael Mouhoub, pour les belles discussions aux pauses café, les couchers de soleil, les vendredis soutiens, les déjeuners d'anniversaire au parc, qui ont permis de transformer mes journées de travail en des moments de joie et de partage.

Finalement, j'aimerais exprimer ma gratitude envers toutes les personnes du CIRAIG pour m'avoir accompagnée durant ces deux années. J'aimerais vous remercier pour les discussions passionnantes, les rires, le soutien indéfectible, les échanges de valeur, et les merveilleux souvenirs que je garderai à mon retour en France.

RÉSUMÉ

CONTEXTE

La transition énergétique, cruciale pour atténuer les changements climatiques, fait face à de potentiels défis de pénuries de métaux stratégiques. Malgré cela, les six modèles d'évaluation intégrée (IAM) utilisés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour produire des projections de demande future en énergie ne tiennent pas compte de la disponibilité des métaux, entraînant la génération de voies technologiques potentiellement irréalistes. D'autre part, la plupart des études sur la demande prospective de métaux se basent sur un mix énergétique fixe, bien que les recherches soulignent une variabilité significative dans la quantité et le type de métaux requis en fonction des sources d'énergie utilisées. L'intégration d'une flexibilité technologique dans les projections de mix énergétique est donc essentielle pour garantir des voies de transition réalisables.

A quel point les mix IAM doivent être modifiés, grâce à l'ajout de flexibilité aux technologies génératrices d'énergie, afin de répondre à la demande en énergie dans les limites de l'offre métallique ?

OBJECTIFS

1. Évaluer la faisabilité des projections énergétiques des IAM et identifier les métaux susceptibles de faire face à une pénurie pour différents scénarios socio-économiques et climatiques
2. Analyser le potentiel des mix technologiques flexibles pour réduire la demande de métaux critiques en dessous des contraintes de disponibilité et de production
3. Identifier les technologies à privilégier afin de réaliser la transition énergétique en réduisant les risques liés aux contraintes de métaux

MÉTHODOLOGIE

Les contraintes liées aux métaux sont évaluées à partir des projections énergétiques de six IAM, à travers divers objectifs climatiques (RCP) et narratifs socio-économiques (SSP) jusqu'en 2050. Après avoir ajouté de la résolution technologique, les besoins en métaux pour le secteur de l'énergie sont quantifiés en multipliant les projections de puissance désagrégées

des IAM et l'intensité métallique des technologies. La demande en métaux dans d'autres secteurs clés de la transition (véhicules électriques, réseau, stockage) est estimée à partir de la littérature existante, tandis que la demande du reste de l'économie suit la croissance du produit intérieur brut (PIB). La faisabilité des projections des IAM est évaluée en comparant la demande cumulative en métaux avec les ressources disponibles. La production minière future, extrapolée à partir des tendances historiques et des données de la littérature, est comparée aux projections de la demande annuelle.

Un algorithme d'optimisation est ensuite développé pour générer un mix énergétique techno-flexible, identifiant les ajustements minimaux requis à chaque mix technologique IAM, afin de répondre à la demande énergétique projetée, sans dépasser les limites de disponibilité des ressources et de production. Les capacités des combustibles fossiles sont fixées pour empêcher une augmentation de l'impact climatique. Afin de s'assurer que le mix généré soit réalisable dans les limites biophysiques, les installations potentielles de biomasse et d'hydro-électricité sont plafonnées respectivement par décennie et par région, en fonction des données de la littérature. La faisabilité en termes d'approvisionnement en métaux du nouveau mix technologique est ensuite évaluée en utilisant la même méthodologie que pour le mix IAM initial.

En calculant la différence, pour chaque source d'énergie, entre les capacités énergétiques installées dans le mix initial et dans le mix techno-flexible, pour chaque IAM et chaque scénario SSP RCP, les principales recommandations pour les investissements technologiques sont soulignées.

RÉSULTATS

Les résultats sont présentés pour le RCP 2.6, qui vise à limiter l'augmentation de température à 2°C d'ici 2100 par rapport à l'ère préindustrielle, et les récits SSP 1, 2, 4 et 5.

L'étude met en évidence l'infaisabilité des projections énergétiques de la plupart des IAM. Tous les scénarios SSP nécessitent plus de ressources que celles disponibles pour le sélénium, l'argent et le tellure. Si la production minière suit les tendances historiques, elle sera insuffisante pour répondre à la demande en métaux du réseau électrique et du stockage (cuivre, cobalt, nickel, vanadium). Une pénurie est également anticipée pour les métaux utilisés dans les aimants permanents des éoliennes et des véhicules électriques (dysprosium, néodyme, terbium). Enfin, la demande métallique annuelle pour les technologies solaires (argent, gallium, germanium, indium, sélénium) dépasse également la production minière.

L'intégration des métaux dans les projections de mix énergétique est cruciale, car les choix technologiques influencent fortement la demande du secteur énergétique. L'introduction de flexibilité dans les mix technologiques a considérablement réduit la demande en métal au sein du secteur énergétique. L'ajustement des choix d'investissement technologique a permis d'éviter les contraintes de ressources pour le tellure dans tous les scénarios SSP étudiés et pour le sélénium dans tous les scénarios sauf le SSP5. Il a également éliminé les contraintes d'approvisionnement annuelles pour plusieurs métaux à travers divers scénarios. Cependant, certains métaux restent problématiques même après optimisation, notamment le cobalt, le cuivre, le nickel et le vanadium. La flexibilité à elle seule reste insuffisante pour atténuer pleinement les risques d'approvisionnement, compte tenu de la forte demande des autres secteurs de la transition et de l'économie au sens large.

Pour minimiser la demande en métaux critiques dans le secteur énergétique, il est essentiel de réduire les investissements dans les technologies solaires à couches minces et le solaire thermodynamique à concentration (CSP). Il est recommandé de remplacer les conducteurs en argent dans les technologies solaires cristallines à base de silicium par des conducteurs en cuivre. L'utilisation d'aimants permanents dans les technologies éoliennes devrait être limitée, et être privilégiée pour des applications en mer. L'augmentation de l'installation d'éoliennes à boîte de vitesses permettrait de remplacer les technologies à aimant permanent sur terre. Enfin, une plus grande intégration de la biomasse, tout en minimisant les impacts sur l'utilisation des terres, pourrait aider à substituer des sources d'énergie qui dépendent fortement des métaux.

CONCLUSION

Il est essentiel d'intégrer la demande en métaux dans les projections de mix énergétiques pour garantir leur faisabilité en termes d'approvisionnement. Revoir les stratégies minières futures pour répondre à la demande croissante de métaux critiques identifiés dans cette étude sera crucial pour mener à bien la transition énergétique et limiter le réchauffement climatique. Nous espérons également que nos conclusions orienteront la production et la recherche des industries vers des technologies à faible demande en métaux critiques et encourageront les décideurs à soutenir ces projets par des politiques et aides financières ciblées. Cependant, la flexibilité seule ne suffira pas à atteindre les objectifs de transition énergétique dans les limites des ressources disponibles. L'intégration de scénarios d'économie circulaire et de la flexibilité technologique pour les batteries de véhicules électriques sera des pistes explorées dans la suite de ce travail.

ABSTRACT

CONTEXT

The energy transition, crucial for mitigating climate change, faces potential challenges from shortages of strategic metals. Despite this, the six Integrated Assessment Models (IAM) used by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) to generate future power demand do not account for metal availability, resulting in potentially unrealistic technological pathways. In contrast, most prospective metal demand studies are based on a fixed energy mix, even though research highlights significant variability in the amount and the type of metals required depending on the energy sources used. Incorporating technological flexibility into energy mix projections is thus essential to ensure feasible transition pathways.

How much do IAM mixes need to be modified, through the addition of flexibility to energy generating technologies, in order to meet energy demand within the limits of metal supply ?

OBJECTIVES

1. Assess the feasibility of IAM energy projections and identify metal bottlenecks for different socio-economic and climate scenarios
2. Analyze the potential of flexible technological mixes to reduce demand for critical metals below availability constraints
3. Highlight technologies to prioritize in order to achieve the energy transition while reducing the risks linked to metal constraints

METHODOLOGY

Metal constraints are assessed in the power projections of six IAMs across various socio-economic narratives (SSP) and climate targets (RCP) until 2050. After adding technological resolution, metal requirements for the energy sector are quantified by multiplying disaggregated IAM power projections and metal intensity of technologies. Metal demand in other key sectors of the transition (electric vehicles, grid, storage) is estimated using existing literature, while broader economic demand follows Gross Domestic Product growth (GDP). The feasibility of IAM projections is evaluated by comparing cumulative metal demand with available

resources. Future mining production, extrapolated from historical trends and literature data, is analyzed against projections of annual demand.

An optimization algorithm is then developed to generate a techno-flexible energy mix, identifying the minimum adjustments required to each IAM-based power mix to meet projected energy demands, without exceeding resource availability and estimated production. Fossil fuel capacities are capped to prevent increased climate impact. To ensure that the optimized mix is feasible in terms of bioresources, the potential biomass and hydraulic installations are limited respectively per decade and region based on literature data. The metal supply feasibility of the new technological mix is then assessed using the same methodology as for the initial IAM mix.

By calculating the difference between the initial IAM power capacities and the techno-flexible mix, for every IAM and SSP RCP scenario, key recommendations for technological investments are highlighted.

RESULTS

Results are presented for the RCP 2.6, that aims to limit the temperature increase to 2°C by 2100 compared to the pre-industrial era, and the SSP narratives 1, 2, 4 and 5.

The study highlights the infeasibility of most IAMs's energy projections. All SSP scenarios require more resources than are available for selenium, silver, and tellurium. If mining production follows historical trends, it will be insufficient to meet metal demand for the electric grid and storage (copper, cobalt, nickel, vanadium). A shortage is also anticipated for metals essential to permanent magnets in wind turbines and electric vehicles (dysprosium, neodymium, terbium). Finally, annual metal demand for solar technologies (silver, gallium, germanium, indium, selenium) also exceeds mining production.

Integrating metal demand into energy mix projections is crucial, as technological choices greatly impact the sector's metal requirements. Introducing flexibility into technological mixes has substantially reduced metal demand within the energy sector. Adjusting technology investment choices has prevented resource constraints for tellurium across all SSP scenarios studied and for selenium in all but SSP5. It has also eliminated annual supply constraints for several metals across various scenarios. However, certain metals remain challenging even after optimization, including cobalt, copper, nickel, and vanadium. Flexibility

alone remains insufficient to fully alleviate supply risks, given the high demand from other transition sectors and the broader economy.

To minimize critical metal demand in the energy sector, it is crucial to reduce investments in thin-film solar and concentrated solar power (CSP) technologies. Replacing silver conductors in silicon-based crystalline solar technologies with copper conductors is recommended. The use of permanent magnets in wind technologies should be limited, with a preference for offshore applications. Increasing the installation of gearbox-based wind turbines could serve as a replacement for onshore permanent magnet technologies. Lastly, enhancing the integration of biomass while minimizing land-use impacts could help substitute for energy sources that rely heavily on metals.

CONCLUSION

It is essential to integrate metal demand into future energy mix projections to ensure their feasibility in terms of supply. Revisiting mining strategies to meet the growing demand for critical metals highlighted in this study will be crucial for achieving the energy transition and limiting climate change. We also hope our conclusions will guide industries' production and research toward low metal-demand technologies and encourage policymakers to support these projects with targeted policies and financial aid. However, flexibility alone will not be sufficient to meet energy transition goals within available resource limits. Integrating circular economy scenarios and introducing technological flexibility for electric vehicle batteries are avenues that will be explored in the continuation of this work.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIÈRES	xi
LISTE DES TABLEAUX	xvi
LISTE DES FIGURES	xvii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xxiii
LISTE DES ANNEXES	xxv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Modélisations de la transition énergétique à partir de trajectoires socio-économiques et climatiques futures	1
1.1.1 Contexte des modélisations de transition énergétique : le rôle des ins- titutions du CMIP et du GIEC	1
1.1.2 Projections de mix énergétiques par six IAM marqueurs à partir de narratifs SSP-RCP	2
1.2 Risque de l'exclusion des métaux dans les modélisations énergétiques	5
1.2.1 Dénominations des métaux à risque : rares, critiques et stratégiques	5
1.2.2 Risque d'épuisement des réserves et ressources minières	6
1.3 Contexte du projet et plan du mémoire	6
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	8
2.1 Évaluation des contraintes d'accessibilité en métaux destinés à la transition énergétique dans la littérature	8
2.1.1 Étude des réserves	8
2.1.2 Intégration de la production minière	8
2.1.3 Estimation de la demande du reste de l'économie	9

2.2	Mix énergétiques utilisés pour évaluer la demande en métaux dans la littérature	10
2.2.1	Recherches basées sur les mix énergétiques des IAM	10
2.2.2	Projections de demande matérielle à partir de mix énergétiques immuables	10
2.3	Problématique et objectifs de l'étude	11
2.3.1	Problématique de l'étude	11
2.3.2	Objectif 1 : Évaluer la faisabilité des projections énergétiques IAM et identifier les métaux contraints en disponibilité pour différents scénarios sociopolitiques et climatiques	12
2.3.3	Objectif 2 : Analyser le potentiel de la flexibilité des mix technologiques pour diminuer la demande de métaux en deçà des contraintes de disponibilité	13
2.3.4	Objectif 3 : Identifier les technologies à privilégier afin de réaliser la transition énergétique en réduisant les risques liés aux contraintes de métaux	13
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DE L'ACCESSIBILITÉ DES MÉTAUX		15
3.1	Délimiter le périmètre d'étude	15
3.1.1	Déterminer la résolution temporelle et régionale	15
3.1.2	Définir les technologies et métaux à l'étude	16
3.2	Estimer la demande en métal du secteur de l'énergie	17
3.2.1	Désagréger les capacités de puissance IAM	18
3.2.2	Évaluer l'intensité métallique des sources d'énergie dans le temps	20
3.2.3	Estimer les pertes minières	21
3.2.4	Calculer la demande en métal du secteur de l'énergie	22
3.3	Estimer la demande des autres secteurs de la transition (OTD)	23
3.3.1	Collecter et traiter les données de l'AIE	23
3.3.2	Associer les scénarios SSP-RCP et les scénarios de l'AIE	24
3.4	Estimer la demande des autres secteurs de l'économie (OSD)	25
3.4.1	Collecter les données d'OSD de la littérature	25
3.4.2	Estimer l'OSD selon l'évolution du Produit Intérieur Brut (PIB)	25
3.5	Estimer l'offre en métaux, en termes de disponibilité dans la croûte terrestre et d'accessibilité dans le temps	27
3.5.1	Collecter les données de réserves et de ressources	27
3.5.2	Estimer la production minière future	27

3.6	Évaluer la faisabilité métallique des scénarios IAM initiaux	29
3.6.1	Évaluer le potentiel épuisement des ressources	29
3.6.2	Évaluer la capacité de la production minière annuelle à répondre à la demande en métal	29
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE D’AJOUT DE FLEXIBILITÉ AU MIX ÉNER- GÉTIQUE PAR UNE APPROCHE D’OPTIMISATION		30
4.1	Définir les sous-technologies pour lesquelles une interchangeabilité est considérée	30
4.1.1	Analyser le potentiel de substitution au sein des technologies éoliennes	30
4.1.2	Analyser le potentiel de substitution au sein des technologies solaires photovoltaïques	31
4.1.3	Analyser le potentiel de substitution au sein des sous-technologies so- laires à concentration	32
4.1.4	Ajouter de la flexibilité au modèle	32
4.2	Définir le Modèle d’optimisation	33
4.2.1	Choisir le type de modèle d’optimisation	33
4.2.2	Définir les ensembles à l’étude	34
4.2.3	Définir les variables	35
4.3	Traduire en équation l’objectif et les contraintes	36
4.3.1	Objectif	36
4.3.2	Contrainte de Demande en Énergie	37
4.3.3	Contrainte de Cohérence du Mix Technologique dans le temps	39
4.3.4	Contrainte de Plafonnement de l’investissement Fossile	39
4.3.5	Contrainte de Ressources en Métal	40
4.3.6	Contrainte de Production Minière	40
4.3.7	Contraintes d’Accès aux sources d’énergie	41
4.4	Conclure sur la faisabilité du mix techno flexible et évaluer des technologies à recommander	45
4.4.1	Évaluer la faisabilité du mix techno flexible	45
4.4.2	Identifier des technologies à prioriser pour la transition énergétique	45
CHAPITRE 5 RÉSULTATS		46
5.1	Outil logiciel	46
5.1.1	Informations générales nécessaires à l’utilisation de l’outil logiciel	46
5.1.2	Paramètres choisis par l’utilisateur	47
5.1.3	Méthodes de l’outil logiciel	47
5.1.4	Résultats générés par l’outil logiciel	49

5.2	Analyse des résultats du scénario SSP2 RCP2.6	49
5.2.1	Description des caractéristiques du scénario à l'étude	49
5.2.2	Comparaison de la demande cumulée en métaux du scénario IAM et du scénario flexible avec les données de réserves et ressources	51
5.2.3	Comparaison de la demande annuelle en métaux du scénario IAM et du scénario optimisé avec le potentiel de production	53
5.2.4	Variation technologique nécessaire afin de diminuer la demande en métaux du secteur de l'énergie	56
5.3	Résumé des grandes tendances du scénario RCP 2.6 selon différents narratifs SSP	58
5.3.1	Facteurs d'influence du narratif SSP sur la demande en métal	59
5.3.2	Demande cumulée en métaux selon les narratifs SSP	60
5.3.3	Demande annuelle en métaux selon les narratifs SSP	61
5.3.4	Variation de puissance à apporter aux IAM selon les narratifs SSP	63
CHAPITRE 6 DISCUSSION		65
6.1	Synthèse des résultats et atteinte des objectifs	65
6.1.1	Objectif 1 : Évaluer la faisabilité des projections énergétiques IAM et identifier les métaux contraints en disponibilité pour différents scénarios sociopolitiques et climatiques	65
6.1.2	Objectif 2 : Analyser le potentiel de la flexibilité des mix technologiques pour diminuer la demande de métaux en deçà des contraintes de disponibilité	66
6.1.3	Objectif 3 : Identifier les technologies à privilégier afin de réaliser la transition énergétique en réduisant les risques liés aux contraintes de métaux	67
6.2	Limites de l'étude et pistes de solution	68
6.2.1	Incertitude liée aux méthodes d'estimation de la demande en métal	68
6.2.2	Incertitude liée aux méthodes d'estimation de l'offre en métal	70
6.2.3	Exclusion de facteurs clés dans la mise en place d'un nouveau mix énergétique et le déploiement de la production minière	71
6.3	Pistes de recherches futures	72
6.3.1	Considérer d'autres mix énergétiques	72
6.3.2	Intégrer les dynamiques de circularité des métaux	73
6.3.3	Ajouter de la flexibilité aux autres secteurs de la transition	74
CHAPITRE 7 CONCLUSION		75

7.1 Synthèse des travaux	75
7.2 Recommandations	75
RÉFÉRENCES	78
ANNEXES	91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Augmentation de température par scénario RCP	3
Tableau 1.2	Marqueur IAM par SSP	4
Tableau 3.1	Résolution technologique des IAM	18
Tableau 3.2	Réduction annuelle de l'intensité métallique des métaux	20
Tableau 3.3	Mappage des scénarios de l'AIE et SSP-RCP	25
Tableau 3.4	Estimations de la production métallique (t) à partir des données de l'AIE	28
Tableau 4.1	Sous-technologies supposées interchangeables	33
Tableau 4.2	Facteurs de charge des sources d'énergie	38
Tableau 4.3	Résumé des hypothèses adoptées dans les scénarios de potentiel d'installation de la biomasse	42
Tableau 4.4	Potentiel d'installation de la biomasse (GW) de 2020 à 2050	43
Tableau 4.5	Résumé des hypothèses adoptées dans les scénarios de potentiel d'installation de l'hydroélectricité	44
Tableau 4.6	Potentiel d'installation de l'hydroélectricité (GW) par région	45
Tableau 5.1	Taux de croissance annuel moyen par SSP du PIB par habitant (2010-2100)	59
Tableau A.1	Résumé des narratifs SSP	91
Tableau C.1	Liste de métaux à l'étude	93
Tableau D.1	Liste des sources d'énergie à l'étude	94
Tableau F.1	Définitions des paramètres et sections du mémoire où ils sont calculés	101
Tableau G.1	Parts de marché des sous-technologies éoliennes terrestres par année .	102
Tableau G.2	Parts de marché des sous-technologies éoliennes maritimes par année	102
Tableau G.3	Parts de marché des sous-technologies solaires PV par année	102
Tableau G.4	Parts de marché des sous-technologies CSP, fixe dans le temps	102
Tableau H.1	Classification des métaux structurels et spécifiques	103
Tableau I.1	Taux de récupération par métal	104
Tableau J.1	Estimation de la demande en métaux du reste de l'économie dans la littérature	105
Tableau K.1	Estimation de l'augmentation de production annuelle β par métal . .	106
Tableau L.1	Ressources et réserves par métal	107

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Description des 5 scénarios SSP	3
Figure 3.1	Description de la chaîne de valeur du minerai	21
Figure 5.1	Évolution de la puissance installée cumulée en GW de 2020 à 2050 par source d'énergie. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP1-26 modélisé par IMAGE, après désagrégation des sous-technologies, mais sans ajout de flexibilité au mix technologique. Par souci de visualisation, les sous-technologies solaires à couches fines sont regroupées en une seule catégorie (rose). Les technologies éoliennes sont regroupées selon qu'elles soient terrestres (Onshore, en clair) ou maritimes (Offshore, en foncé), et qu'elles soient construites avec aimant permanent (PM, en violet) ou sans (noPM, en bleu)	50
Figure 5.2	Demande cumulée par métaux en tonnes en 2050 nécessaires à la transition énergétique, divisée entre : le secteur énergétique (jaune), les autres secteurs de la transition (orange), et le reste de l'économie (gris). La variation de la demande du secteur énergétique dû à l'ajout de flexibilité technologique par l'optimisation est représentée par une réduction (jaune hachuré) ou une augmentation (rouge) de la demande. La consommation est évaluée par rapport aux réserves (pointillés bleu) et aux ressources (pointillés rouges). Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP1-26 modélisé par IMAGE, avec un alpha de 5	52
Figure 5.3	Demande annuelle par métaux en tonnes par an de 2020 à 2050 nécessaire à la transition énergétique, divisée par : secteur énergétique (jaune), autres secteurs de la transition (orange), et reste de l'économie (gris clair, lorsque basé sur les données de la littérature, et gris foncé, lorsque dérivé de la croissance économique). La variation de la demande du secteur énergétique dû à l'ajout de flexibilité technologique par l'optimisation est représentée selon que ce soit une réduction (en jaune hachuré) ou une augmentation (en rouge) de la demande. La consommation est évaluée face au potentiel de production annuelle (pointillés violets si basés sur les données de l'AIE et pointillés bleus si dérivés des tendances historiques). Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP1-26 modélisé par IMAGE, avec un alpha de 5.	55

Figure 5.4	Variation d’installation de capacité de puissances cumulées mondiales en GW, par décennie, entre le scénario IAM initialement à l’étude (SSP1-26 IMAGE) et le nouveau mix de puissance généré par le logiciel d’optimisation après ajout de flexibilité au mix technologique. Les technologies dont la valeur se trouve au-dessus de 0 sont celles pour lesquelles l’installation de capacité de puissance a été augmentée, celles en dessous de 0 ont une diminution de leur puissance installée. Pour la facilité de lecture, les technologies solaires à couches fines (thin film, rose), suivant des tendances similaires, ont été agrégées. De même, les technologies éoliennes avec aimant permanent (PM, violet) et sans (noPM, bleu) sont regroupées selon chaque lieu d’installation : terrestre (Onshore, clair) et maritime (Offshore, foncé).	57
Figure 5.5	Évolution de la puissance installée cumulée en GW de 2020 à 2050 par source d’énergie, après ajout de flexibilité avec le logiciel d’optimisation. Résultats s’appuyant sur les données du scénario SSP2-26 modélisé par MESSAGE-GLOBIOM, après désagrégation des sous-technologies, mais sans ajout de flexibilité au mix technologique. Par souci de visualisation, les sous-technologies solaires à couches fines sont regroupées en une seule catégorie (rose). Les technologies éoliennes sont regroupées selon qu’elles soient terrestres (Onshore, en clair) ou maritimes (Offshore, en foncé), et qu’elles soient construites avec aimant permanent (PM, en violet) ou sans (noPM, en bleu)	58
Figure B.1	Le fonctionnement des IAM	92
Figure M.1	Évolution de la puissance installée cumulée en GW de 2020 à 2050 par source d’énergie. Résultats s’appuyant sur les données du scénario SSP2-26 modélisé par MESSAGE-GLOBIOM, après désagrégation des sous-technologies, mais sans ajout de flexibilité au mix technologique. Par souci de visualisation, les sous-technologies solaires à couches fines sont regroupées en une seule catégorie (rose). Les technologies éoliennes sont regroupées selon qu’elles soient terrestres (Onshore, en clair) ou maritimes (Offshore, en foncé), et qu’elles soient construites avec aimant permanent (PM, en violet) ou sans (noPM, en bleu)	108

Figure M.2	Évolution de la puissance installée cumulée en GW de 2020 à 2050 par source d'énergie. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP4-26 modélisé par GCAM4, après désagrégation des sous-technologies, mais sans ajout de flexibilité au mix technologique. Par souci de visualisation, les sous-technologies solaires à couches fines sont regroupées en une seule catégorie (rose). Les technologies éoliennes sont regroupées selon qu'elles soient terrestres (Onshore, en clair) ou maritimes (Offshore, en foncé), et qu'elles soient construites avec aimant permanent (PM, en violet) ou sans (noPM, en bleu)	109
Figure M.3	Évolution de la puissance installée cumulée en GW de 2020 à 2050 par source d'énergie. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP5-26 modélisé par REMIND-MAGPIE, après désagrégation des sous-technologies, mais sans ajout de flexibilité au mix technologique. Par souci de visualisation, les sous-technologies solaires à couches fines sont regroupées en une seule catégorie (rose). Les technologies éoliennes sont regroupées selon qu'elles soient terrestres (Onshore, en clair) ou maritimes (Offshore, en foncé), et qu'elles soient construites avec aimant permanent (PM, en violet) ou sans (noPM, en bleu)	110
Figure N.1	Demande cumulée en tonnes par métaux en 2050 nécessaires à la transition énergétique, divisée par secteur, et comparée aux réserves et aux ressources. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP2-26 modélisé par MESSAGE-GLOBIOM, avec un alpha de 5.	111
Figure N.2	Demande cumulée en tonnes par métaux en 2050 nécessaires à la transition énergétique, divisée par secteur, et comparée aux réserves et aux ressources. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP4-26 modélisé par GCAM4, avec un alpha de 5	112
Figure N.3	Demande cumulée en tonnes par métaux en 2050 nécessaires à la transition énergétique, divisée par secteur, et comparée aux réserves et aux ressources. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP5-26 modélisé par REMIND MAGPIE, avec un alpha de 5	113
Figure O.1	Demande annuelle par métaux en tonnes par an de 2020 à 2050 nécessaire à la transition énergétique comparée au potentiel de production annuelle. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP2-26 modélisé par MESSAGE-GLOBIOM, avec un alpha de 5.	114

- Figure P.3 Variation d'installation de capacité de puissances cumulées mondiales en GW, par décennie, entre le scénario IAM initialement à l'étude (SSP5-26 REMIND-MAGPIE) et le nouveau mix de puissance généré par le logiciel après ajout de flexibilité au mix technologique. Les technologies dont la valeur se trouve au-dessus de 0 sont celles pour lesquelles l'installation de capacité de puissance a été augmentée, celles en dessous de 0 ont une diminution de leur puissance installée. Pour la facilité de lecture, les technologies solaires à couches fines (thin film, rose), suivant des tendances similaires, ont été agrégées. De même, les technologies éoliennes avec aimant permanent (PM, violet) et sans (noPM, bleu) sont regroupées selon chaque lieu d'installation : terrestre (Onshore, clair) et maritime (Offshore, foncé). 119
- Figure Q.1 Évolution de la puissance installée cumulée en GW de 2020 à 2050 par source d'énergie. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP2-26 modélisé par MESSAGE-GLOBIOM, après désagrégation des sous-technologies et ajout de flexibilité au mix technologique. Par souci de visualisation, les sous-technologies solaires à couches fines sont regroupées en une seule catégorie (rose). Les technologies éoliennes sont regroupées selon qu'elles soient terrestres (Onshore, en clair) ou maritimes (Offshore, en foncé), et qu'elles soient construites avec aimant permanent (PM, en violet) ou sans (noPM, en bleu) 120
- Figure Q.2 Évolution de la puissance installée cumulée en GW de 2020 à 2050 par source d'énergie. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP4-26 modélisé par GCAM4, après désagrégation des sous-technologies et ajout de flexibilité au mix technologique. Par souci de visualisation, les sous-technologies solaires à couches fines sont regroupées en une seule catégorie (rose). Les technologies éoliennes sont regroupées selon qu'elles soient terrestres (Onshore, en clair) ou maritimes (Offshore, en foncé), et qu'elles soient construites avec aimant permanent (PM, en violet) ou sans (noPM, en bleu) 121

Figure Q.3 Évolution de la puissance installée cumulée en GW de 2020 à 2050 par source d'énergie. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP5-26 modélisé par REMIND-MAGPIE, après désagrégation des sous-technologies et ajout de flexibilité au mix technologique. Par souci de visualisation, les sous-technologies solaires à couches fines sont regroupées en une seule catégorie (rose). Les technologies éoliennes sont regroupées selon qu'elles soient terrestres (Onshore, en clair) ou maritimes (Offshore, en foncé), et qu'elles soient construites avec aimant permanent (PM, en violet) ou sans (noPM, en bleu) 122

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS ¹

AIE	Agence Internationale de l'Énergie
CSP	Centrale Solaire thermique à Concentration
DD	Entraînement direct
ETD	Demande en métaux des sources d'énergie
FC	Facteur de Charge
Foss_Coal	Charbon fossile
Foss_Hydrogen	Hydrogène fossile
Foss_NaturalGas	Gaz naturel fossile
Foss_Oil	Pétrole fossile
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat
GB	Boîte de vitesse
Hydro	Centrale hydraulique
IIASA	Institut International pour l'Analyse des Systèmes Appliqués
IAM	Modèles d'Évaluation Intégrés
IM	Intensité Métallique
MS	Parts de Marché
OTD	Demande en métaux des Autres secteurs de la Transition (<i>Stockage, réseau, véhicules électriques</i>)
OSD	Demande en métaux des Autres Secteurs de l'économie
PIB	Produit Intérieur Brut
RCP	Profils représentatifs d'évolution de concentration
SSP	Profils socioéconomiques partagés
Sol_C-si_Copper	Solaire cristallin silicium avec conducteur en cuivre
Sol_C-si_Silver	Solaire cristallin silicium avec conducteur en argent
Sol_CdTe	Cellules solaires à couches fines Cadmium Tellure
Sol_CIGS	Cellules solaires à couches fines Cuivre Indium Gallium Sélénium
Sol_a-SiGe	Cellules solaires à couches fines Silicium amorphe-Germanium
Sol_CSP_parabol	Centrale Solaire thermique à Concentration parabolique
Sol_CSP_tower	Centrale Solaire thermique à Concentration en tour
Wind_DD-EESG	Éolienne à générateur synchrone à excitation électrique
Wind_DD-PMSG	Éolienne à générateur synchrone à aimants permanents

1. Des abréviations utilisées dans ce rapport sont en anglais, étant leur utilisation la plus usuelle, mais sont définies en français dans la table des abréviations pour clarifier leur signification.

Wind_GB-DFIG	Éolienne à générateur à Induction à Double Alimentation
Wind_GB-PMSG	Éolienne hybride boîte de vitesse et générateur synchrone à aimants permanents
Wind_GB-SCIG	Éolienne à générateur à Induction à Cage d'Écureuil

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Narratifs des différents SSP	91
Annexe B	Le fonctionnement des IAM	92
Annexe C	Liste des métaux intégrés à l'étude	93
Annexe D	Liste des sources d'énergie intégrées à l'étude	94
Annexe E	Description des sous-technologies de l'éolien et du solaire	95
Annexe F	Liste des paramètres	101
Annexe G	Parts de marché des sous-technologies considérées dans l'étude	102
Annexe H	Tableau de répartition des métaux structurels et spécifiques	103
Annexe I	Données et sources de données des taux de récupération	104
Annexe J	Estimation de la demande en métaux du reste de l'économie provenant de la littérature	105
Annexe K	Hypothèses de calcul de l'évolution de la production métallique	106
Annexe L	Données et sources de données des ressources et réserves	107
Annexe M	Évolution de la puissance mondiale initiale du scénario RCP 2.6, pour différents SSP	108
Annexe N	Comparaison de la demande cumulée en métal du scénario RCP 2.6 aux ressources, pour différents SSP	111
Annexe O	Comparaison de la demande annuelle en métal du scénario RCP 2.6 à la production, pour différents SSP	114
Annexe P	Variation de capacités de puissance installées par technologie du RCP 2.6, pour différents SSP	117
Annexe Q	Évolution de la puissance mondiale optimisée du scénario RCP 2.6, pour différents SSP	120

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Le secteur de l'énergie représentait 73 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) en 2016 [1]. Selon le rapport de l'IRENA, la transition vers les énergies renouvelables pourrait considérablement réduire ces émissions au cours des trente prochaines années [2]. Les objectifs climatiques de l'Accord de Paris visent à limiter l'augmentation de la température mondiale à bien moins de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels d'ici 2100, tout en poursuivant les efforts pour restreindre cette hausse à 1,5°C [3]. Pour atteindre ces objectifs, il est largement admis que la transition vers un mix énergétique à faible intensité carbone est cruciale. Parmi les dix solutions clés mises en avant par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour atténuer le changement climatique, trois sont directement liées à la transition énergétique : fermer les centrales à charbon, investir dans les énergies propres et l'efficacité énergétique, et passer aux véhicules électriques [4]. Cependant, certaines technologies à faibles émissions de carbone, telles que le solaire, l'éolien, et les véhicules électriques (VE), dépendent fortement de métaux stratégiques ou critiques [5–8], dont l'approvisionnement pourrait être contraint à l'avenir.

1.1 Modélisations de la transition énergétique à partir de trajectoires socio-économiques et climatiques futures

Diverses institutions de recherche scientifique ont été créées pour aider les décideurs politiques à prendre les meilleures décisions afin de limiter les changements climatiques tout en atténuant les potentiels impacts sociaux et économiques. Ces institutions emploient des modèles visant à reproduire la société de manière aussi réaliste que possible, afin d'évaluer l'impact de différentes décisions politiques sur les systèmes économiques et biophysiques. Ces modélisations sont, entre autres, utilisées comme outils d'aide à la décision pour choisir les technologies à déployer pour répondre à la demande énergétique future.

1.1.1 Contexte des modélisations de transition énergétique : le rôle des institutions du CMIP et du GIEC

Des dizaines d'institutions à travers le monde produisent leurs propres modèles climatiques, continuellement améliorés pour reproduire les processus climatiques globaux avec précision. Chaque centre pouvant se concentrer sur des processus ou régions spécifiques, tous les 5 à 7 ans ces institutions collaborent pour mener une série coordonnée de simulations dans

le cadre du **Projet d'Intercomparaison de Modèles Couplés** (CMIP) [9]. Ce projet permet de comparer les performances des modèles, de produire des projections climatiques plus solides en combinant les résultats des différentes institutions, et de quantifier l'incertitude des projections. Les résultats du CMIP sont ensuite utilisés lors des évaluations et rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

Le **GIEC**, composé de 195 pays membres, est l'organisme des Nations Unies chargé d'évaluer les connaissances scientifiques liées au changement climatique. Le groupe fournit des informations scientifiques aux décideurs afin d'orienter les politiques nationales sur les changements climatiques. Le travail du GIEC est réparti en trois groupes de travail. Le premier groupe évalue les éléments scientifiques des changements climatiques. Le second travaille sur les conséquences des changements climatiques, la vulnérabilité et l'adaptation à ceux-ci. Enfin, le troisième groupe évalue les mesures d'atténuation des changements climatiques [10].

La **phase 6 du projet CMIP**, organisé par le Programme Mondial de Recherche sur le Climat (PMRC), offre un cadre pour coordonner les efforts des groupes de modélisation climatique. Ce cadre définit des narratifs d'étude comme les profils socio-économiques partagés (SSP) qui sont combinés à des scénarios de profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP). Ces scénarios ont, entre autres, été utilisés lors de la rédaction du sixième Rapport d'évaluation du GIEC (2021).

1.1.2 Projections de mix énergétiques par six IAM marqueurs à partir de narratifs SSP-RCP

Les **Profils Socio-économiques Partagés** (« Shared Socioeconomic Pathway », ou « SSP » en anglais) sont cinq narratifs de potentielle évolution socio-économique de notre société jusqu'à l'horizon 2100 (décrits en annexe A). Les SSP sont associés à différentes politiques climatiques, et utilisés entre autres par le GIEC pour élaborer des projections d'émission de GES [11]. Ces scénarios sont définis par une description qualitative d'évolution systémique mondiale [12]. Ils s'accompagnent également d'hypothèses quantitatives sur la croissance économique [13], la croissance démographique, l'urbanisation [14] ou encore le mix énergétique futur [15, 16]. La figure 1.1 résume les différents narratifs SSP selon la potentielle apparition d'enjeux de mitigation¹ et d'adaptation² [4].

1. Atténuation à la source des changements climatiques, en réduisant les émissions de GES dans l'atmosphère

2. Méthode d'anticipation et de prise de mesures pour limiter les effets néfastes du changement climatique

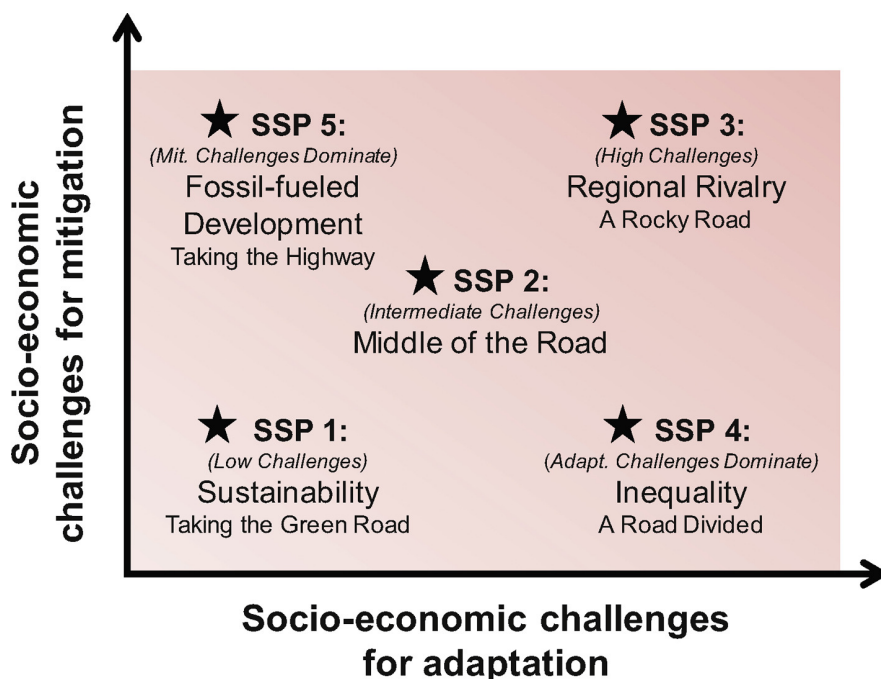


FIGURE 1.1 Description des 5 scénarios SSP, reproduit de [12]

Les **Profils Représentatifs d'évolution de Concentration** (« Representative Concentration Pathway », ou « RCP » en anglais) sont des scénarios de modélisation du climat futur créés lors de la rédaction du 5e rapport du GIEC [17]. Ces scénarios sont caractérisés par une projection de futur forçage radiatif en $[W/m^2]$ jusqu'à l'horizon 2100, correspondant à une quantité totale de CO_2 eq (ppm) émise dans l'atmosphère³. Bien que l'augmentation de la température dépende d'autres facteurs, nous établissons dans le tableau 1.1 une approximation de corrélation entre les scénarios RCP et l'augmentation de la température en 2100 par rapport au niveau préindustriel [18, 19].

TABLEAU 1.1 Augmentation de température par scénario RCP

RCP	Augmentation de température d'ici 2100	Description du scénario
RCP 1.9	< 1.5°C	Accords de Paris
RCP 2.6	< 2°C	Très stricte
RCP 3.4	2 - 2,4°C	Assez plausible
RCP 4.5	3,2°C	Base line scenario, très plausible
RCP 6.0	3 - 4°C	Pessimiste

3. Par exemple, un scénario RCP 2.6 correspond à un forçage radiatif de + 2,6 $[W/m^2]$ en 2100, soit 400 ppm émises.

Les scénarios RCP sont associés aux narratifs SSP afin de réaliser des projections d'évolution future de la société. Toutes les modélisations SSP-RCP n'existent pas. Certaines, considérées comme infaisables, car les combinaisons SSP et RCP sont incompatibles, n'ont pas permis aux modèles IAM de tourner et de fournir des résultats. Par exemple, le narratif SSP1 est incompatible avec le forçage du scénario RCP 6.0.

Les **modèles d'évaluation intégrés** (« Integrated Assessment Models », ou « IAM » en anglais) sont des modèles utilisés pour soutenir la prise de décision politique en matière de changements climatiques. Ces modèles sont largement utilisés dans la littérature scientifique [20], et popularisés entre autres par leur utilisation dans les projections du GIEC [11]. Ils visent à représenter de la manière la plus réaliste possible les interactions entre différentes sphères de notre société : économie, biosphère, atmosphère, système énergétique, climatique [21]. À partir des quantifications des scénarios SSP-RCP, les IAM produisent des projections de l'utilisation des terres, des émissions de différents polluants et de mix énergétiques futurs [15] (définition de l'IAM en annexe B). Parmi les projections réalisées par les IAM, des « modèles marqueurs » ont été sélectionnés comme étant représentatifs des dynamiques globales propres à chaque SSP (Tab. 1.2). La sélection de ces marqueurs repose sur deux critères principaux : la cohérence interne des scénarios SSP et la capacité des différents modèles à représenter des caractéristiques distinctives de chaque scénario [16].

TABLEAU 1.2 Marqueur IAM par SSP, reproduit de [15]

SSP	Narratif SSP	IAM représentatif	Egalement modélisé par
SSP1	Durabilité	IMAGE	Tous
SSP2	Baseline	MESSAGE-GLOBIOM	Tous
SSP3	Rivalité régionale	AIM/CGE	IMAGE, GCAM, MESSAGE-GLOBIOM, WITCH-GLOBIOM
SSP4	Inégalité	GCAM4	AIM/CGE, WITCH-GLOBIOM
SSP5	Développement des énergies fossiles	REMIND-MAgPIE	AIM/CGE, GCAM, WITCH-GLOBIOM

C'est dans le cadre du sixième rapport d'évaluation (Sixth Assessment Report, AR6) élaboré par le groupe de travail III du GIEC (Working Group III, WGIII), que des analyses

quantitatives de divers scénarios SSP-RCP ont été menées à l'aide de six IAM. Les résultats de ces analyses ont ensuite été compilés dans une base de données [22]. La base de données de l'AR6 peut être téléchargée sur la plateforme d'hébergement de l'Institut International pour l'Analyse des Systèmes Appliqués (IIASA) [23]. Ce sont ces données, et plus particulièrement les projections de mix énergétiques futures, qui vont servir de base à notre étude.

1.2 Risque de l'exclusion des métaux dans les modélisations énergétiques

Bien que les modélisations des IAM intègrent de nombreux facteurs, elles excluent la consommation de métaux liée à la transition énergétique, ainsi que les réserves et la production minière future. Les projections énergétiques pourraient donc se révéler irréalisables, faute de ressources métalliques et de capacités de production suffisantes.

1.2.1 Dénominations des métaux à risque : rares, critiques et stratégiques

Face au risque d'épuisement des métaux, diverses classifications ont émergé pour catégoriser les métaux en fonction de leur degré de rareté.

Les **métaux rares**, tels que l'indium, le cobalt ou l'antimoine, sont des éléments peu abondants ou peu disponibles en gisements exploitables dans la croûte terrestre. Les terres rares, un groupe de dix-sept métaux comprenant le dysprosium, le néodyme, et le terbium, possèdent des propriétés spécifiques (légèreté, résistance, stockage d'énergie, etc.) qui les rendent non substituables et indispensables dans diverses technologies, notamment pour les transitions énergétiques et numériques. Bien que leur concentration dans la croûte terrestre soit élevée, les terres rares sont rarement présentes en gisements exploitables et se trouvent souvent à l'état de traces [24, 25].

Les **métaux stratégiques** sont définis comme indispensables à la politique économique d'un État, en raison de leur utilisation dans des secteurs clés comme la sécurité, la défense ou encore la politique énergétique. Un métal peut également être considéré comme stratégique pour une filière industrielle spécifique comme l'aéronautique ou l'électronique. Les métaux considérés dans cette catégorie varient donc d'une organisation à une autre [24].

Les **métaux** sont définis **critiques** par le gouvernement canadien s'ils sont

essentiels à la sécurité économique du Canada et menacés de problèmes d'approvisionnement, ou nécessaires à la transition vers une économie à faibles émissions

de carbone ou [encore] une source durable de minéraux critiques particulièrement stratégiques pour nos partenaires et alliés

Source : [26]

1.2.2 Risque d'épuisement des réserves et ressources minières

Afin d'estimer le risque d'approvisionnement en métaux, il est nécessaire d'évaluer leur disponibilité dans la croûte terrestre. Cette quantification est réglementée, et classifiée selon des termes précis. Selon les définitions de l'Association Minière du Québec en 2022 :

Une **ressource minérale** est une concentration ou une occurrence de diamants, d'une substance inorganique solide naturelle incluant les métaux de base et les métaux précieux. Cette ressource est d'une teneur ou d'une qualité telle qu'elle présente des perspectives raisonnables d'extraction rentable. [...]

Les **réserves minérales** désignent la partie économiquement exploitable des ressources minérales [...], démontrée par au moins une étude préliminaire de faisabilité. L'étude doit inclure les renseignements adéquats sur l'exploitation minière, le traitement, la métallurgie, les aspects économiques et les autres facteurs pertinents démontrant qu'il est possible, au moment de la rédaction du rapport, de justifier l'extraction rentable.

Source : [27]

Le temps d'épuisement des ressources extraites globales n'est pas suffisant pour fournir un mécanisme de prix d'alerte précoce de l'épuisement des minéraux [28]. Les dynamiques de marché ne suffisent donc pas à éviter la consommation de l'ensemble des ressources. Par conséquent, il est crucial de considérer les métaux dans les modèles climatiques afin de prévenir l'utilisation de l'ensemble des ressources métalliques.

1.3 Contexte du projet et plan du mémoire

Projet FASC L'étude réalisée s'inscrit dans le projet de Fonds d'Action et de Sensibilisation pour le Climat (FASC), commandité par Environnement et Changement climatique Canada. Ce projet vise à améliorer la compréhension des enjeux de durabilité liés à la transition énergétique et à la demande croissante en métaux stratégiques et critiques (MSC) dans le monde et au Canada. Pour ce faire, seront étudiés les besoins en MSC pour la transition vers le net-zéro du Canada, la capacité du pays à répondre à sa propre demande et à la demande

mondiale, ainsi que les défis potentiels qui pourraient limiter cette capacité. En examinant les impacts socio-économiques et environnementaux de l'exploitation des ressources minières, le projet fournira des recommandations pour minimiser les effets néfastes et maximiser les bénéfices, contribuant ainsi aux discussions politiques et aux pratiques durables dans le secteur minier pour un avenir net-zéro.

Plan du mémoire Dans ce mémoire, l'étude se focalise sur l'évaluation des besoins en métaux ainsi que sur la capacité mondiale à satisfaire cette demande. Dans un premier temps, le Chapitre 2 présente une revue de la littérature sur les différentes méthodes de quantification de la demande en métaux et les risques d'approvisionnement, tout en identifiant les lacunes dans la littérature scientifique. La problématique et les objectifs de l'étude seront également présentés dans le Chapitre 2. Ensuite, le Chapitre 3 expose notre méthode de quantification de la demande en métaux pour la transition énergétique, ainsi que l'ensemble des secteurs de l'économie, en incluant l'estimation des contraintes en ressources et du potentiel de production minière. Le Chapitre 4 présente la méthode appliquée pour ajouter de la flexibilité au mix technologique nécessaire à la génération d'énergie, à partir du développement d'un code d'optimisation. Le code produit ainsi que certains résultats de modélisations spécifiques sont présentés au Chapitre 5. Enfin, au Chapitre 6, nous comparerons les résultats obtenus à nos objectifs d'étude initiaux, discuterons de l'impact des hypothèses de modélisation sur les résultats et proposerons des pistes pour des recherches futures.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Entre 2010 et 2020, le nombre de publications évaluant la disponibilité des métaux a triplé, en raison de la demande accrue en métaux générée par la transition énergétique [29]. Des tendances méthodologiques et des défis communs dans les approches de modélisation émergent de la littérature [30, 31]. Cette revue a pour objectif de mettre en lumière ces tendances et d'identifier les lacunes potentielles dans les recherches sur la disponibilité future des métaux.

2.1 Évaluation des contraintes d'accessibilité en métaux destinés à la transition énergétique dans la littérature

2.1.1 Étude des réserves

De nombreuses études comparent la demande cumulée de métaux pour le secteur de l'énergie aux estimations des réserves disponibles [29]. La plupart des recherches se concentrent sur les technologies solaires, éoliennes et les véhicules électriques (VE) [32], qui nécessitent des quantités importantes de métaux stratégiques et dont la production devrait croître rapidement dans les prochaines décennies [5]. Kavlak et al., par exemple, ont étudié les technologies solaires, soulignant un risque d'épuisement du tellure et de l'indium d'ici 2030 [33]. Deux autres études, basées sur les scénarios énergétiques de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), ont exploré les besoins en métaux pour le solaire, l'éolien et les VE, mettant en évidence la possible raréfaction des réserves de nickel, de sélénium, de lithium et de tellure d'ici 2060 [34, 35]. Certaines analyses adoptent une perspective plus large, intégrant d'autres sources d'énergie dans leur périmètre. Tokimatsu, par exemple, montre que l'épuisement des réserves d'indium pourrait également compromettre le développement du nucléaire, en plus des risques déjà identifiés pour le solaire et les VE [36]. Månberger et al. montrent un potentiel épuisement des réserves de dysprosium, de tellure et de gallium, utilisés dans le solaire et l'éolien, ainsi qu'un potentiel épuisement du lithium et du nickel destinés aux VE. Mais le potentiel de déplétion des réserves n'est pas la seule menace sur la disponibilité des métaux [34].

2.1.2 Intégration de la production minière

Une transition rapide vers un mix technologique à faible émission de carbone nécessiterait une augmentation accélérée de la production minière, ce qui pourrait représenter un obstacle

à court terme pour la transition [33]. Pourtant, les limites imposées par la production minière sont moins étudiées que l'épuisement des réserves. La majorité des études le prenant en compte présupposent une production fixe basée sur les taux d'extraction actuels [7, 34–36], malgré la croissance historique continue de la production de métaux [37, 38]. Des estimations plus précises ont été réalisées par le passé, mais dans des contextes d'étude restreints. Par exemple, Kavlak compare le taux de croissance de production historique avec celui nécessaire pour satisfaire la demande en métaux dans le secteur solaire uniquement [33]. De son côté, Mc Nulty a effectué une projection détaillée de la production de tellure, en tenant compte de sa relation de co-produit avec le cuivre et en intégrant différents taux de récupération potentiels [39]. McLellan réalise quatre projections de production minière, selon une production constante, une extrapolation linéaire et une extrapolation des taux de croissance d'une année sur l'autre de 2002 à 2012, et enfin en utilisant une courbe d'Hubbert pour sept métaux du solaire et de l'éolien [40]. En effet, le modèle d'Hubbert est parfois utilisé pour modéliser la production de métaux selon la même dynamique que les combustibles fossiles. Ces projections supposent une production suivant des courbes en cloche, basées sur les réserves et ressources disponibles de chaque métal [41, 42]. À titre d'exemple, Valero et al. comparent la demande annuelle en métaux avec une production projetée selon ce modèle [43]. Toutefois, l'incertitude concernant les données de ressources, et l'impact significatif de la demande et des nouvelles technologies sur les tendances de production minière soulèvent des doutes quant à la fiabilité du modèle d'Hubbert pour estimer la production [44]. Il est donc nécessaire de considérer d'autres estimations de potentiels de production minière dans des contextes d'étude incluant un grand nombre de métaux, de technologies et ne se limitant pas au secteur de l'énergie.

2.1.3 Estimation de la demande du reste de l'économie

Bien que les contraintes d'accès aux métaux soient beaucoup étudiées dans le cadre de la transition énergétique, peu d'études prennent en compte la demande destinée au reste de l'économie, bien qu'elle soit majeure pour de nombreux métaux [45]. Certains travaux de la littérature utilisent des analyses de flux de matières pour estimer la demande en métaux de secteurs économiques précis, mais ces études se concentrent généralement sur un métal seulement [46]. La demande en métaux du reste de l'économie est intégrée par Valero et al., mais en étant considérée comme constante dans le temps [43], en dépit de l'augmentation historique de cette demande [37, 38]. Watari a proposé une méthode d'estimation plus précise en utilisant une approche top-down et une corrélation quadratique entre la demande de métaux et la croissance économique, mais cette analyse se limite aux métaux des technologies solaires, éoliennes, et des VE [35]. Pourtant, des secteurs comme les télécommunications, les dispositifs médicaux et la robotique nécessitent également des métaux critiques [32]. Ac-

tuellement, la demande en métaux du secteur énergétique reste marginale pour la majorité des métaux par rapport aux autres secteurs [45]. Il est donc essentiel d'intégrer le reste de l'économie aux projections de demande afin de ne pas la sous-estimer.

2.2 Mix énergétiques utilisés pour évaluer la demande en métaux dans la littérature

2.2.1 Recherches basées sur les mix énergétiques des IAM

Les IAM n'intègrent pas les potentielles restrictions en ressources métalliques et en production minière lors de la génération de mix énergétiques prospectifs. Négliger la disponibilité des métaux pourrait aboutir à projeter des trajectoires technologiques de production énergétique irréalisables. Différentes études ont évalué la faisabilité des projections IAM par rapport aux contraintes de réserves de métaux. Par exemple, l'étude de Deetman et al. se base sur l'IAM IMAGE et le scénario SSP2 pour comparer la demande annuelle de métaux avec la production actuelle [47]. Sokhna Seck et al. ont comparé les ressources de cobalt à la demande cumulée nécessaire à générer le mix énergétique de l'IAM TIAM-IFPEN [48]. De son côté, l'étude de Boubault et al. a intégré les métaux dans les processus technologiques de l'IAM TIMES, mais sans inclure de contraintes d'approvisionnement [49]. Enfin, la demande en métaux de scénarios modélisés avec différents IAM a été comparée dans deux études. La première, visant à limiter le réchauffement à 1,5 °C, se concentre sur les technologies du solaire et de l'éolien [50], et montre que dans presque tous les scénarios étudiés, les réserves actuellement connues de tellure, sélénium et dysprosium viendraient à manquer. La seconde étude englobe un éventail plus large de technologies pour un objectif de 2 °C, et indique un potentiel déficit en production minière pour le néodyme, le dysprosium, le tellure et le silicium [51]. Les projections technicoéconomiques sous contraintes climatiques réalisées avec l'aide des IAM étant largement utilisées par les décideurs politiques [4], il est essentiel d'y intégrer les restrictions de métaux afin de générer des mix énergétiques réalistes, compatibles avec les limites de métaux.

2.2.2 Projections de demande matérielle à partir de mix énergétiques immuables

La majorité des études quantifiant la demande de métaux future fondent leurs projections de mix énergétiques sur des scénarios préexistants, tels que le *World Energy Outlook* de l'AIE [52] et les résultats d'IAM [30]. Ces études font donc l'hypothèse d'un mix énergétique fixe. Une certaine flexibilité peut être introduite par une multiplication de scénarios énergétiques et climatiques [6, 35, 36, 40, 48, 53] ou par une variation dans les sous-technologies considérées,

en faisant varier par exemple les parts de marché des cellules solaires à couches fines ou des éoliennes à aimants permanents [7, 34]. Cependant, les considérations de flexibilité restent limitées, alors que le type et la quantité de métaux nécessaires pour générer l'énergie varient grandement selon la technologie utilisée [36, 54, 55]. Le choix des technologies et des parts de marché des sous-technologies prises en compte peut considérablement modifier les résultats de la demande de métaux. Par exemple, selon la proportion de cellules à couche fine de Tellure de Cadmium (CdTe) utilisée dans le secteur solaire, la demande en cadmium et en tellure peut augmenter de 11 000 à 13 000 % [56]. Il serait prématuré de conclure à l'impossibilité d'une transition énergétique en raison d'une potentielle pénurie de ressources métalliques, sans envisager la possibilité d'un mix technologique alternatif, la transition pouvant s'appuyer sur des technologies bas carbone nécessitant moins de métaux critiques.

2.3 Problématique et objectifs de l'étude

2.3.1 Problématique de l'étude

D'une part, les six IAM utilisés par le GIEC pour projeter les scénarios de demande énergétique ne tiennent pas compte des limitations liées aux métaux, générant des voies technologiques potentiellement irréalistes. D'autre part, la plupart des études prospectives sur la demande de métaux se basent sur ces mix énergétiques fixes, malgré la variabilité des besoins en métaux en fonction des sources d'énergie utilisées.

Pourtant, nous avons un large choix de sources d'énergie bas carbone pour générer le mix énergétique de la transition (ex : solaire, éolien, biomasse...). Ces technologies ayant des caractéristiques très différentes, le remplacement de l'une par l'autre a un impact sur de nombreux facteurs, qui devra être pénalisé dans l'analyse. Mais au sein d'un même groupe technologique, il existe également une importante variabilité de sous-technologies ayant des caractéristiques et des usages très similaires (ex : technologies solaires à couches fines). Ces sous-technologies peuvent être considérées interchangeables dans le mix, et permettre un important levier d'action sur la demande en métal du secteur énergétique. Ajouter cette flexibilité technologique aux projections de mix énergétique est essentiel pour garantir des voies de transition réalisables.

A quel point les mix IAM doivent être modifiés, grâce à l'ajout de flexibilité aux technologies génératrices d'énergie, afin de répondre à la demande en énergie dans les limites de l'offre métallique ?

Délimitation du champ d'étude Notre étude se concentrera sur la demande en métaux liée au secteur énergétique, tandis que celle des autres secteurs de l'économie sera intégrée de manière approximative, à travers des estimations moins détaillées. La priorité étant donnée à la flexibilité du secteur énergétique, seuls les métaux utilisés dans les technologies de production d'énergie seront étudiés, en excluant ceux, comme le lithium, essentiels à d'autres secteurs de la transition. L'objectif est d'évaluer la pertinence des mix énergétiques IAM comme outils d'aide à la décision pour atteindre les objectifs climatiques à moyen terme dans les limites en métaux. L'horizon de l'étude est donc limité à 2050. Par ailleurs, étant donné que la part des technologies renouvelables installées avant 2020 est faible [23] et que la durée de vie de la plupart des sources d'énergie dépasse 30 ans [8, 36], la fin de vie des technologies ne sera pas intégrée. Les métaux requis pour la transition énergétique étant majoritairement utilisés dans des technologies émergentes, il est supposé que les stocks dans la société sont encore faibles, limitant ainsi le potentiel de production secondaire. Enfin, en ce qui concerne les autres métaux, la demande des autres secteurs étant évaluée de manière approximative, l'exclusion du recyclage devrait avoir un impact marginal sur les résultats.

Pour répondre à la problématique dans le champ d'étude défini précédemment, trois objectifs ont été établis à partir des lacunes identifiées dans la littérature.

2.3.2 Objectif 1 : Évaluer la faisabilité des projections énergétiques IAM et identifier les métaux contraints en disponibilité pour différents scénarios sociopolitiques et climatiques

Sous-Objectif 1.1 : Estimer la demande future en métaux dans un contexte de transition énergétique

Dans un premier temps, l'objectif est de quantifier la demande des métaux de la transition, en intégrant l'ensemble des secteurs de l'économie (section 2.1.3).

Sous-Objectif 1.2 : Estimer l'offre en métaux, en termes de réserves, de ressources, et de capacité de production minière

Dans un second temps, l'objectif est de quantifier l'offre de métaux, en ne se limitant pas seulement aux contraintes de disponibilité dans la croûte terrestre (section 2.1.1), mais en incluant également la disponibilité des métaux sur le marché (section 2.1.2).

Sous-Objectif 1.3 : Conclure sur la faisabilité des mix IAM, ainsi que sur les métaux contraints en approvisionnement

Finalement, l'objectif est de comparer la demande et l'offre de métaux afin de conclure sur la faisabilité des mix IAM (section 2.2.1) et d'identifier les métaux dont la demande excède l'offre.

2.3.3 Objectif 2 : Analyser le potentiel de la flexibilité des mix technologiques pour diminuer la demande de métaux en deçà des contraintes de disponibilité

Sous-Objectif 2.1 : Ajouter de la flexibilité aux mix technologiques IAM et intégrer les contraintes d'approvisionnement de métaux

Dans un premier temps, l'objectif est d'ajouter de la flexibilité aux mix énergétiques IAM en intégrant des contraintes d'approvisionnement en métaux dans la génération du mix technologique (section 2.2.1).

Sous-Objectif 2.2 : Estimer la demande en métaux du mix énergétique flexible

Dans un second temps, l'objectif est de quantifier la demande liée au nouveau mix technologique avec la même méthodologie que celle appliquée dans le sous-objectif 2.3.2.

Sous-Objectif 2.3 : Conclure sur la faisabilité du mix techno flexible

Finalement, l'objectif sera de conclure sur la capacité de ce nouveau mix à répondre à la demande en énergie sans excéder les contraintes d'approvisionnement (section 2.2.2).

2.3.4 Objectif 3 : Identifier les technologies à privilégier afin de réaliser la transition énergétique en réduisant les risques liés aux contraintes de métaux

Le troisième objectif de cette étude vise à orienter les décideurs politiques sur les investissements technologiques nécessaires pour répondre à la demande énergétique.

Sous-Objectif 3.1 : Évaluer la différence d'installation technologique entre le mix IAM initial et le mix flexible

Le premier objectif est d'identifier pour chaque technologie et sous-technologie génératrice d'énergie la variation d'investissements entre le mix IAM initial et le nouveau mix flexible.

La nécessité de s'éloigner du mix IAM sera quantifiée en calculant la différence en GW de puissance installée par source d'énergie entre le mix IAM initial et le mix flexible.

Sous-Objectif 3.2 : Réaliser des recommandations crédibles de technologies à prioriser et éviter pour la transition énergétique

Dans un second temps, l'objectif est de réaliser des recommandations pour les industries et décideurs politiques sur les technologies à prioriser et à éviter dans la transition énergétique future, afin de ne pas dépasser les contraintes d'offre de métaux.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DE L'ACCESSIBILITÉ DES MÉTAUX

Ce chapitre décrit la méthode et les hypothèses élaborées pour répondre à l'objectif 1, défini dans la section 2.3.2. La première partie détaille la méthodologie adoptée pour définir le périmètre de l'étude. Les deuxième, troisième et quatrième parties expliquent la méthode employée pour estimer, respectivement, la demande en métal du secteur énergétique, celle des autres secteurs de la transition, et celle du reste de l'économie (sous-objectif 1.1). La cinquième partie présente les méthodes de calcul et de collecte des données utilisées pour estimer l'offre de métaux (sous-objectif 1.2). Enfin, la dernière partie présente les équations permettant de comparer l'offre et la demande (sous-objectif 1.3).

L'ensemble des paramètres utilisés dans les équations de ce mémoire est résumé dans l'annexe F.

3.1 Délimiter le périmètre d'étude

Cette étude évalue la demande et l'offre de métaux liées aux projections énergétiques de six IAM selon un grand nombre de combinaisons de scénarios SSP - RCP. L'objectif est d'évaluer la faisabilité de la transition énergétique de la manière la plus exhaustive possible. Pour ce faire, différents choix sur le périmètre d'étude ont dû être réalisés.

3.1.1 Déterminer la résolution temporelle et régionale

Résolution temporelle Les projections des modèles IAM couvrent une période allant de **2005 à 2100**. Dans cette étude, nous effectuons des projections sur l'évolution future de plusieurs paramètres incertains. Notre analyse se concentre donc sur une période à moyen terme, afin de garantir la cohérence dans le temps des estimations réalisées. Par conséquent, l'étude est effectuée sur la période **de 2020 à 2050**, avec un **pas de temps décennal**.

Soit D l'ensemble des décennies, tel que :

$$D = \{2020, 2030, 2040, 2050\}, d \in D.$$

Résolution géographique À l’origine, les IAM présentent une résolution régionale qui varie selon les modèles. Afin de pouvoir comparer leurs résultats, **5 régions** ont été définies pour les six IAM dans la base de données SSP de l’IIASA [23] :

- **ASIA** : La plupart des pays asiatiques à l’exception du Moyen-Orient, du Japon et de l’ex-Union soviétique.
- **LAM** : Pays d’Amérique latine et des Caraïbes.
- **MAF** : Pays du Moyen-Orient et d’Afrique.
- **OECD** : États membres et candidats de l’OCDE 90 et de l’UE.
- **REF** : Pays des économies en voie de réforme d’Europe de l’Est et de l’ex-Union soviétique.

Les estimations de demande en métal pour le secteur énergétique, ainsi que les résultats de variations du mix énergétique sont **régionalisés** selon ces **cinq régions**. Cependant, par manque de données, la demande du reste de la transition, du reste de l’économie, ainsi que la production minière et les ressources sont **agrégées au niveau mondial**. Notre étude se base donc sur une hypothèse de **libre-échange** des ressources entre régions.

Soit R l’ensemble des régions, tel que :

$$R = \{\text{ASIA}, \text{LAM}, \text{MAF}, \text{OECD}, \text{REF}\}, r \in R.$$

3.1.2 Définir les technologies et métaux à l’étude

Résolution technologique Notre étude vise à évaluer avec précision la demande en métal du secteur énergétique, ainsi que la capacité de la flexibilité du mix technologique à réduire cette demande. Il est donc nécessaire d’avoir une importante résolution technologique. Les technologies à l’étude ont été choisies à partir de la collecte de données d’intensités métalliques (section 3.2.2). L’ensemble des sources d’énergie pour lesquelles des intensités métalliques et des parts de marché de sous-technologies étaient présentes dans la littérature a été intégré à l’étude. Les technologies précises à l’étude sont présentées dans l’annexe D. La description des caractéristiques des sous-technologies éoliennes et solaires est en annexe E.

Soit T_{det} l'ensemble des technologies et sous-technologies de génération d'énergie (voir le tableau 0.1 pour la liste des abréviations), tel que :

$$T_{\text{précises}} = \{\text{Sol_C-si_Silver}, \text{Sol_C-si_Copper}, \text{Sol_CdTe}, \text{Sol_CIGS}, \text{Sol_a-SiGe}, \\ \text{Sol_CSP_parabol}, \text{Sol_CSP_tower}, \text{Wind_DD-EESG_Onshore}, \\ \text{Wind_GB-DFIG_SCIG_Onshore}, \text{Wind_DD-PMSG_Onshore}, \\ \text{Wind_GB-PMSG_Onshore}, \text{Wind_DD-EESG_Offshore}, \\ \text{Wind_GB-DFIG_SCIG_Offshore}, \text{Wind_DD-PMSG_Offshore}, \\ \text{Wind_GB-PMSG_Offshore}, \text{Nuclear}, \text{Hydro}, \text{Biomass}, \text{Geothermal}, \\ \text{Foss_Coal}, \text{Foss_NaturalGas}, \text{Foss_Oil}, \text{Foss_Hydrogen}\}, t_{\text{det}} \in T_{\text{det}}.$$

Métaux à l'étude Lors de la collecte de données d'intensité métallique (section 3.2.2), l'ensemble des métaux utilisés dans les technologies génératrices d'énergie a été intégré à notre étude. D'autres métaux, uniquement utilisés dans les autres secteurs de la transition, comme le lithium par exemple, ont été exclus du périmètre de l'étude, afin de se concentrer sur la flexibilité du secteur énergétique. La liste des métaux à l'étude est présentée dans l'annexe C.

Soit M l'ensemble des métaux, tel que :

$$M = \{\text{Aluminium}, \text{Boron}, \text{Cadmium}, \text{Chromium}, \text{Cobalt}, \text{Copper}, \\ \text{Dysprosium}, \text{Gallium}, \text{Germanium}, \text{Hafnium}, \text{Indium}, \text{Iron}, \text{Lead}, \\ \text{Molybdenum}, \text{Neodymium}, \text{Nickel}, \text{Niobium}, \text{Praesodymium}, \text{Selenium}, \\ \text{Silicon}, \text{Silver}, \text{Tantalum}, \text{Tellurium}, \text{Terbium}, \text{Tin}, \text{Vanadium}, \\ \text{Yttrium}, \text{Zinc}, \text{Zirconium}\}, m \in M.$$

3.2 Estimer la demande en métal du secteur de l'énergie

Afin d'évaluer la faisabilité des projections énergétiques des IAM par rapport à l'accès aux métaux, il est nécessaire de calculer la demande de métaux (sous objectif 1.1 définis-en 2.3.2). Pour ce faire, un code a été réalisé, permettant de choisir un IAM et un scénario SSP-RCP à l'étude, et de quantifier la demande liée aux projections énergétiques de la modélisation choisie. La méthode de quantification de la demande de métaux liée aux systèmes énergétiques est présentée dans cette sous-partie.

3.2.1 Désagréger les capacités de puissance IAM

Collecter les capacités de puissance IAM Les données relatives aux capacités de puissance générées pour chaque combinaison de SSP-RCP et de modèle IAM ont été téléchargées depuis la base de données SSP de l’IIASA [23], sous forme de fichier CSV. Cette base de données fournit des projections détaillées par année et par région, incluant des informations telles que le PIB, la population, ainsi que les consommations d’énergie finale et secondaire par technologie, entre autres. Les données sont organisées par modèle IAM, par scénario SSP-RCP, par régions, couvrant la période de 2005 à 2100, avec une résolution décennale. Les capacités de puissance ont été extraites à l’aide d’un script Python, et ont été classées dans des dossiers spécifiques à chaque scénario SSP-RCP et modèle IAM, chaque dossier contenant un fichier Excel par région. Les fichiers Excel présentent les données de capacité énergétique cumulée installée, exprimées en gigawatts, par années (colonnes) et technologies (lignes). La liste des technologies représentées dans chaque IAM est la suivante : Solaire, Éolien, Hydro-électricité, Nucléaire, Biomasse, Géothermie, Pétrole, Charbon et Gaz [15]. Certains IAM ont une résolution technologique plus précise, avec une division entre les éoliennes terrestres et maritimes, ou encore entre le solaire Photovoltaïque (PV) et la Centrale Solaire thermique à Concentration (CSP) (Tab. 3.1).

TABLEAU 3.1 Résolution technologique des IAM

IAM	Division solaire PV et CSP	Division éolien terrestre et maritime
AIM CGE	NA	NA
GCAM4	NA	NA
IMAGE	*	*
MESSAGE GLOBIOM	*	*
REMIND MAG PIE	*	NA
WITCH GLOBIOM	*	*

Traiter les capacités de puissance IAM Chaque IAM utilise une classification technologique distincte. Dans certains cas, des redondances apparaissent au sein des données de capacité de puissance, comme une ligne pour la capacité de puissance *totale* ou des doublons tels que *solaire PV* et *solaire*. Pour chaque modèle, une liste de ligne doublons à supprimer a été définie. Lors de l’utilisation du code d’évaluation de la demande de métaux, l’utilisateur

sélectionne le modèle IAM et le scénario SSP-RCP à analyser. Les données de puissances issues des IAM sont chargées dans un dictionnaire tridimensionnel structuré par région, technologie et année. Ensuite, les lignes redondantes sont automatiquement supprimées en fonction du modèle IAM choisi.

Désagréger les technologies IAM Afin d'évaluer avec précision la demande en métal dans le secteur de l'énergie, une résolution technologique importante est indispensable. En effet, les différentes variantes technologiques du solaire et de l'éolien requièrent des métaux très divers. Les parts de marché issues de la littérature ont été utilisées pour affiner les projections technologiques des scénarios IAM et apporter une plus grande précision aux analyses. Les parts de marché finales utilisées sont résumées en annexe G.

Pour les **technologies éoliennes**, si l'IAM ne différencie pas explicitement l'éolien terrestre de l'éolien maritime, la répartition onshore - offshore de la Commission européenne est appliquée [6]. En revanche, lorsque l'IAM propose une évolution distincte des parts d'éolien en mer et sur terre, celle-ci est priorisée. Par la suite, chaque catégorie d'éolien terrestre et maritime est subdivisée selon les quatre sous-technologies éoliennes présentées et décrites en annexe D et E, en utilisant les parts de marché projetées pour la période 2020-2050 dans le scénario MDS World.

Pour les **technologies solaires**, il est observé que les IAM qui différencient le solaire PV et la CSP attribuent généralement une part de marché au CSP d'environ 0,1 % du total solaire. Si un modèle IAM ne dispose pas d'une catégorie spécifique pour la CSP, on suppose une part de marché nulle pour cette technologie. Lorsque le solaire PV et le solaire CSP sont explicitement représentés, les parts de marché définies par l'IAM sont privilégiées. Les technologies solaires PV sont ensuite désagrégées selon les sous-technologies présentées et décrites en annexe D et E, en utilisant les parts de marché projetées pour la période 2020-2050 du scénario MDS World de la Commission européenne [6]. Pour le solaire PV à base de silicium cristallin (C-Si), il est supposé dans le scénario initial que seule la technologie avec conducteur en argent est utilisée, avec une part de marché nulle pour le C-Si avec conducteur en cuivre, qui est une technologie émergente. La désagrégation des technologies CSP (sous-technologies présentées en annexe D et E) est quant à elle réalisée à partir des parts de marché de 2020 présentes dans l'étude de Magdalena et al. [57]. En l'absence de données supplémentaires, elles sont considérées constantes dans le temps [56].

3.2.2 Évaluer l'intensité métallique des sources d'énergie dans le temps

Pour évaluer les besoins en métal liés à la transition énergétique, il est crucial de rassembler les données d'intensité métallique (IM) pour chaque source d'énergie, définies comme la quantité de métaux requise pour générer 1 GigaWatt (GW) de puissance. Cependant, il y a une variabilité significative dans les IM de la littérature. Le choix des données est fondamental, car il impacte considérablement la demande finale de métaux [56].

Collecter les données d'intensité métallique Une revue de littérature a été réalisée afin de collecter les données d'intensités métalliques de nombreuses sources de données [6, 34, 36, 54, 55, 58]. Elles ont ensuite été comparées dans un tableau pour chaque technologie et chaque métal concerné. Une étude sur la fiabilité des données secondaires collectées a été réalisée, en tenant compte de la source, de la date de publication et de la variabilité des données trouvées dans la littérature. Sur la base de cette étude, des choix éclairés ont été faits concernant la sélection des données finales.¹

Réaliser des scénarios de réduction d'IM Afin de réaliser des projections de la demande en métal réalistes, il est nécessaire d'inclure le potentiel de développement technologique dans le temps. L'efficacité des technologies est en évolution, diminuant le besoin en métal et donc l'intensité métallique [30]. La méthode de correspondance entre les scénarios de matière et les scénarios SSP de Wang et al. a été reprise afin d'associer les SSP à des scénarios de réduction d'intensité métallique (Optimiste, Neutre, Conservatif) [50]. Les métaux ont ensuite été divisés suivant la méthode de la Commission Européenne [6], selon que leur utilisation soit dans des technologies spécifiques ou dans la construction (métaux dits structurels). La classification pour chaque métal est décrite en annexe H. Ensuite, une étude des scénarios de la littérature pour l'évolution d'intensité métallique dans le temps a été réalisée afin de déterminer le taux de réduction annuel à appliquer à l'intensité métallique par métal [6, 33–35, 50, 59]. Les résultats de cette étude sont résumés dans le tableau 3.2.

TABLEAU 3.2 Réduction annuelle de l'intensité métallique des métaux

Scénario d'IM	Optimiste	Neutre	Conservatif
Scénario SSP	SSP1	SSP2, SSP5	SSP3, SSP4
Métal structurel	8 %	5 %	0 %
Métal spécifique	5 %	2 %	0 %

1. Les données et sources utilisées peuvent être retrouvées sur Zenodo

3.2.3 Estimer les pertes minières

Lorsqu'on compare des quantités de demandes et de productions de métaux, il est nécessaire d'évaluer le métal à la même étape de la chaîne de valeur. En effet, de nombreux procédés sont réalisés entre l'extraction du matériau et l'utilisation du métal dans un produit fini [60].

Nassar et al. distinguent différentes étapes dans la chaîne de valeur du minerai :

- A. La quantité de matière totale extraite
- B. Les déchets de roches retirés
- C. Le minerai intéressant extrait
- D. Commodité dans le minerai traité
- E. Commodité dans le produit concentré
- F. Production de produit fini

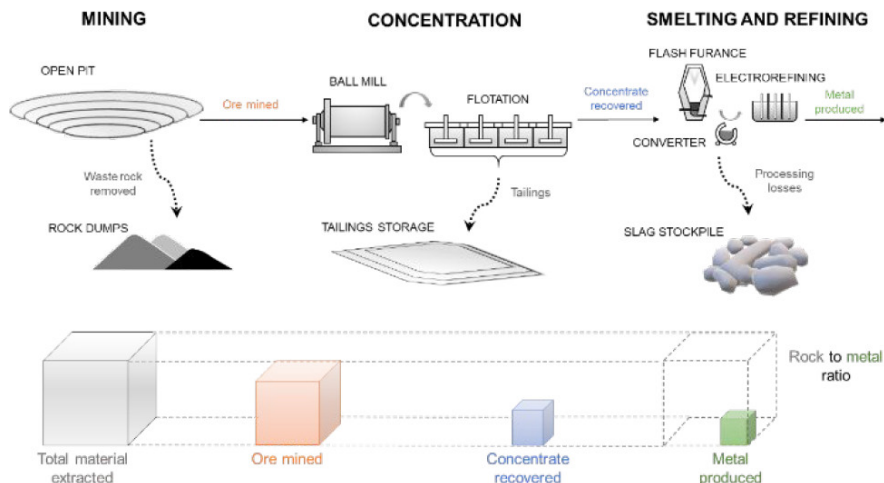


FIGURE 3.1 Description de la chaîne de valeur du minerai, reproduit de [60]

Mapper des étapes de la chaîne de valeur Les intensités métalliques des technologies, utilisées pour évaluer la demande en métal des sources d'énergie et des autres secteurs de la transition, sont des quantités de métaux utilisées dans la technologie finale (étape F). Les données de production utilisées pour comparer la demande en métal annuelle avec le potentiel de production minière représentent le contenu récupérable dans le minerai (étape D) [45]. Il est donc nécessaire d'utiliser un ratio pour comptabiliser les pertes entre l'étape D et F lors de l'estimation de la demande annuelle. Les données de réserves et ressources se situent à l'étape « ore mined » de la chaîne de valeur, soit le minerai intéressant extrait (étape C). Les pertes entre l'étape C et D doivent être incluses lors de la quantification de la demande en métal cumulée.

Estimer les pertes minières L'étude de Charpentier Poncelet et al. [45] calcule les ratios de perte de métaux à différentes étapes de la chaîne de valeur. Lors du calcul de la demande annuelle en métal, les pertes lors de la fabrication et la transformation des métaux sont incluses, englobant toutes les étapes de conversion des métaux raffinés en produits finis. Pour la quantification de la demande en métal cumulée, ces pertes s'ajoutent aux pertes de production [45, 60]. Les pertes sont traduites en taux de récupération ($RR = 100 - \text{Pertes estimées}$), et sont appelées RR_{prod} pour les pertes à appliquer à la demande annuelle, et RR_{res} pour celles à appliquer à la demande cumulée. Les données et sources utilisées sont résumées en annexe I.

3.2.4 Calculer la demande en métal du secteur de l'énergie

Afin de calculer la demande annuelle en métaux du secteur de l'énergie (« Energy Sector Demand », ou « ESD » en anglais), l'intensité métallique (IM^2) à l'année concernée est multipliée aux nouvelles capacités de puissance (S_0) installées entre la décennie d et la décennie $d-1$, pour chaque région r et technologie t . Afin d'obtenir la demande annuelle, ces nouvelles capacités sont divisées par 10, en considérant qu'elles sont installées linéairement au cours de la décennie. La demande est ensuite divisée par le taux de récupération (RR_{prod}), afin d'ajouter les métaux nécessaires pour pallier aux pertes. La demande est sommée sur l'ensemble des technologies t et région r afin d'obtenir la demande annuelle mondiale pour l'ensemble du secteur énergétique.

$$ESD_y(m, d) = \sum_{t,r} \left(\frac{IM(d, t, m)}{RR_{\text{Prod}}(m)} \times \left(\frac{S_0(r, t, d) - S_0(r, t, d - 1)}{10} \right) \right), \quad \forall m, d \quad (3.1)$$

Pour calculer la demande métallique cumulée du secteur de l'énergie, la demande à l'année 2020 est la demande annuelle de cette année là. Ensuite, la demande cumulée par décennie entre 2020 et 2050 est calculée en multipliant l'intensité métallique (IM) moyenne par métaux m entre la décennie d et $d-1$ aux nouvelles capacités installées (S_0) entre la décennie $d-1$ et la décennie d , pour chaque région r et technologie t . Elle est ensuite divisée par le taux de récupération (RR_{res}), afin d'ajouter à la demande les métaux nécessaires pour pallier les pertes. La demande est sommée de 2020 à 2050 pour chaque technologie et région, afin d'obtenir la demande cumulée mondiale de l'ensemble du secteur énergétique.

2. Se référer à l'annexe F pour la liste et définition des paramètres

$$ESD_d(m, d) = \begin{cases} ESD_y(m, 2020), & \forall m \\ \sum_{t,r} \left(\frac{IM(d,t,m) + IM(d-1,t,m)}{2 \times RR_{Res}(m)} \times (S_0(r, t, d) - S_0(r, t, d-1)) \right), & \forall m, d \in D \setminus \{2020\} \end{cases} \quad (3.2)$$

3.3 Estimer la demande des autres secteurs de la transition (OTD)

Afin d'estimer la demande en métal future, il est nécessaire d'intégrer les autres secteurs de la transition (« Other Transition Demand », ou « OTD » en anglais) utilisant une quantité importante de métaux stratégiques.

3.3.1 Collecter et traiter les données de l'AIE

L'Agence Internationale de l'Energie (AIE) a quantifié la demande en métal nécessaire pour la transition énergétique, intégrant la demande pour les sources d'énergie, mais également pour d'autres secteurs de la transition. L'installation de nouvelles sources d'énergie nécessite une augmentation du réseau électrique, qui impacte la demande d'aluminium et de cuivre. L'utilisation d'énergies intermittentes, ne fonctionnant pas à chaque moment de la journée, crée un besoin de stockage afin de restituer l'énergie aux moments de pics de demande. Ce stockage, sous forme de batterie, est également utilisé pour stocker l'énergie dans les véhicules électriques. L'AIE modélise le besoin en cobalt, manganèse, nickel, silicium et vanadium pour le stockage de l'énergie. Enfin, afin de réduire l'impact sur les changements climatiques, la transition énergétique s'accompagne d'une électrification des véhicules. Les moteurs des VE, constitués d'aimants permanents, requièrent de dysprosium, du néodyme, et du terbium, des terres rares.

Extraire les données La quantification des métaux nécessaires à estimer l'OTD (réseau, stockage et VE), ont été extraites à partir du fichier Excel créé par l'AIE [61]. Bien que différentes variantes de mix technologiques aient été réalisées, le scénario de base a été considéré dans cette étude.

Traiter les données Les données de l'AIE étant fournies tous les cinq ans, une linéarisation a été réalisée afin d'estimer la demande en métal par an, de 2020 à 2050. Ensuite, un premier tableau Excel a été créé avec les données de demande en tonnes de métal par année, précisant le scénario AIE considéré, la technologie dans laquelle le métal est utilisé, pour les années 2020, 2030, 2040 et 2050. Ce tableau est utilisé pour estimer la demande annuelle en métal

(OTD_y). Un second tableau Excel a été créé avec la demande du métal pour l'année 2020, puis la demande cumulée par décennie pour 2030, 2040 et 2050. Ce tableau est utilisé pour estimer la demande cumulée en métal (OTD_d)³.

Intégration des pertes De la même manière que pour la demande du secteur énergétique, il a été considéré que les pertes n'étaient pas prises en compte dans l'évaluation de l'AIE. Les données obtenues ont donc été divisées par le taux de récupération estimé précédemment.

3.3.2 Associer les scénarios SSP-RCP et les scénarios de l'AIE

Les projections de demande en métal de l'AIE sont faites selon 3 scénarios d'évolution politique [5]. Afin de s'assurer de la cohérence des scénarios, un mappage entre les scénarios SSP-RCP et les scénarios de l'AIE a été effectué.

Scénario Neutralité Carbone (NZE) : ce scénario propose une trajectoire pour le secteur énergétique mondial afin d'atteindre des émissions nettes de CO₂ nulles d'ici 2050.

Le scénario NZE est un scénario de transition très restrictif. Il est décrit comme limitant le réchauffement climatique à 1,5°C et atteindrait des émissions nettes de CO₂ nulles d'ici 2050. Le seul scénario RCP répondant à cette condition est le scénario RCP 1.9 (Tab. 1.1). Pour atteindre ces objectifs, une augmentation importante de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique est supposée. Les scénarios SSP augmentant la part des énergies renouvelables sont les scénarios SSP1 et SSP4 (Annexe A).

Scénario des Engagements Annoncés (APS) : ce scénario suppose que tous les objectifs à long terme en matière d'émissions et d'accès à l'énergie, y compris les engagements de neutralité carbone, seront atteints dans les délais et en totalité, même lorsque les politiques nécessaires ne sont pas encore en place pour les réaliser.

Le scénario APS limiterait le réchauffement autour de 1,7°C d'ici 2100. Le scénario RCP répondant le mieux à cette description est le scénario RCP 2.6 (Tab. 1.1). De plus, les politiques en matière d'émissions et d'objectifs énergétiques étant atteintes, on devrait observer une augmentation de la part du renouvelable. De nouveau, on considère donc seulement les scénarios SSP1 et SSP4 (Annexe A).

3. Les données finales utilisées peuvent être retrouvées sur Zenodo

Scénario des Politiques Déclarées (STEPS) : ce scénario trace une trajectoire qui reflète les paramètres de politique actuels, basée sur une évaluation détaillée des politiques effectivement en place ou en cours de développement par les gouvernements à travers le monde.

Le scénario STEPS est un scénario de base, suivant les politiques actuelles. Il n'est pas lié à une transition importante vers le renouvelable. Une hypothèse de développement du stockage, du réseau et des véhicules électriques suivant les tendances actuelles est donc supposée pour l'ensemble des autres scénarios SSP-RCP.

TABLEAU 3.3 Mappage des scénarios de l'AIE et SSP-RCP

Mappage des scénarios de l'AIE et des scénarios SSP-RCP			
Scénarios de l'AIE	NZE	APS	STEPS
Scénarios SSP-RCP	SSP1-19, SSP4-19	SSP1-26, SSP4-26	Tous les autres scénarios

3.4 Estimer la demande des autres secteurs de l'économie (OSD)

La demande en métal va croître rapidement en raison de la transition énergétique. Toutefois, pour la quantifier sans la sous-estimer, il est crucial d'inclure la demande existante dans les autres secteurs de l'économie (« Other Sector Demand », ou « OSD » en anglais).

3.4.1 Collecter les données d'OSD de la littérature

Collecter les données de la littérature Pour les métaux structurels, on constate que la demande métallique tend à se stabiliser une fois que le stock de métal dans les pays développés devient suffisamment important pour être utilisé sur le long terme. Afin de tenir compte de cet effet de saturation du marché, des projections de la consommation future des métaux, notamment l'aluminium, le cuivre, le cobalt, le fer, le nickel et le zinc, ont été récupérées dans la littérature. La description des études utilisées pour chaque métal ainsi que le mappage appliqué entre les scénarios des études et nos scénarios sont détaillés dans l'annexe J.

3.4.2 Estimer l'OSD selon l'évolution du PIB

La demande future de certains métaux n'est pas estimée dans la littérature. Par conséquent, une même hypothèse a été appliquée aux métaux non couverts par les études existantes.

Choisir la méthodologie Afin d'estimer l'OSD, une supposition de corrélation entre l'évolution de la demande en métal et de la croissance économique est effectuée. Ainsi, on suppose que l'intensité matérielle de la consommation de la population est corrélée avec l'augmentation du PIB.

Collecter les données de PIB Les données d'évolution du PIB ont été extraites des projections IAM pour chaque scénario SSP-RCP, à partir de la base de données de l'IIASA [23]. Elles ont été stockées sous la même forme que les capacités de puissance, avec un dossier par modélisation SSP-RCP de chaque IAM. Le dossier est composé d'un fichier Excel pour chaque région, avec le PIB de 2005 à 2100.

Estimer la demande en métal du reste de l'économie en 2020

Production en 2020 Afin d'estimer la demande en métal destinée au reste de l'économie en 2020, il a dans un premier temps été collecté les données de production de chaque métaux en 2020. Une comparaison de données de plusieurs sources a été réalisée [37, 38].

Calcul de l'OSD en 2020 Afin de calculer la demande du reste de l'économie en 2020, on soustrait à la production totale en 2020 la demande destinée au secteur énergétique et au reste de la transition, à l'aide des données de l'AIE.

$$\text{OSD}_y(2020, m) = \text{Prod}(2020, m) - \text{ESD}_y(2020, m) - \frac{\text{OTD}_y(2020, m)}{RR_{\text{Prod}}(m)} \quad (3.3)$$

Calcul de l'OSD dans le temps

A partir de l' OSD_y ⁴, la demande annuelle des années consécutives est calculée à partir de la croissance économique mondiale entre la décennie d et d-1.

$$\text{OSD}_y(m, d) = \begin{cases} \text{OSD}_y(2020, m), & \text{pour } d = 2020 \\ \text{OSD}_y(d-1, m) \times \left(\frac{\sum_r \text{GDP}(r, d)}{\sum_r \text{GDP}(r, d-1)} \right), & \text{pour } d \in \{2030, 2040, 2050\} \end{cases} \quad (3.4)$$

Afin de calculer la demande cumulée par décennie, une hypothèse de linéarité est réalisée, et la demande moyenne entre la décennie d et la décennie d-1 est multipliée par 10.

4. Se référer à l'annexe F pour la liste et définition des paramètres

3.5 Estimer l'offre en métaux, en termes de disponibilité dans la croûte terrestre et d'accessibilité dans le temps

Une fois l'ensemble de la demande métallique quantifiée pour la transition et l'ensemble des secteurs de l'économie, elle doit être comparée à l'offre en métal. Cette offre est divisée selon deux catégories, la disponibilité des métaux dans la croûte terrestre (réserves et ressources), et le potentiel de production minière (sous objectif 1.2, définis-en 2.3.2).

3.5.1 Collecter les données de réserves et de ressources

Collecter les données Les données de réserves et de ressources ont été collectées à partir de la littérature [34,35,37,38,62]. Les données ont été choisies en fonction des informations les plus récentes et les plus fiables disponibles. Les données et les sources utilisées sont décrites en annexe L.

Choisir la limite en disponibilité Dans le cadre de cette étude, les données de réserves correspondant aux métaux économiquement accessibles au moment du rapport, limiter l'accès des métaux aux réserves jusqu'en 2050 pourrait aboutir à une sous-estimation de la disponibilité des métaux dans la croûte terrestre. Ainsi, les limites de disponibilité retenues sont les ressources de chaque métal, faisant l'hypothèse que sous la pression croissante de la demande en métal induite par la transition énergétique, le prix des métaux risque d'augmenter, entraînant l'augmentation de la part des réserves économiquement accessibles. Cependant, les données de réserves et de ressources ayant été collectées, la modélisation peut être effectuée avec l'application de limites en réserves comme en ressources.

Résolution métallique des réserves et ressources Les données de réserves et de ressources n'étant pas connues pour l'ensemble des métaux à notre étude, les contraintes sur la demande cumulée ont donc été évaluées seulement lorsqu'une donnée était présente dans la littérature.

3.5.2 Estimer la production minière future

Collecter les données de production de la littérature

L'AIE a effectué des projections précises de la production du cuivre, du cobalt et du nickel, à partir des projets miniers existants et annoncés, de 2023 à 2040 [63]. Nous supposons que la production en 2023 est égale à celle en 2020. Les données de production de l'AIE ayant

tendance à diminuer dans le temps en raison de l'absence de nouveaux projets miniers, on considère la production en 2040 égale à celle en 2050, effectuant l'hypothèse la moins contraignante. Le scénario "High Production Case" de l'AIE est considéré. Les données utilisées et la méthode pour les adapter à notre étude sont résumées dans le tableau 3.4.

TABLEAU 3.4 Estimations de la production métallique (t) à partir des données de l'AIE [63]

Production en tonnes		Estimées	Données de l'AIE				Estimées
Métal	Scenario IEA	2020	2023	2030	2040	2050	
Cobalt	Cas de base	2.40E+05	2.40E+05	3.26E+05	2.25E+05	2.25E+05	
Cobalt	Production haute	2.40E+05	2.40E+05	3.60E+05	2.59E+05	2.59E+05	
Copper	Cas de base	2.25E+07	2.25E+07	2.24E+07	1.49E+07	1.49E+07	
Copper	Production haute	2.25E+07	2.25E+07	2.43E+07	1.66E+07	1.66E+07	
Nickel	Cas de base	3.45E+06	3.45E+06	4.30E+06	4.44E+06	4.44E+06	
Nickel	Production haute	3.45E+06	3.45E+06	5.32E+06	5.79E+06	5.79E+06	

Estimer la production future des autres métaux

Calculer l'augmentation de production annuelle historique Pour estimer la production future des autres métaux, une collecte de données de production historiques a été réalisée [37,38,62]. À partir de ces données, le pourcentage d'augmentation (ou de réduction) annuelle de la production a été évalué. La médiane de cette évolution annuelle a été calculée pour l'ensemble des données disponibles (anciennes), ainsi que pour la période de 1990 à 2022 (récentes), en excluant les années marquées par la pandémie de COVID-19 (2020-2021). La médiane la plus représentative a ensuite été sélectionnée pour chaque métal. En règle générale, les données les plus anciennes ont été privilégiées pour les métaux dits *structurels*, en raison de leur utilisation historique selon des tendances relativement stables au fil des années. À l'inverse, les données récentes ont été privilégiées pour les métaux spécifiques aux technologies modernes, dont l'utilisation est majoritairement récente et sujette à des évolutions rapides. La valeur obtenue, désignée sous le nom de β , et les hypothèses utilisées pour chaque métal sont résumées dans l'annexe K.

Calculer la production future à partir de β La valeur β obtenue est ensuite utilisée pour estimer l'augmentation annuelle de la production jusqu'en 2050. La production en 2020 est celle trouvée dans la littérature. Ensuite, le calcul de la production au fur et à mesure des années à partir de β est effectué tel que :

$$\text{Prod}(m, d) = \begin{cases} \text{Prod}(2020, m), & \text{pour } d = 2020 \\ \text{Prod}(m, d) = \text{Prod}(m, d - 1) (1 + \beta(m)) & \text{pour } d \in \{2021, 2050\} \end{cases} \quad (3.5)$$

3.6 Évaluer la faisabilité métallique des scénarios IAM initiaux

Finalement, la demande en métal liée aux modélisations IAM ayant été calculée, ainsi que la disponibilité des métaux et la production minière future estimée, celles-ci sont comparées afin d'évaluer la faisabilité des scénarios IAM initiaux (sous objectif 1.3, définis-en 2.3.2).

3.6.1 Évaluer le potentiel épuisement des ressources

La demande cumulée en métaux entre 2020 et 2050 est comparée aux données de réserves, selon l'équation suivante :

$$\sum_d ESD_d(m, d) + \sum_d \frac{OTD_d(m, d)}{RR_{Res}(m)} + \sum_d OSD_d(m, d) \leq \text{Res}(m), \quad \forall m \quad (3.6)$$

3.6.2 Évaluer la capacité de la production minière annuelle à répondre à la demande en métal

De même, la demande annuelle en métal est comparée aux données de production, selon l'équation suivante :

$$ESD_y(m, d) + \frac{OTD_y(m, d)}{RR_{Prod}(m)} + OSD_y(m, d) \leq \text{Prod}(d, m), \quad \forall m, d \quad (3.7)$$

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE D'AJOUT DE FLEXIBILITÉ AU MIX ÉNERGÉTIQUE PAR UNE APPROCHE D'OPTIMISATION

Cette seconde partie de la méthodologie détaille le modèle mathématique utilisé pour introduire de la flexibilité dans le mix technologique des sources d'énergie des IAM, conformément à l'objectif 2 défini dans la section 2.3.3. Dans un premier temps, la méthode employée pour identifier les sous-technologies interchangeables dans le modèle est présentée. Ensuite, la démarche de formulation du modèle d'optimisation est décrite. En troisième lieu, les équations traduisant les objectifs et les contraintes (sous-objectif 2.1) sont exposées. Enfin, la méthode d'évaluation de la faisabilité du nouveau mix technologique flexible (sous-objectifs 2.2 et 2.3) ainsi que l'évaluation des technologies recommandées (objectif 3) sont abordées.

Les paramètres utilisés dans les équations de ce mémoire et leurs définitions sont résumés dans l'annexe F.

4.1 Définir les sous-technologies pour lesquelles une interchangeabilité est considérée

L'étude du fonctionnement et des caractéristiques des sous-technologies de l'éolien et du solaire ayant permis d'évaluer l'interchangeabilité entre les technologies est détaillée dans l'annexe E. Les abréviations utilisées pour les technologies sont également détaillées en annexe E et D, ainsi que dans la liste des sigles et abréviations.

4.1.1 Analyser le potentiel de substitution au sein des technologies éoliennes

Les projections de mix énergétiques futurs misent sur une expansion accélérée de l'éolien, avec un développement particulier de la part des éoliennes maritimes [5]. Les éoliennes PMSG font partie des technologies en croissance, pour leurs avantages d'utilisation en mer [5,6]. Cependant, l'approvisionnement en terres rares, utilisées dans les aimants permanents, risque d'être contraint dans les prochaines années [64]. Le potentiel de substitution de cette technologie est donc analysé.

Substitution des terres rares dans les aimants permanents des éoliennes La substitution des métaux utilisés dans les aimants permanents par des métaux plus abondants a été explorée en laboratoire. Bien que Pathak et al. aient étudié la possibilité de remplacer

les aimants NdFeB par du cobalt et du cérium, cette solution a été jugée improbable [65]. Le terbium pourrait potentiellement remplacer le dysprosium, mais présente également des risques en matière d’approvisionnement. En définitive, selon les connaissances actuelles, les experts s’accordent à dire qu’il est peu probable que les métaux des aimants permanents soient remplacés à court terme [66].

Substitution entre les sous-technologies éoliennes Comme mentionné en annexe E, la technologie DD-PMSG présente un véritable avantage pour les applications en mer, tant en termes d’efficacité que de coût, notamment grâce à une réduction significative des besoins en maintenance. Il serait donc non justifié de considérer une interchangeabilité entre les technologies éoliennes maritimes dans notre étude. Toutefois, il est prévu que les éoliennes DD-PMSG soient également déployées sur terre dans le futur [6]. Pourtant, les alternatives telles que les technologies GB-SCIG & DFIG, DD-EESG et GM-PMSG, déjà utilisées sur terre, offrent des solutions viables, avec une moindre demande en terres rares [66]. Par conséquent, cette étude envisage une flexibilité totale entre les variantes technologiques éoliennes terrestres.

4.1.2 Analyser le potentiel de substitution au sein des technologies solaires photovoltaïques

Comme pour l’éolien, la transition énergétique repose sur une expansion massive du solaire dans les années à venir, avec une forte concentration dans les pays en développement [5]. Les différentes sous-technologies solaires nécessitent des métaux très variés, ce qui entraîne une fluctuation significative de la demande en fonction des parts de marchés considérées [34]. Actuellement, la technologie dominante est le C-Si Silver, mais les réserves et la production minière d’argent pourraient ne pas suffire à répondre à la demande croissante du secteur solaire [67], soulignant ainsi la nécessité de trouver des solutions de substitution pour ce métal [68]. Par ailleurs, les technologies à couches fines, plus flexibles, permettent une diversification des applications solaires. Toutefois, elles requièrent également des métaux dont l’approvisionnement pourrait être limité [69]. Explorer le potentiel de substitution de ces technologies pourrait offrir une flexibilité dans le choix de la sous-technologie.

Substitution de l’argent dans le solaire cristallin silicium L’argent est identifié comme une ressource potentiellement limitée, pouvant freiner l’expansion du solaire [67]. La récente métallisation des contacts des cellules en silicium par du cuivre permet de remplacer l’utilisation de l’argent dans le silicium cristallin [67], avec une substitution massive

équivalente. Le cuivre et l'argent ayant des propriétés de conductivité similaires, ce remplacement n'affecterait que marginalement l'efficacité de la technologie C-Si, tout en conservant les mêmes usages. Dans cette étude, une flexibilité totale a donc été considérée entre l'utilisation de cellules solaires à conducteur d'argent et celles à base de cuivre.

Substitution entre les sous-technologies du solaire photovoltaïque Les technologies solaires de première et deuxième générations sont destinées à des usages différents. Les cellules solaires à couche mince, plus légères et flexibles, peuvent être intégrées directement aux bâtiments ou sur des fenêtres, ce qui n'est pas possible avec le silicium cristallin. De plus, le solaire à couche mince a une efficacité légèrement inférieure au solaire c-Si. Par conséquent, une flexibilité totale entre ces technologies semble improbable. Cependant, les différentes variantes de couches minces, ayant des utilisations et des rendements similaires, sont considérées comme interchangeables dans cette étude.

4.1.3 Analyser le potentiel de substitution au sein des sous-technologies solaires à concentration

Substitution de l'argent dans les technologies solaires à concentration Les technologies CSP, comme les technologies solaires PV, utilisent de l'argent qui pourrait venir à manquer dans le futur. Cependant, le remplacement de l'argent n'a pas été étudié en laboratoire pour la CSP [67]. En effet, l'argent est utilisé dans les miroirs pour ses propriétés de réflexion (>95 %) des rayons solaires [70], qu'on ne retrouve pas avec une telle efficacité dans d'autres métaux. À ce jour, il n'existe donc pas de possibilité de substituabilité de l'argent pour cette technologie qui ne diminuerait pas grandement sa performance.

Substitution entre les sous-technologies du solaire à concentration Les technologies CSP requièrent des types de métaux relativement similaires, bien que la quantité varie selon la variante technologique [34, 55, 71]. À part l'argent, cette technologie n'utilise pas de métaux qui soient peu utilisés dans d'autres technologies. De plus, les sous-technologies CSP ont des efficacités différentes, et requièrent des espaces d'installation différents. En effet, la CSP tour se déploie en hauteur, alors que la CSP parabolique requiert une grande surface au sol. Cette étude ne modélise donc pas de substitution entre les sous-technologies CSP.

4.1.4 Ajouter de la flexibilité au modèle

Finalement, une correspondance entre le groupe agrégé de technologies et les sous-technologies considérées comme interchangeables est définie et résumée dans le tableau 4.1.

TABLEAU 4.1 Sous-technologies supposées interchangeables

Groupe technologique agrégé	Technologies flexibles
Solaire cristallin	Solaire cristallin argent Solaire cristallin cuivre
Solaire à couche fine	Solaire CdTe Solaire CIGS Solaire a-SiGe
Éolien terrestre	GB-DFIG Terrestre DD-PMSG Terrestre DD-EESG Terrestre GB-PMSG Terrestre

À partir de ce tableau, une matrice de correspondance binaire entre les groupes agrégés et les sous-technologies flexibles les composant est construite. Elle est utilisée au sein des contraintes du logiciel d'optimisation lors de l'ajout de flexibilité au mix énergétique initial¹.

4.2 Définir le Modèle d'optimisation

4.2.1 Choisir le type de modèle d'optimisation

Les **modèles d'optimisation** sont utilisés comme outils d'aide à la décision. Ils consistent à sélectionner la meilleure valeur d'un élément, par rapport à un ou plusieurs critères prédéfinis, parmi un ensemble d'alternatives possibles. Les critères de sélection sont représentés par la maximisation ou la minimisation d'une fonction objectif. L'ensemble des alternatives possibles est délimité par différentes contraintes sur ces décisions.

Il a été choisi de réaliser dans cette étude un modèle de programmation linéaire, l'ensemble des fonctions du modèle mathématique est donc linéaire. C'est un problème à un seul objectif, contraint, aux variables continues. Avec une approche de prévision parfaite, le système est optimisé pour l'ensemble de la période d'étude simultanément, en ayant une connaissance complète de l'évolution des paramètres du marché tout au long de l'horizon de planification.

1. Les données finales utilisées peuvent être retrouvées sur Zenodo

Dès 2020, le modèle utilise donc ses connaissances des paramètres jusqu'en 2050 pour réaliser l'optimisation.

4.2.2 Définir les ensembles à l'étude

Afin de rédiger le code d'optimisation, il est nécessaire de définir les ensembles dans lesquels les paramètres et variables vont évoluer. Les mêmes ensembles que ceux présentés en 3.1 seront utilisés.

Afin d'apporter de la flexibilité au modèle optimisé, différents sous-ensembles ont été créés pour les technologies. Les technologies pour lesquelles une interchangeabilité est considérée sont agrégées en suivant la répartition présentée dans le tableau 4.1. Les technologies Sol_C-si_Silver et Sol_C-si_Copper sont agrégées en Sol_C-si. Les technologies à couches fines Sol_CdTe, Sol_CIGS et Sol_a-SiGe sont agrégées en Sol_Thin_Film. Enfin, les sous-technologies éoliennes terrestres (Onshore) ont été agrégées en Wind_Onshore.

Soit T_{flex} l'ensemble des technologies et sous-technologies, avec agrégation entre les technologies précises auxquelles est apportée de la flexibilité, tel que :

$$T_{\text{flex}} = \{\text{Sol_C-si}, \text{Sol_Thin_Film}, \text{Sol_CSP_parabol}, \text{Sol_CSP_tower}, \\ \text{Wind_Onshore}, \text{Wind_DD-EESG_Offshore}, \text{Wind_GB-DFIG_SCIG_Offshore}, \\ \text{Wind_DD-PMSG_Offshore}, \text{Wind_GB-PMSG_Offshore}, \text{Nuclear}, \text{Hydro}, \\ \text{Biomass}, \text{Geothermal}, \text{Foss_Coal}, \text{Foss_NaturalGas}, \\ \text{Foss_Oil}, \text{Foss_Hydrogen}\}, t_{\text{flex}} \in T_{\text{flex}}.$$

Deux sous-ensembles de technologies ont également été créés pour regrouper les technologies dites « bas carbone » et les technologies fossiles.

— Soit T_{ren} le sous-ensemble de technologies renouvelables et bas carbone, tel que :

$$T_{\text{ren}} = \{\text{Sol_C-si}, \text{Sol_C-si_Copper}, \text{Sol_Cdte}, \text{Sol_CIGS}, \text{Sol_a-SiGe}, \\ \text{Sol_CSP_parabol}, \text{Sol_CSP_tower}, \text{Wind_DD-EESG}, \text{Wind_GB-DFIG_SCIG}, \\ \text{Wind_DD-PMSG}, \text{Wind_GB-PMSG}, \text{Nuclear}, \text{Hydro}, \text{Biomass}, \text{Geothermal}\}, t_{\text{ren}} \in T_{\text{ren}}.$$

— Soit T_{foss} le sous-ensemble de technologies fossiles, tel que :

$$T_{\text{foss}} = \{\text{Foss_Coal}, \text{Foss_NaturalGas}, \text{Foss_Oil}, \text{Foss_Hydrogen}\}, t_{\text{foss}} \in T_{\text{foss}}.$$

4.2.3 Définir les variables

Variable de décision : La variable de décision représente la décision à prendre. C'est le critère que pourra faire varier le modèle afin de minimiser la fonction objectif. La variable de décision est décrite ci-dessous :

- **Mix de capacité optimisée :** $S(r, t, d) \in \mathbb{R}^+$, avec \mathbb{R}^+ l'ensemble des réels positifs. S est le mix de capacités de puissance optimisée. Comme le mix de capacités initiales, il représente les capacités installées cumulées dans la région r , de la sous-technologie t , à la décennie d .

Variable de relaxation : Les variables de relaxation sont utilisées pour assouplir les contraintes du modèle lorsqu'il ne parvient pas à les respecter. Elles sont pénalisées de manière importante dans la fonction objectif, en les multipliant par une grande valeur M . Elles sont donc utilisées seulement si nécessaire par le modèle d'optimisation. La liste des variables de relaxation est donnée ci-dessous :

- **Variable de relaxation des réserves :** $\text{Res}_{\text{relax}}(m) \in \mathbb{R}^+$
La variable de relaxation $\text{Res}_{\text{relax}}(m)$ représente une création de réserve de métal supplémentaire pour le métal m . Cette variable prend une valeur supérieure à 0 s'il y a un manque de réserve de m malgré l'optimisation.
- **Variable de relaxation de la production minière :** $\text{Mining}_{\text{relax}}(m, d) \in \mathbb{R}^+$
La variable de relaxation $\text{Mining}_{\text{relax}}(m, d)$ représente une production minière supplémentaire hypothétique du métal m à la décennie d . Cette variable prend une valeur supérieure à 0 s'il y a un manque de production minière de m malgré l'optimisation.
- **Variable de relaxation de cohérence :** $\text{CohMix}_{\text{relax}}(r, t, d) \in \mathbb{R}^+$
La variable de relaxation $\text{CohMix}_{\text{relax}}(r, t, d)$ représente le potentiel de diminution de la capacité installée cumulée entre deux décennies successives. Cette variable prend une valeur supérieure à 0 si dans un scénario initial IAM, on observe une réduction dans la capacité installée d'une technologie d'une décennie sur l'autre. Cela signifie qu'une plus grande part de la technologie t atteint sa fin de vie, qu'il n'y a de nouvelles capacités installées. Le modèle n'intégrant pas la fin de vie des technologies, cette variable de relaxation est créée afin d'assurer le bon fonctionnement de l'optimisation.

4.3 Traduire en équation l'objectif et les contraintes

4.3.1 Objectif

La **fonction objectif** représente la mesure de performance à maximiser ou minimiser. Cette fonction est définie à partir de différents critères de sélection, et par les variables et les coefficients de la fonction objectif.

Les projections de capacité de puissance générées par les IAM sont considérées comme crédibles. L'optimisation vise donc à minimiser la différence entre la capacité de puissance optimisée (S) et les capacités projetées par les IAMs (S_0), en apportant uniquement les modifications nécessaires pour inclure les limites en ressources et production minière. Pour ce faire, la fonction objectif minimise la variation relative au carré entre S et S_0 . La matrice de correspondance technologique $H(t_{\text{det}}, t_{\text{flex}})^2$ permet de ne pas pénaliser le passage d'un variant technologique à un autre, lorsque leur utilisation est considérée interchangeable. La traduction mathématique de la fonction objectif est donnée dans l'équation 4.1.

$$\min_S \left[\sum_{r, t_{\text{flex}}, d} \left(\left(\frac{\sum_{t_{\text{det}}} [H(t_{\text{det}}, t_{\text{flex}}) \times S(r, t_{\text{det}}, d)] - S_0(r, t_{\text{flex}}, d)}{S_0(r, t_{\text{flex}}, d)} \right)^2 \right) \right] \quad (4.1)$$

Après une première simulation, le modèle ne pouvant pas converger avec la fonction objectif définie ci-dessus, il a été nécessaire d'ajouter des variables de relaxation pour les contraintes les plus restrictives. Ces variables de relaxation pénalisent fortement la fonction objectif en étant multipliées par M^3 , constante ayant pour valeur 10^{15} . Ainsi, le modèle utilise ces variables seulement si nécessaire. Les variables de relaxation associées aux ressources et à la production minière sont pondérées en fonction des quantités de ressources et de production de chaque métal.

$$\min_S \left[\sum_{r, t_{\text{flex}}, d} \left(\left(\frac{\sum_{t_{\text{flex}}} [H(t_{\text{det}}, t_{\text{flex}}) \times S(r, t_{\text{det}}, d)] - S_0(r, t_{\text{flex}}, d)}{S_0(r, t_{\text{flex}}, d)} \right)^2 \right) \right. \\ \left. + \sum_m \frac{M \times \text{Res}_{\text{relax}}(m)}{\text{Res}(m)} + \sum_{m, y} \frac{M \times \text{Mining}_{\text{relax}}(m, y)}{\text{Prod}(m, y)} \right. \\ \left. + \sum_{r, t_{\text{ren}}, d} M \times \text{CohMix}_{\text{relax}}(r, t_{\text{ren}}, d) \right] \quad (4.2)$$

2. Se référer à l'annexe F pour la liste et définition des paramètres

3. La valeur de M est déterminée par itérations successives. Elle est choisie de manière à pénaliser plus sévèrement l'utilisation des variables de relaxation, que la variation relative entre la variable de décision et le scénario IAM initial.

Par la suite, afin de délimiter le domaine du possible de la variable S , il est nécessaire de contraindre le modèle. Les **contraintes** correspondent aux limites et exigences appliquées au problème et délimitent l'ensemble des valeurs potentielles de la variable.

4.3.2 Contrainte de Demande en Énergie

La première contrainte a pour but de conserver la même quantité d'énergie générée entre le scénario initial et le scénario optimisé. Pour ce faire, les facteurs de charge de chaque source d'énergie doivent être déterminés.

Déterminer les facteurs de charge des sources d'énergie

Une capacité de puissance correspond à la puissance maximale, dite nominale, qu'une technologie pourrait théoriquement générer, en fonctionnant à plein régime et sans aucune imperfection. Cependant, en raison de l'efficacité de la technologie considérée, des conditions météorologiques de fonctionnement et du temps pendant lequel la technologie est opérationnelle (notamment pour les énergies intermittentes), l'énergie réellement produite peut varier. Le facteur de charge est le rapport entre l'énergie effectivement produite et la puissance nominale de la technologie, et s'exprime en général sous forme de pourcentage. Lors de l'ajout de flexibilité entre les sources d'énergie, la puissance nominale de chaque technologie est modifiée. Afin d'assurer la quantité finale d'énergie générée par le scénario de déploiement technologique, il est donc essentiel de disposer de facteurs de charge précis pour chaque technologie.

Collecter les facteurs de charges depuis les IAM En plus des capacités de puissance installées (S_0), on retrouve dans la base de données de l'IASA l'énergie secondaire produite par source d'énergie, pour les différentes modélisations IAM des scénarios SSP-RCP [23]. Le Facteur de Charge (FC) estimé par chaque IAM est obtenu grâce au rapport entre la capacité installée et la production d'énergie secondaire de chaque technologie, multiplié par un facteur de conversion :

$$FC(r, d, t) = \frac{\text{Energie secondaire}(r,d,t)}{S_0(r, d, t)} \times 0.031536 \times 100 \quad (4.3)$$

Grâce à un script Python, ces données sont téléchargées et stockées de la même manière que pour les capacités de puissance. Un dossier de facteurs de charge est créé pour chaque IAM et scénario (SSP-RCP), contenant un fichier Excel pour chaque région. Ces fichiers sont

constitués des facteurs de charge de chaque technologie considérée par l'IAM, de 2005 à 2100, avec une résolution temporelle décennale.

Traiter les facteurs de charges des IAM Chaque IAM ayant une résolution technologique différente, les technologies considérées pour les FC varient d'un modèle à l'autre. Par exemple, certains IAM ne fourniront pas de FC pour la géothermie ou les centrales hydro-électriques. De plus, en analysant les données de FC, nous avons observé des FC supérieurs à 100 % pour la biomasse, ce qui signifierait que l'énergie générée est supérieure au potentiel maximum. Nous avons également constaté des données manquantes pour certaines années spécifiques. Afin d'harmoniser nos résultats et de corriger ces incohérences, les données manquantes pour certaines technologies et années, ainsi que les FC de la biomasse supérieurs à 85 %, ont été remplacés par des valeurs trouvées dans la littérature [8,36,72,73]. Les FC de la littérature et les sources utilisés sont détaillés dans le tableau 4.2.

TABLEAU 4.2 Facteurs de charge des sources d'énergie

Source d'énergie	FC	Source
Solaire PV	16 %	[72]
Solaire à couche fine	10 %	[8]
CSP	42 %	[72]
Éolien terrestre	36 %	[72]
Éolien maritime	39 %	[72]
Biomasse	70 %	[72]
Charbon	81 %	[8]
Gaz	80 %	[36]
Pétrole	13 %	[74]
Géothermique	81 %	[72]
Centrale hydraulélectrique	45 %	[72]
Nucléaire	81 %	[73]

Désagréger les facteurs de charges IAM par sous-technologie Les technologies considérées par les IAM agrègent plusieurs sous-technologies qui ont des FC différents. L'évolution des FC dans le temps inclut donc le progrès technologique ainsi que des changements de parts de marché des sous-technologies. Il est donc difficile d'isoler le critère influençant l'évolution du FC dans le temps. Les FC des éoliennes terrestres et maritimes, ainsi que ceux des sous-technologies solaires photovoltaïques étant proches, ils ont été considérés identiques

à ceux de la technologie agrégée [72]. Cependant, le FC du solaire CSP est significativement plus élevé que celui du solaire PV. La part de marché des CSP dans le solaire en 2020 est proche de 0. Afin d'isoler l'évolution de cette part de marché dans le temps, le FC des panneaux PV des IAM en 2020 est considéré comme fixe, et utilisé jusqu'en 2050. Pour la technologie CSP solaire, les FC de la littérature ont été appliqués.

Equation mathématique de la contrainte de Demande en Energie

L'énergie totale générée par l'ensemble des technologies dans le modèle optimisé doit être égale à celle du modèle initial, pour chaque décennie d et pour chaque région r . L'énergie générée par une technologie t est le produit de la capacité de la puissance installée et du facteur de charge de la technologie.

$$\begin{aligned} \sum_{t_{\text{flex}}} \left[\sum_{t_{\text{det}}} H(t_{\text{det}}, t_{\text{flex}}) \times S(r, t_{\text{det}}, d) \right] \times CF(r, t_{\text{flex}}, d) \\ \geq \sum_{t_{\text{flex}}} [S_0(r, t_{\text{flex}}, d) \times CF(r, t_{\text{flex}}, d)], \quad \forall r, d \end{aligned} \quad (4.4)$$

4.3.3 Contrainte de Cohérence du Mix Technologique dans le temps

Le mix technologique optimisé doit être cohérent dans le temps. Les capacités installées prévues en 2020 par les IAM dans le scénario initial sont conservées dans le scénario optimisé.

$$\sum_{t_{\text{det}}} H(t_{\text{det}}, t_{\text{flex}}) \times S(r, t_{\text{det}}, 2020) = S_0(r, t_{\text{flex}}, 2020), \quad \forall r, t_{\text{flex}} \quad (4.5)$$

La capacité installée d'une technologie au cours des années précédentes est toujours installée durant les années suivantes. La fin de vie des sources d'énergie n'est pas prise en compte dans le modèle. Il est seulement possible d'installer de nouvelles capacités aux années successives.

$$S(r, t, d) + \text{CohMix}_{\text{relax}}(r, t, d) \geq S_0(r, t, d - 1), \quad \forall r, t, d \quad (4.6)$$

4.3.4 Contrainte de Plafonnement de l'investissement Fossile

Afin de conserver l'objectif climatique considéré par les scénarios SSP-RCP lors des modélisations des IAM, on considère que la capacité installée des technologies fossiles ne peut pas dépasser celle du modèle initial dans la version optimisée.

$$S(r, t_{foss}, d) - S_0(r, t_{foss}, d) = 0, \quad \forall r, t_{foss}, d \quad (4.7)$$

4.3.5 Contrainte de Ressources en Métal

La consommation cumulée de chaque métal m en 2050 doit être inférieure aux données de ressources collectées. L'équation détaillée dans le Chapitre 3, dans la section 3.6, est réutilisée pour cette contrainte. Une variable de relaxation est ajoutée, et prendra une valeur positive si le modèle n'est pas capable de trouver une solution. La valeur de cette variable de relaxation correspond à l'excès de ressources consommées.

$$\begin{aligned} & \sum_{r, t_{ren}, d} \left(\frac{IM(d, t, m) + IM(d-1, t, m)}{2 \times RR_{Res}(m)} \times (S(r, t, d) - S(r, t, d-1)) \right) \\ & + \sum_d \frac{OTD_d(m, d)}{RR_{Res}(m)} + \sum_d OSD_d(m, d) \\ & \leq Res(m) + Res_{relax}(m), \quad \forall m \end{aligned} \quad (4.8)$$

4.3.6 Contrainte de Production Minière

La consommation annuelle de chaque métal m et chaque décennie d doit être inférieure à la production. De nouveau, l'équation détaillée dans la section 3.6 est réutilisée pour cette contrainte, à laquelle est ajoutée une variable de relaxation. La valeur de cette variable de relaxation reflète l'excès de production minière utilisée.

$$\begin{aligned} & \sum_{(r, t_{ren})} \frac{IM(m, t_{ren}) \times (S(r, t_{ren}, d) - S(r, t_{ren}, d-1))}{10 \times RR_{Prod}(m)} + \frac{OTD_y(m, y)}{RR_{Prod}(m)} + OSD_y(m, y) \\ & \leq Prod(d, m) + Mining_{relax}(m, d), \quad \forall m, y \end{aligned} \quad (4.9)$$

Cependant, après la première itération du modèle, la variable de relaxation sur la production minière dépassait souvent 0, créant de manière irréaliste une production en métaux factice. Pour remédier à cela et simuler les mécanismes d'adaptation du marché, une variable α a été intégrée au modèle. Cette variable, définie par l'utilisateur lors du lancement de l'optimisation, suppose qu'un pourcentage α de la demande en métaux des autres secteurs est réservé au secteur de l'énergie. Cette variable a été fixée à 5 % lors de nos modélisations, car il semble raisonnable de réserver cette part de la demande en métaux pour le secteur énergé-

tique, considéré comme essentiel. Cette relaxation est motivée par l'urgence climatique, qui pourrait justifier une réduction de la consommation métallique dans le reste de l'économie pour préserver les ressources nécessaires au secteur énergétique.

$$\begin{aligned}
& \sum_{(r,t_{\text{ren}})} \frac{IM(m, t_{\text{ren}}) \times (S(r, t_{\text{ren}}, d) - S(r, t_{\text{ren}}, d - 1))}{10 \times RR_{\text{Prod}}} \\
& \leq \max \left[\text{Prod}(d, m) - \frac{OTD_y(m, y)}{RR_{\text{Prod}}} - OSD_y(m, y), \right. \\
& \quad \left. \frac{\alpha}{100} \left(\frac{OTD_y(d, m)}{RR_{\text{Prod}}} \right) + OSD_y(d, m) \right] \\
& + \text{Mining}_{\text{relax}}(m, d), \quad \forall m, y
\end{aligned} \tag{4.10}$$

4.3.7 Contraintes d'Accès aux sources d'énergie

Lors de la première itération du modèle, certaines sources d'énergie peu exigeantes en métaux ont vu leur installation fortement augmenter lors de l'ajout de flexibilité, au-delà des ressources biophysiques accessibles. D'une part, la biomasse est largement contrainte par la disponibilité des terres dans le temps. D'autre part, l'installation d'hydroélectricité suppose la présence de cours d'eau spécifiques dans chaque région. Le potentiel d'implantation future de ces technologies a donc été étudié avec plus de précision pour permettre des projections de mix énergétiques réalistes.

Estimer le potentiel d'installation de la biomasse dans le temps

Biomasse et utilisation des terres L'énergie de biomasse est générée à partir de la combustion de matière organique. L'utilisation de la biomasse est controversée, car selon la matière utilisée pour produire l'énergie, cette source d'énergie dite renouvelable pourrait ne plus l'être. En effet, la biomasse peut être réalisée à partir de déchets provenant de la foresterie, des résidus de culture ou encore de résidus alimentaires. Cependant, une expansion importante de cette énergie nécessiterait l'utilisation de terres de culture à destination de l'énergie de biomasse seulement [75] Cela ajouterait une grande pression sur l'utilisation des terres, nécessaires à produire la nourriture ainsi que pour le stockage du carbone, et pourrait mener à une importante déforestation [76].

Estimation du potentiel d'installation de la biomasse Estimer le potentiel d'installation de la biomasse est donc compliqué, et varie grandement selon les hypothèses réalisées. L'IRENA a supposé que le potentiel de biomasse pourrait varier entre 97 et 147 EJ en 2030,

et entre 50 et 1500 EJ en 2050 [77]. Il y a donc une importante incertitude sur cette donnée. L'étude de Errera et al. a été utilisée pour estimer le potentiel d'installation de la biomasse d'ici 2050 [78]. L'étude considère trois scénarios : « Maintien du statu quo » (BUS), « Tendances optimales » (OPT) et « Réponse d'adaptation complète » (FAR). Les hypothèses intrinsèques à chaque scénario réalisées dans l'étude sont décrites ci-après (Tab : 4.3).

TABLE 4.3 Résumé des hypothèses adoptées dans les scénarios de potentiel d'installation de la biomasse, reproduit de [78]

Aspects considered in the scenarios	BUS	OPT	FAR
Population Growth	High	Moderate	Stabilized
Food Waste	Current practices	Measures to reduce waste	No food waste
Meat consumption	Rampant consumption by 2050	Partial replacement of beef by other meats or non-beef proteins	Full vegetarian diet, or non-animal protein with dairy products diet (100 %)
Agricultural Productivity	Decreasing due to externalities	Gradual efficiency gains	Highest efficiency gains possible
Degraded and abandoned land	Highest projections	Lowest projections	Recovery of degraded land converted to arable land
Energy Conversion Technology improvements	Little or no gain in efficiency	Innovations and efficiency gains	Technology paradigm shift towards maximum gains

Calcul et traitement des données Les résultats de cette étude étant fournis pour 2050 seulement, une linéarisation a été effectuée entre 2020 et 2050 pour estimer le potentiel d'installation de la biomasse en 2030 et 2040, en effectuant l'hypothèse que cette installation suit une tendance linéaire. L'énergie générée en 2020 par la biomasse a été estimée à partir du rapport de l'association mondiale de l'énergie en 2022 [79]. Les données de l'étude étant en Exajoule par année, une conversion des données a été réalisée. Le facteur de charge utilisé a été de 80 %, selon les données du rapport de l'IRENA [72].

TABLEAU 4.4 Potentiel d'installation de la biomasse (GW) de 2020 à 2050 [78]

Scénarios	2020	2030	2040	2050
Maintiens du statu quo	2 278	2 309	2 416	2 523
Tendance optimale	2 278	5 597	8 991	12 386
Réponse d'adaptation complète	2 278	17 200	32 198	47 195

Afin de ne pas surestimer les projections en biomasse, le scénario utilisé dans notre étude est le plus contraignant, soit le scénario « Maintien du statu quo » (BUS). Cependant, les calculs ont été effectués pour les trois scénarios, rendant possible le changement de cette variable lors de l'optimisation.

Contrainte d'Accès à la Biomasse

La capacité totale installée dans le monde pour la technologie "biomasse" doit être inférieure ou égale au potentiel de production de biomasse ($Biom_P$) maximum estimé dans la littérature (4.3.7).

$$\sum_r S(r, Biomass, y) \leq Biom_P(y), \quad \forall y \quad (4.11)$$

Estimer le potentiel d'installation de l'hydraulique par région

Les centrales hydrauliques génèrent de l'électricité à partir d'eau tombante en convertissant l'énergie potentielle, ou d'eau coulante à partir de l'énergie cinétique. Les centrales hydrauliques ne peuvent donc pas être installées partout. En effet, moins de 27,6 % de cette ressource serait accessible dans les pays de l'hémisphère sud [80].

L'étude de Garnaat et al. a évalué le potentiel d'installation d'hydroélectricité selon les conditions géographiques. Ils ont réalisé différents scénarios de potentiel d'installation, selon l'impact de l'installation sur la biodiversité, ainsi que le prix de l'énergie. Les hypothèses provenant de l'étude sont résumées au tableau 4.5. Afin de minimiser l'impact sur l'environnement, le scénario « Technical Ecological » a été utilisé lors des modélisations.

Un mappage a été réalisé entre la division géographique utilisée dans l'étude de Garnaat et al. et les régions des IAM. La plupart des régions correspondaient directement. Cependant, les régions Europe et Amérique du Nord de l'étude ont dû être agrégées pour s'aligner avec

TABLE 4.5 Résumé des hypothèses adoptées dans les scénarios de potentiel d'installation de l'hydroélectricité, reproduit de [80]

Potential	Description
Full	Full deployment on all rivers across the globe, excluding only the first 200 km upstream of basin outlets of rivers deeper than 4 m (river mouth restriction) and the area in the vicinity of large bodies of water such as lakes or wide rivers.
Remaining	Similar to full potential, except that : hydropower installations are not allowed in nature protected areas ; hydropower production by existing installations is excluded ; new hydropower sites are not allowed downstream of the first existing dam on basin main stems.
Remaining ecological restrictions	Similar to remaining potential, except that all hydropower stations are required to release at least 30 % of the discharge to maintain natural river flow (ecological flow restriction) and a preference for small reservoirs in the final optimization method that avoids double counting of overlapping reservoirs.

Note : Within each category, a further distinction is made between technical potential (<US\$0.50 kWh⁻¹) and economic potential (<US\$0.10 kWh⁻¹).

les régions REF et OECD des IAM.

Contrainte d'Accès à l'Hydroélectricité

Pour chaque région, le total des capacités installées de la technologie hydraulique entre 2020 et 2050 ne doit pas dépasser le potentiel d'installation d'hydraulique ($Hydro_P$) de chaque région r (4.3.7).

$$S(r, \text{Hydro}, 2050) - S(r, \text{Hydro}, 2020) \leq \text{Hydro_P}(r), \quad \forall r \quad (4.12)$$

TABLE 4.6 Potentiel d'installation de l'hydroélectricité (GW) par région [80]

Régions IAM	MAF	ASIA	OECD + REF		LAM
Régions de l'étude	Africa	Asia	Europe	North and Central America	South America
Technical Remaining	257	426	39	92	269
Technical Ecological	152	251	27	58	159
Economic Remaining	164	242	23	41	180
Economic Ecological	88	147	17	26	97

4.4 Conclure sur la faisabilité du mix techno flexible et évaluer des technologies à recommander

4.4.1 Évaluer la faisabilité du mix techno flexible

Le résultat de l'optimisation présenté à la section précédente est la variable définie précédemment, soit un mix de capacités installées techno-flexible S . La quantification de la demande en métaux du nouveau mix (sous-objectif 2.2) et la conclusion sur la faisabilité du mix (sous-objectif 2.3) sont réalisées selon la même méthodologie que celle présentée au Chapitre 3, en remplaçant le mix S_0 par le nouveau mix S .

4.4.2 Identifier des technologies à prioriser pour la transition énergétique

Afin d'identifier les technologies à privilégier pour réaliser la transition énergétique sans dépasser les limites d'offre en métal (Objectif 3, présenté en section 2.3.4), il est nécessaire d'évaluer la différence d'installation de technologie entre le mix IAM initial et le mix flexible (sous-objectif 3.1). Pour ce faire, par souci de visibilité, les technologies à couches fines ont été agrégées. Les technologies éoliennes ont été regroupées par catégories selon qu'elles soient terrestres ou maritimes, et avec ou sans aimant permanent. L'équation utilisée pour calculer la variation dans les puissances installées par technologie est présentée ci-dessous :

$$\text{Variation de Puissance}(t, d) = \sum_r (S(r, t, d) - S_0(r, t, d)) \quad (4.13)$$

CHAPITRE 5 RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats de l'étude en trois parties. D'abord, l'outil logiciel développé pour estimer la demande et l'offre en métal est détaillé. Ensuite, une analyse des résultats pour un scénario spécifique est effectuée. Enfin, les modélisations d'un scénario RCP précis sont comparées entre différents narratifs SSP.

5.1 Outil logiciel

Dans cette première partie, il est présenté l'outil réalisé pour effectuer les calculs présentés précédemment en méthodologie.

5.1.1 Informations générales nécessaires à l'utilisation de l'outil logiciel

Description de l'outil Le premier livrable de ce projet est un outil logiciel permettant d'une part de quantifier l'approvisionnement et la demande en métal par secteur jusqu'en 2050, basé sur les projections énergétiques de différents IAM et scénarios SSP-RCP. D'autre part, ce code permet de calculer par optimisation la variation minimale requise, à partir du mix technologique IAM, afin de limiter le dépassement de la demande au-delà des contraintes d'approvisionnement en métal.

L'outil logiciel est disponible sur GitHub au lien suivant :

— **Répertoire du Code** : iam-metal-demand-optimizer

Les données nécessaires pour générer les résultats du RCP 2.6 sont disponibles sur Zenodo au lien suivant :

— **Données** : données-zenodo

L'outil logiciel réalisé est donc en libre accès et les résultats sont reproductibles, l'ensemble des données étant partagées dans des fichiers Excel externes. Dans la suite de cette section, l'outil logiciel et la méthode pour l'utiliser vont être décrits. Pour plus de spécifications afin de refaire les modélisations réalisées, voir le document README disponible avec le code, en suivant le lien GitHub.

5.1.2 Paramètres choisis par l'utilisateur

L'outil logiciel est structuré sous forme de classe, subdivisée en plusieurs méthodes. Pour initialiser la classe, l'utilisateur doit fournir sept paramètres au constructeur `__init__`.

- **folder_path** : [string] chemin dans l'ordinateur de l'utilisateur vers les données externes utilisées dans le code
- **result_path** : [string] chemin dans l'ordinateur de l'utilisateur pour stocker les résultats générés par le code
- **model_s0** : [string] IAM que l'utilisateur souhaite étudier¹
- **scenario** : [string] combinaison de scénarios SSP - RCP que l'utilisateur souhaite étudier, sous la forme « SSPx-numRCP »^{2 3}
- **ModelisationType** : [string]
 - *Init* pour étudier la demande en métaux du mix énergétique initial
 - *Opti* pour générer une optimisation du mix énergétique initial et étudier la demande en métaux du mix optimisé
- **Alpha** : [int] valeur en pourcentage de la part acceptable de dépassement de la demande en métaux du secteur énergétique par rapport à l'OSD et l'OTD pour la contrainte d'optimisation de la production de métaux par année⁴
- **ResLimit** : [string] Limite à appliquer lors de l'optimisation de la demande cumulée en métal, choisir parmi *Réserves* ou *Ressources*⁵

5.1.3 Méthodes de l'outil logiciel

L'outil logiciel comprend vingt et une méthodes, toutes appelées sans nécessiter d'arguments supplémentaires. Chacune de ces méthodes fait référence à une partie de la méthodologie, qui est indiquée entre parenthèses.

Méthodes d'estimation de la demande et de l'offre en métal

- **MI** : Calcul l'intensité métallique de chaque technologie dans le temps (3.2.2)

1. Choisir parmi les six IAM : AIM..CGE, GCAM4, IMAGE, MESSAGE-GLOBIOM, REMIND-MAGPIE, WITCH-GLOBIOM

2. Ex : SSP1-26

3. Choisir parmi la liste du fichier Excel disponible sur zenodo « Existing IAM modelisation », car l'ensemble des combinaisons SSP (1, 2, 4, 5) et RCP (19, 26, 34, 45, 60) ne sont pas modélisées par les IAM

4. La valeur α choisie initialement est de 5

5. La valeur ResLimit choisie initialement est *Ressources*

- **CF** : Calcul le FC par sous-technologie (4.3.2)
- **IAM_power** : Collecte et désagrèges-en sous technologies précises les capacités de puissances de la modélisation SSP-RCP de l'IAM choisie (3.2.1)
- **OTD** : Calcul la demande en métal des autres secteurs de la transition (3.3)
- **OSD** : Calcule la demande en métal du reste de l'économie (3.4)
- **FutureProd** : Estime la production métallique future en tonnes par an (3.5.2)

Méthodes d'optimisation du mix

Ces méthodes ne sont à appeler que lorsque la variable `ModelisationType` prend la valeur *Opti*, et qu'on cherche à calculer le mix technologique flexible.

- **modelDef** : Définition des variables et du modèle d'optimisation (4.2)
- **modelObj** : Fonction objectif du modèle (équation : 4.2)
- **CstrEnergyDemand** : Contrainte de génération d'énergie (équation : 4.4)
- **CstrTechnoCoherence** : Contrainte de cohérence technologique dans le temps (équation : 4.5)
- **CstrCappedFoss** : Contrainte de plafonnement d'installation fossile (équation : 4.7)
- **CstrMetalRes** : Contrainte limitant la demande cumulée en métal en deçà de `ResLimit` (équation : 4.8)
- **CstrMetalMining** : Contrainte limitant la demande annuelle en métal en deçà de la production, ou sous un pourcentage α de la demande des autres secteurs (équation : 4.10)
- **CstrBiomassAvail** : Contrainte de l'installation de la biomasse en deçà du potentiel maximum (équation : 4.11)
- **CstrHydroAvail** : Contrainte de l'installation de centrales hydroélectriques en deçà du potentiel maximum (équation : 4.12)
- **resOpti** : Calcul des résultats de l'optimisation

Méthodes de calcul et de sauvegarde des résultats

- **CalculResults** : Calcul la demande en métaux du mix IAM initial ou du mix optimisé (3.6)
- **SaveResults** : Sauvegarde les résultats de puissance installée et de demande en métal
- **Save_OSD_OTD_Prod** : Sauvegarde la demande des autres secteurs de la transition et du reste de l'économie, ainsi que la production en métal annuelle

- **SaveEffortBySociety** : Sauvegarde pour chaque métal et chaque décennie la contrainte utilisée lors de l'appel de *CstrMetalMining* entre la production et α (équation : 4.10)

5.1.4 Résultats générés par l'outil logiciel

Les résultats de l'outil logiciel sont stockés dans un dossier nommé « ModelisationType », tels que :

- Un dossier « Metal Demand ByYear », composé d'un fichier Excel par métal, avec la demande annuelle en tonnes divisée par secteur (en ligne) et par décennies (en colonnes)
- Un dossier « Metal Demand Cumulated », composé d'un fichier Excel, avec la demande cumulée en tonnes par métaux (en ligne) et par secteur (en colonnes)
- Un dossier « Power Capacity » composé des capacités installées, avec un Excel par région, et les puissances en GW par source d'énergie désagrégées (en ligne) et par décennies (en colonne).

Ensuite, dans un dossier « Broader Economy », on obtient :

- Un fichier Excel pour la production future par métaux (en ligne), et par décennie (en colonne)
- Quatre dossiers OSDd, OSDy, OTDd, OTDy, composés de la demande en tonnes par métaux (en ligne) et par décennie (en colonne), des autres secteurs de l'économie (OSD) et autres secteurs de la transition (OTD), cumulée par décennie (d) et par an (y)
- Un fichier Excel par métaux (en ligne) et par décennie (en colonne), composé de *Prod* si la méthode *CstrMetalMining* est contrainte par la production minière, et de *Society*, si elle est contrainte par α

5.2 Analyse des résultats du scénario SSP2 RCP2.6

L'outil logiciel réalisé permet d'effectuer 110 modélisations différentes, selon le modèle et le scénario choisis. Dans cette partie, les résultats obtenus lors de la réalisation du code pour une modélisation précise sont présentés.

5.2.1 Description des caractéristiques du scénario à l'étude

Choix du scénario Le **narratif SSP1**, ou « Durabilité - Prendre la route verte », est le scénario le plus optimiste en termes d'adaptation et de mitigation (description du narratif SSP1 en Annexe A). Le **scénario RCP 2.6** modélise une limitation de l'augmentation de

la température à 2°C, respectant les objectifs de l'Accord de Paris (Tab. 1.1). Le **scénario SSP1-26** suppose donc une importante transition vers les énergies renouvelables. Le modèle utilisé est l'IAM marqueur du scénario SSP1, soit **IMAGE** (Tab. 1.2). Ce scénario a donc été choisi pour étude afin de mettre en valeur la capacité de l'ajout de flexibilité à diminuer la demande en métaux d'un scénario optimiste, restrictif en termes de transition énergétique [15], et limitant de manière importante les changements climatiques.

Evolution of the World Cumulated Power Capacity - SSP1-26 IMAGE - Init

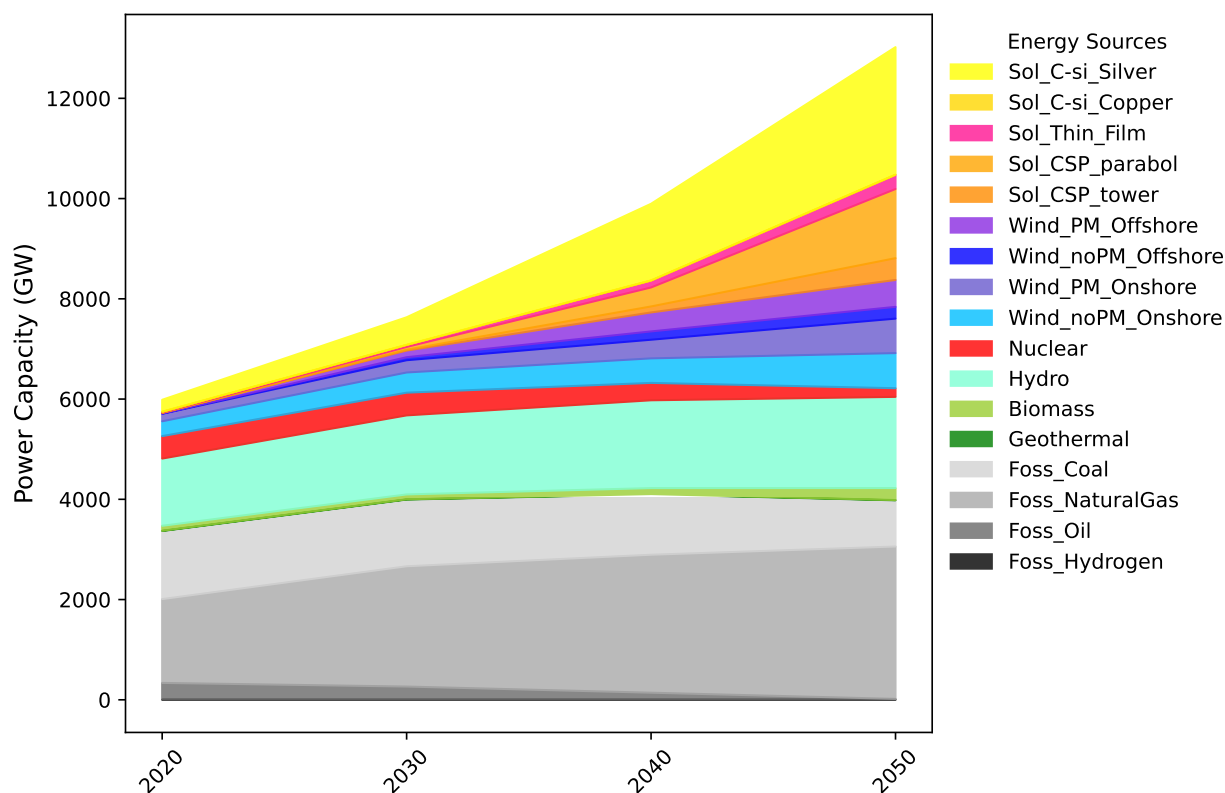


FIGURE 5.1 Évolution de la puissance installée cumulée en GW de 2020 à 2050 par source d'énergie. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP1-26 modélisé par IMAGE, après désagrégation des sous-technologies, mais sans ajout de flexibilité au mix technologique. Par souci de visualisation, les sous-technologies solaires à couches fines sont regroupées en une seule catégorie (rose). Les technologies éoliennes sont regroupées selon qu'elles soient terrestres (Onshore, en clair) ou maritimes (Offshore, en foncé), et qu'elles soient construites avec aimant permanent (PM, en violet) ou sans (noPM, en bleu)

PIB Le scénario SSP1-26 modélise une croissance économique mondiale de 2.2 % entre 2010 et 2100, ce qui est dans la moyenne haute des autres SSP (Tab 5.1) [13]. L'OSD étant basée sur le PIB, elle est donc relativement importante par rapport aux autres SSP.

Scénario AIE La **demande** en métal du **reste de la transition** est estimée à partir du scénario APS de l’AIE, supposant que les objectifs internationaux ont été atteints. La demande en métaux du reste de la transition est donc assez importante, bien qu’en deçà du scénario NZE.

5.2.2 Comparaison de la demande cumulée en métaux du scénario IAM et du scénario flexible avec les données de réserves et ressources

La figure 5.2 présente la **demande cumulée en 2050** pour chaque métal étudié. La demande est divisée par secteur de l’économie : le secteur énergétique en jaune, le secteur du reste de la transition en orange (réseau, stockage et VE) et le reste de l’économie en gris. La partie jaune hachurée correspond aux métaux du secteur énergétique dont la demande a diminué grâce à la modification du mix énergétique, et la partie rouge, à ceux pour lesquels elle a augmenté. La ligne pointillée bleue représente la limite en réserves, et la ligne pointillée rouge la limite en ressources pour laquelle l’optimisation a été réalisée.

Cette figure montre que la majorité des métaux ne sont pas concernés par des limitations en termes de ressources. Pour trois métaux sur vingt-deux, les consommations cumulées en 2050 sont **supérieures aux ressources : l’argent, le sélénium et le tellure**. 59 % de la demande du sélénium et 88 % de la demande du tellure provient du secteur de l’énergie. Ces métaux sont respectivement utilisés dans le solaire à couche fine CIGS et CdTe. Si les parts de marché prévues par la Commission Européenne pour le solaire sont mises en place, le mix énergétique proposé initialement par l’IAM pour le SSP1-26 demanderait donc plus de métaux que les ressources actuellement identifiées. Pour l’argent, 94 % de la consommation provient du reste de l’économie. Si la consommation d’argent suit l’évolution de la croissance économique, l’entièreté des ressources aura été consommée d’ici 2050, limitant donc potentiellement la mise en place de sources d’énergie à base d’argent comme le nucléaire et le solaire cristallin.

L’intégration de **flexibilité** au mix énergétique permet une **réduction significative de la demande cumulée** pour les métaux précédemment identifiés comme à risque. La demande du sélénium diminue de 249 000 tonnes après optimisation, tandis que celle du tellure se réduit de 188 000 tonnes, ce qui permet de rester en deçà des ressources de ces deux métaux. Pour l’argent, la demande initiale pour le reste de l’économie dépassant les ressources disponibles, l’optimisation ne parvient pas à diminuer cette demande en dessous des ressources. Néanmoins, elle se réduit de 115 000 tonnes, allégeant la pression sur les ressources d’argent.

Cumulated consumption of metals in 2050 in tons - Scenario SSP1-26 IMAGE, Alpha = 5

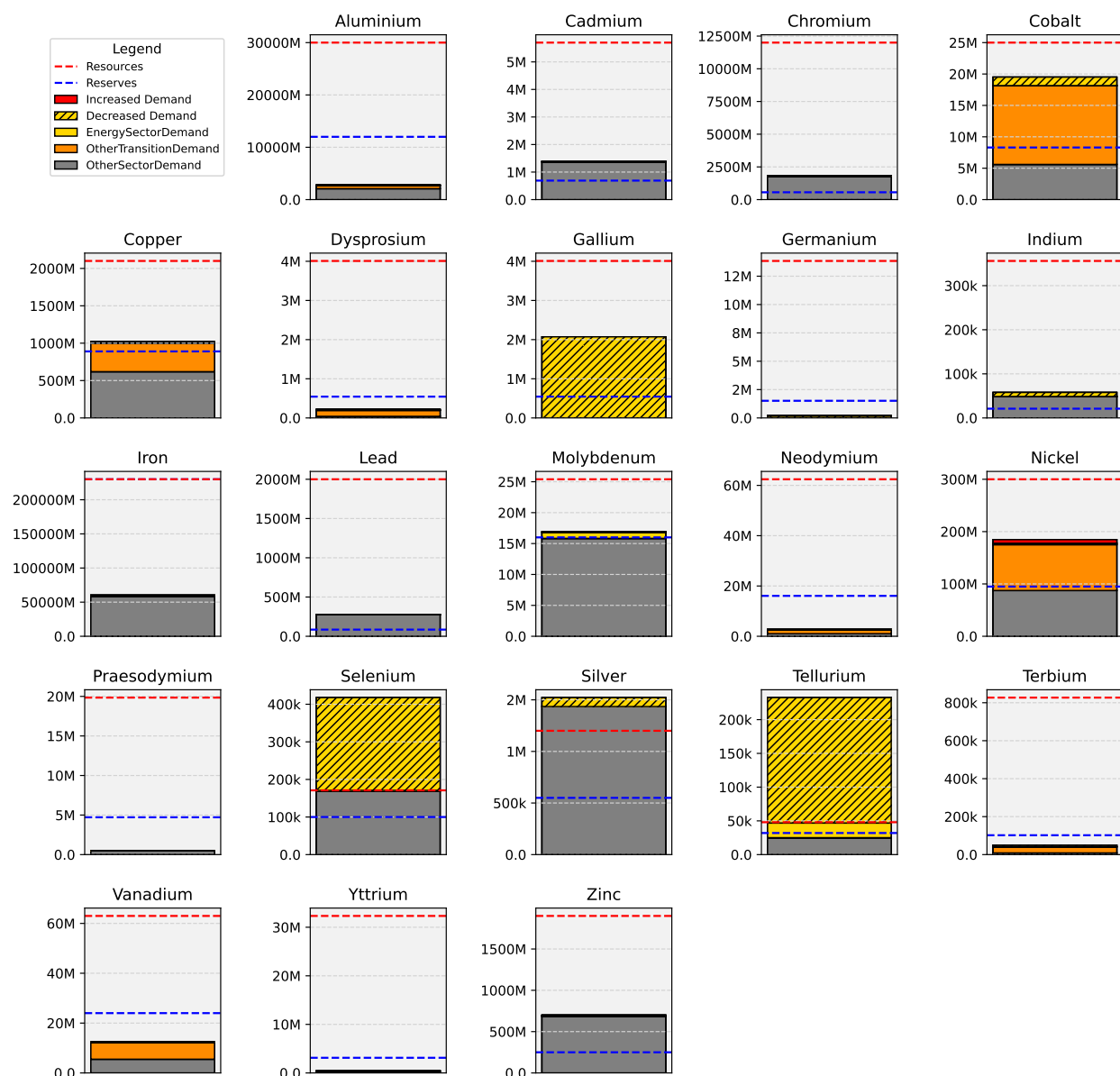


FIGURE 5.2 Demande cumulée par métaux en tonnes en 2050 nécessaires à la transition énergétique, divisée entre : le secteur énergétique (jaune), les autres secteurs de la transition (orange), et le reste de l'économie (gris). La variation de la demande du secteur énergétique dû à l'ajout de flexibilité technologique par l'optimisation est représentée par une réduction (jaune hachuré) ou une augmentation (rouge) de la demande. La consommation est évaluée par rapport aux réserves (pointillés bleu) et aux ressources (pointillés rouges). Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP1-26 modélisé par IMAGE, avec un alpha de 5

La flexibilité des technologies a permis de modifier les métaux utilisés pour générer l'énergie. D'autres métaux, moins concernés par des risques de disponibilité, ont vu leur **consomma-**

tion cumulée augmenter, comme le plomb, le nickel, le tantale et le zirconium.

5.2.3 Comparaison de la demande annuelle en métaux du scénario IAM et du scénario optimisé avec le potentiel de production

La figure 5.3 décrit la demande annuelle en tonnes par métal étudié. La demande est divisée par secteur de l'économie, selon le même code couleur que décrit précédemment. La demande du reste de l'économie s'affiche en gris clair lorsqu'elle est estimée à partir des données de la littérature, et en gris foncé quand elle est estimée selon la croissance économique. La production annuelle est représentée par une ligne pointillée bleue lorsqu'elle est estimée à partir de β (Annexe K), et en violet lorsqu'elle provient des données de l'AIE [63].

La figure 5.3 montre que le besoin d'accroissement rapide en production minière risque d'être un élément fortement limitant pour la transition énergétique. La **production de 18 métaux sur les 29 risque d'être insuffisante** pour répondre à la demande initiale. L'optimisation permet de supprimer ce déficit d'approvisionnement pour deux métaux.

Le **secteur solaire** est particulièrement affecté par les limitations d'approvisionnement. La demande en argent, excédant les capacités de production minière, pourrait compromettre le développement du solaire à base de silicium cristallin. Les technologies solaires à couches minces font également face à des contraintes en raison des risques d'approvisionnement en cadmium et en tellure (utilisés dans les panneaux CdTe), ainsi qu'en indium, gallium et sélénium (nécessaires pour le CIGS), et en germanium (pour la sous-technologie a-SiGe). De plus, les deux technologies CSP, qui nécessitent de l'argent, du cobalt et du gallium, risquent elles aussi d'être impactées. Ces contraintes mettent en péril les projections initiales sur l'évolution du solaire. L'ajout de flexibilité au mix énergétique permet toutefois de relâcher considérablement la pression sur ces métaux. En complément de la réduction cumulative déjà évoquée précédemment, l'optimisation a permis de diminuer la demande cumulée de plus de 1 million de tonnes de cobalt, de 2 millions de tonnes de gallium, de 150 000 tonnes de germanium et de 10 000 tonnes d'indium. Grâce à cette flexibilité, la pression sur l'approvisionnement en gallium, indium et tellure est éliminée. La production minière reste insuffisante pour les autres métaux, dont la demande, provenant à la fois d'autres secteurs de la transition et du reste de l'économie, dépasse toujours la production estimée.

Le **secteur de l'éolien** risque également d'être particulièrement touché par le manque d'approvisionnement en métal. La demande en dysprosium, néodyme et terbium, nécessaires

aux aimants permanents utilisés dans les éoliennes DD-PMSG et DD-PMSG, dépasse le potentiel de production. L'ajout de flexibilité technologique permet de diminuer la demande cumulée de 26 000 tonnes de dysprosium, 269 000 tonnes de néodyme et 10 000 tonnes de terbium. La demande du reste de l'économie et du reste de la transition est cependant supérieure au potentiel de production. La flexibilité n'est donc pas suffisante pour limiter toute pression.

La **demande du reste de la transition**, basée sur les projections de l'AIE, est également **irréaliste** si la production minière suit les tendances historiques. La consommation en dysprosium, néodyme et terbium, essentiels aux aimants permanents des véhicules électriques, augmente trop rapidement par rapport à nos capacités minières. La production de dysprosium et de néodyme ne suffira à répondre à la demande du reste de l'économie et des véhicules électriques qu'à partir de 2050. Quant au terbium, la production minière est plus lente et ne parvient pas à satisfaire la demande sur l'horizon d'étude. Le remplacement d'un grand nombre de voitures thermiques par des véhicules électriques est donc compromis à court terme. De même, la demande en cobalt, en nickel et en vanadium nécessaire au stockage de l'énergie (dans les véhicules électriques ou pour l'énergie), dépasse largement les projections du potentiel de production minière. Le même constat s'applique au cuivre, indispensable à la mise en place des réseaux électriques, dont la production minière, selon les projets annoncés à ce jour, diminue après 2030.

Future metal consumption and potential production in t/year - Scenario SSP1-26 IMAGE, Alpha = 5

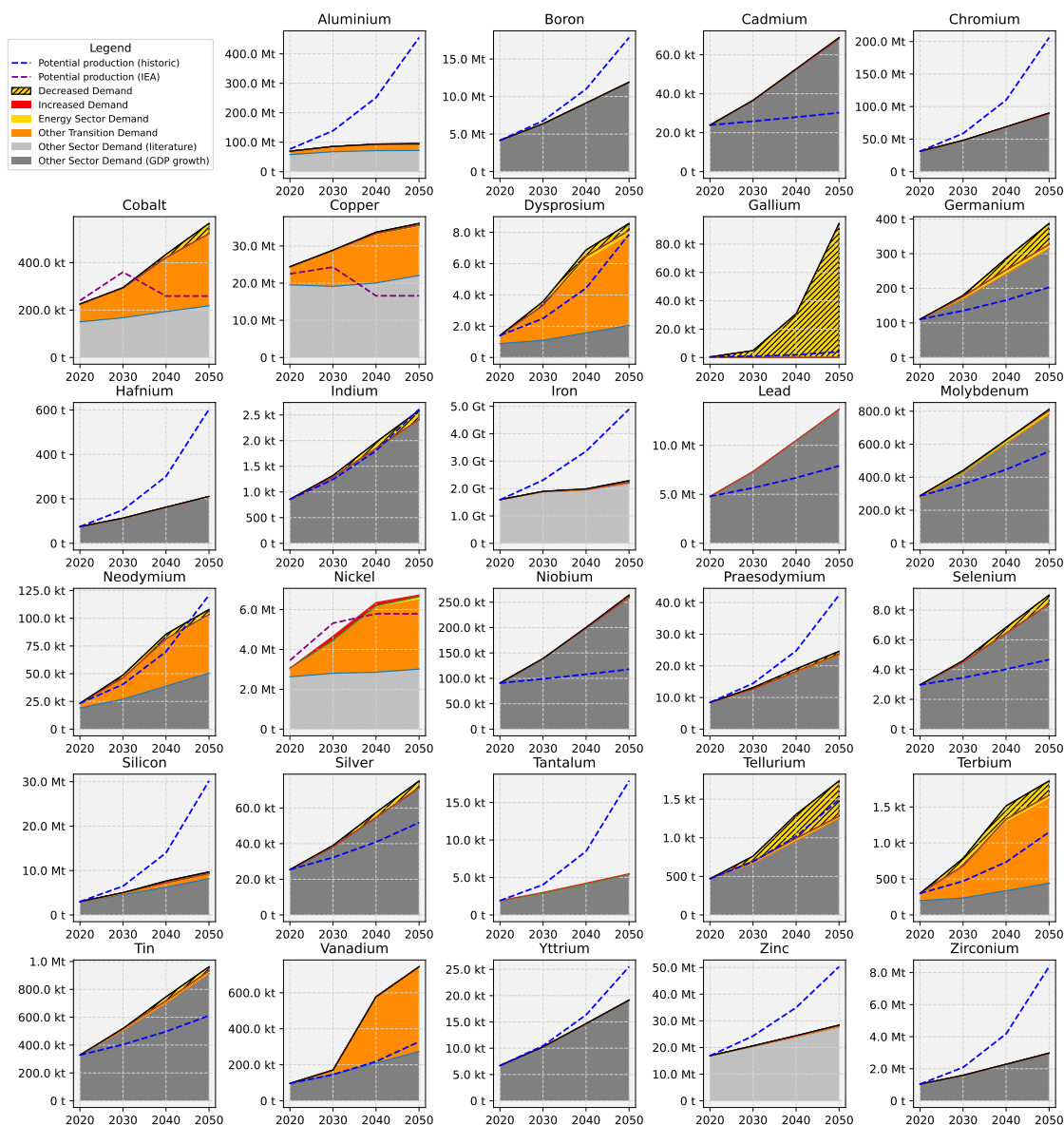


FIGURE 5.3 Demande annuelle par métaux en tonnes par an de 2020 à 2050 nécessaire à la transition énergétique, divisée par : secteur énergétique (jaune), autres secteurs de la transition (orange), et reste de l'économie (gris clair, lorsque basé sur les données de la littérature, et gris foncé, lorsque dérivé de la croissance économique). La variation de la demande du secteur énergétique dû à l'ajout de flexibilité technologique par l'optimisation est représentée selon que ce soit une réduction (en jaune hachuré) ou une augmentation (en rouge) de la demande. La consommation est évaluée face au potentiel de production annuelle (pointillés violets si basés sur les données de l'AIE et pointillés bleus si dérivés des tendances historiques). Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP1-26 modélisé par IMAGE, avec un alpha de 5.

5.2.4 Variation technologique nécessaire afin de diminuer la demande en métaux du secteur de l'énergie

La figure 5.4 montre la variation d'installation de capacité de puissance cumulée mondiale entre le scénario IAM SSP1-26 IMAGE et le mix de puissance généré par le logiciel d'optimisation après ajout de flexibilité au mix technologique. Entre 2020 et 2050, on a une variation positive de 4000 GW, ce qui représente environ un tiers du total des capacités installées cumulées en 2050. La variation négative est de 5000 GW.

L'installation de systèmes **solaires** en silicium équipés de conducteurs en argent devrait diminuer de 2400 GW cumulés d'ici 2050 pour réduire la demande en métaux. En effet, comme souligné précédemment, les réserves et les capacités d'approvisionnement de l'argent sont exposées à des risques significatifs. En outre, 52 % de cette technologie est susceptible d'être remplacée par des systèmes solaires en silicium dotés de conducteurs en cuivre. Les autres technologies solaires sont également sévèrement impactées par l'introduction de flexibilité. En effet, l'ensemble des technologies à couches fines devrait connaître une réduction de 250 GW en 2050, étant donné leur dépendance à de nombreux métaux critiques. De plus, l'installation cumulée des technologies CSP, qu'elles soient paraboliques ou à tour, est estimée à diminuer de 1400 GW et 430 GW, respectivement. En somme, le secteur solaire est globalement affecté, bien que les alternatives au silicium n'utilisant pas d'argent représentent une solution potentielle pour maintenir son utilisation.

Concernant l'**éolien**, les technologies reposant sur des aimants permanents, tant en mer qu'à terre, connaissent une réduction significative. En effet, 75 % des installations d'éoliennes onshore utilisant des aimants permanents ont été remplacées par des modèles sans ces dispositifs en 2050. De même, 50 % des éoliennes offshore équipées d'aimants permanents ont été substituées par des versions en étant dépourvues. Dans l'ensemble, une diminution des installations cumulées dans le secteur éolien est observée. Cependant, cette baisse est atténuée par le recours à des technologies éoliennes exemptes de terres rares.

Power variation with initial SSP1-26 IMAGE model after adding technological flexibility

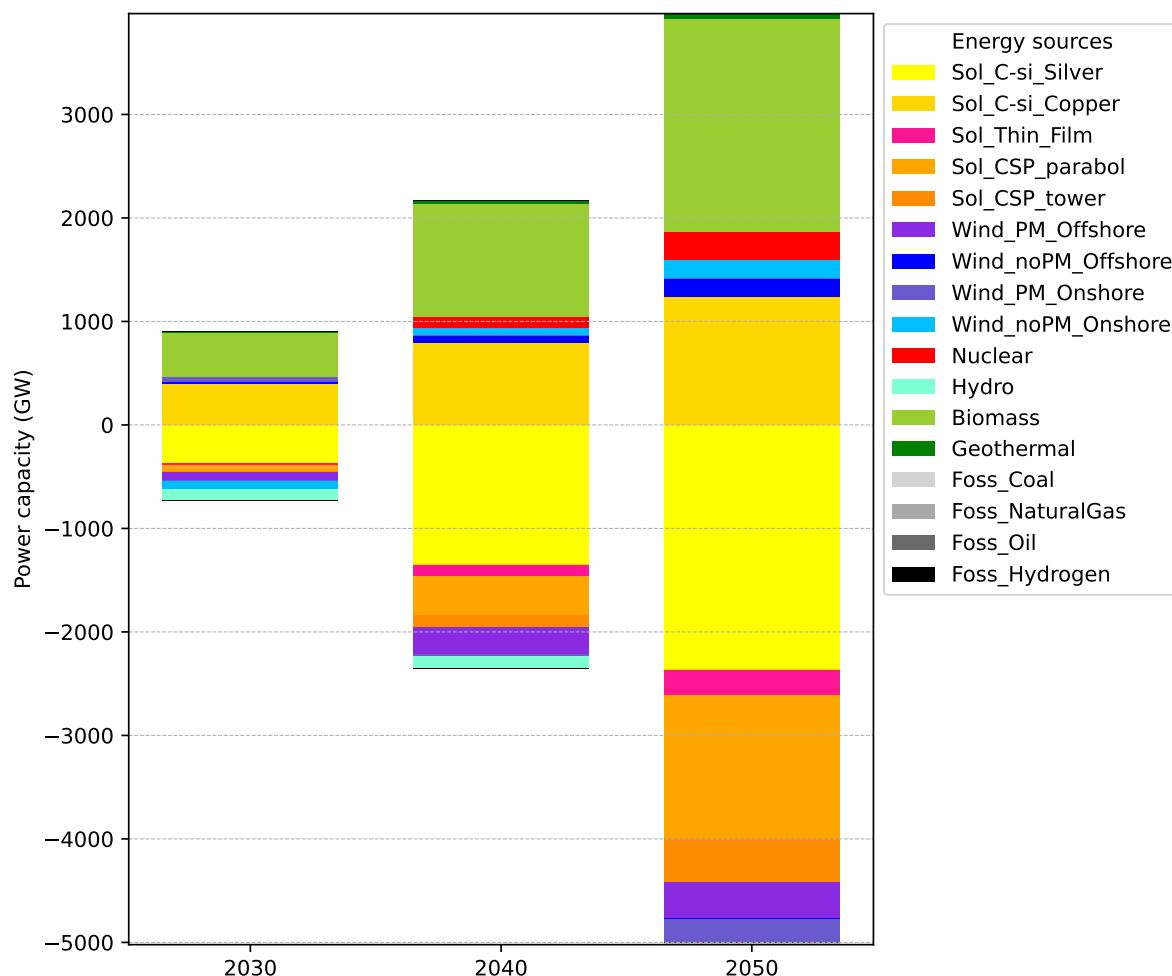


FIGURE 5.4 Variation d'installation de capacité de puissances cumulées mondiales en GW, par décennie, entre le scénario IAM initialement à l'étude (SSP1-26 IMAGE) et le nouveau mix de puissance généré par le logiciel d'optimisation après ajout de flexibilité au mix technologique. Les technologies dont la valeur se trouve au-dessus de 0 sont celles pour lesquelles l'installation de capacité de puissance a été augmentée, celles en dessous de 0 ont une diminution de leur puissance installée. Pour la facilité de lecture, les technologies solaires à couches fines (thin film, rose), suivant des tendances similaires, ont été agrégées. De même, les technologies éoliennes avec aimant permanent (PM, violet) et sans (noPM, bleu) sont regroupées selon chaque lieu d'installation : terrestre (Onshore, clair) et maritime (Offshore, foncé).

Finalement, les technologies remplaçant le solaire et l'éolien sont : la biomasse et le nucléaire, ainsi que la géothermie de manière marginale. L'installation cumulée du nucléaire en 2050 est augmentée de 275 GW. La biomasse, elle, a une augmentation de 2000 GW, ce qui représente la moitié des capacités nouvellement installées, et atteint pratiquement la limite

de son potentiel d'installation. Le nouveau mix après optimisation est présenté dans la figure 5.5.

Evolution of the World Cumulated Power Capacity - SSP1-26 IMAGE - Opti

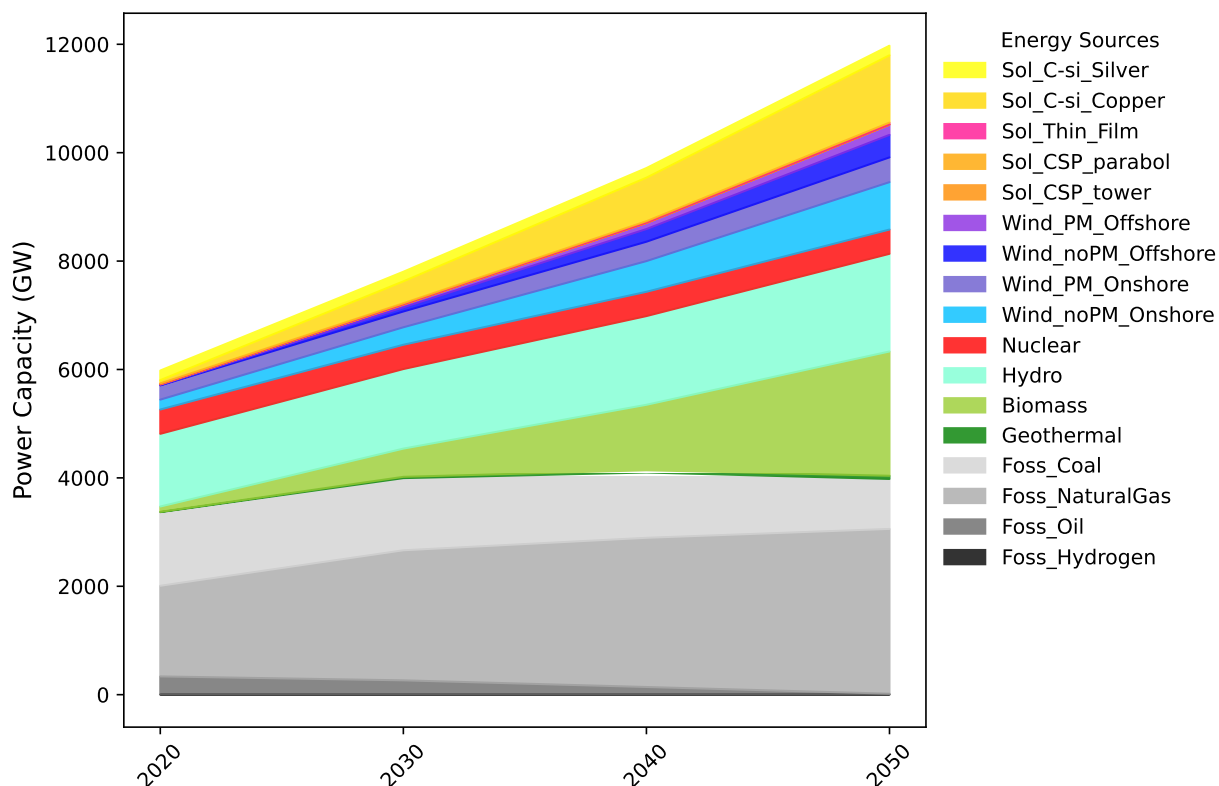


FIGURE 5.5 Évolution de la puissance installée cumulée en GW de 2020 à 2050 par source d'énergie, après ajout de flexibilité avec le logiciel d'optimisation. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP2-26 modélisé par MESSAGE-GLOBIOM, après désagrégation des sous-technologies, mais sans ajout de flexibilité au mix technologique. Par souci de visualisation, les sous-technologies solaires à couches fines sont regroupées en une seule catégorie (rose). Les technologies éoliennes sont regroupées selon qu'elles soient terrestres (Onshore, en clair) ou maritimes (Offshore, en foncé), et qu'elles soient construites avec aimant permanent (PM, en violet) ou sans (noPM, en bleu)

5.3 Résumé des grandes tendances du scénario RCP 2.6 selon différents narratifs SSP

Dans la partie précédente, les résultats liés au scénario SSP 2 - RCP 2.6 sont présentés. Cependant, le choix politique a une influence sur les résultats. Selon le SSP considéré, le mix technologique et donc la demande en métal varient. L'influence du choix du SSP sur les résultats pour un RCP 2.6 est décrite dans cette partie.

5.3.1 Facteurs d'influence du narratif SSP sur la demande en métal

Systèmes énergétiques par SSP Chaque scénario SSP est décrit par un narratif socio-économique différent. En termes de **systèmes énergétiques**, cela se traduit par différentes hypothèses d'évolution technologique. Le SSP1 et SSP4 sont définis par une transition vers des énergies renouvelables, ainsi qu'une demande en énergie respectivement basse et moyenne. D'autre part, le scénario SSP4 fait l'hypothèse d'une importante amélioration technologique du nucléaire, misant particulièrement sur cette technologie. Le SSP2 est un scénario intermédiaire, conservant un mix énergétique similaire à celui actuel. Le SSP5 est défini par une demande intensive en énergie, un développement technologique important dans le secteur fossile, et l'inclusion de technologies de capture de carbone (CCS) [15]. La demande en métal liée au secteur énergétique va donc beaucoup varier selon le SSP choisi. Les modèles IAM marqueurs ont été utilisés pour modéliser chaque SSP (Tab. 1.2). Les différents mix de puissance initiaux par SSP sont présentés en annexe M.

Scénario AIE De plus, la part du renouvelable étant plus importante dans les scénarios SSP1 et SSP4, le besoin d'augmentation du réseau et du stockage est plus important que pour les scénarios SSP2 et SSP5. Cela a été considéré lors du mappage avec les scénarios de l'AIE. Les modélisations du RCP 2.6 réalisées par le SSP1 et SSP4 ont été associées au scénario APS de l'AIE, qui requiert davantage de métaux critiques, alors que le SSP2 et SSP5 sont associés au scénario SPS (Tab. 3.3).

PIB Enfin, selon le scénario SSP considéré, l'hypothèse initiale de croissance économique varie, impactant l'hypothèse d'évolution de la demande du reste de l'économie. Le tableau 5.1 résume les hypothèses de croissance par scénario.

TABLE 5.1 Taux de croissance annuel moyen par SSP du PIB par habitant (2010-2100), reproduit de [13]

Region	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
High income countries	1.0 %	1.1 %	0.6 %	1.1 %	1.6 %
Middle income countries	2.8 %	2.7 %	1.8 %	2.7 %	3.3 %
Low income countries	4.1 %	3.5 %	1.6 %	2.3 %	4.4 %
World	2.2 %	2.0 %	1.0 %	1.7 %	2.8 %

Le scénario SSP influence donc la demande en métaux dans les trois secteurs analysés. Les contraintes de ressources et de production minière ne variant pas selon le scénario choisi, le choix du narratif SSP engendre des variations dans la pression exercée sur les métaux.

5.3.2 Demande cumulée en métaux selon les narratifs SSP

Comme dans le scénario SSP1, dans l'ensemble des scénarios considérés, c'est la **demande cumulée en argent**, en **sélénium** et en **tellure** qui dépassent les niveaux de réserve avant l'ajout de flexibilité technologique. Ces métaux, n'étant pas utilisés dans les technologies des autres secteurs de la transition, voient leur demande influencée principalement par la croissance économique et le mix technologique du secteur énergétique.

Pour tous les SSP, la **demande en tellure** provient principalement du secteur énergétique, et l'ajout de flexibilité technologique, en réduisant l'utilisation de cellules solaires CdTe, permet de diminuer considérablement la pression sur les ressources en tellure, ramenant la demande en dessous des niveaux de réserve disponibles après optimisation.

De même, la **demande cumulée en sélénium** dans le secteur énergétique dépend principalement de la part du solaire dans le mix initial, car ce métal est utilisé uniquement dans les technologies à couches minces CIGS. Dans les scénarios SSP2 et SSP4, la demande en sélénium dans le reste de l'économie et dans le secteur énergétique est similaire (Fig. N.1 et N.2). L'ajout de flexibilité technologique permet de réduire la demande de sélénium en dessous des ressources disponibles pour ces deux scénarios. Cependant, dans les scénarios SSP1 et SSP5, la demande du reste de l'économie est plus importante (Fig. 5.2 et N.3). Dans le SSP1, la flexibilité permet de limiter tout juste le dépassement des ressources, tandis que dans le SSP5, où la demande du reste de l'économie dépasse les réserves présumées, l'optimisation ne suffit pas à éviter un dépassement.

La **demande cumulée en argent** provient majoritairement du reste de l'économie, qui dépasse les ressources dans l'ensemble des SSP. L'ajout de flexibilité aux scénarios SSP2 et SSP4 qui supposent une croissance économique plus modérée permet de réduire considérablement le dépassement des ressources en argent d'ici 2050 (Fig. N.1 et N.2). En revanche, dans les scénarios SSP1 et SSP5, où la demande du reste de l'économie est plus élevée, l'ajout de flexibilité diminue la pression sur l'argent, mais le dépassement reste important (Fig. 5.2 et N.3).

Enfin, les métaux potentiellement contraints en ressources proviennent principalement de la demande du secteur énergétique et du reste de l'économie, ce qui en fait les facteurs les plus influents. La demande énergétique étant réduite grâce à l'ajout de flexibilité, la croissance économique considérée a un impact significatif sur les résultats après optimisation. Globalement, les scénarios SSP1 et SSP5 suivent des tendances similaires, bien que le scénario SSP1 soit moins contraint. Les scénarios SSP2 et SSP4 suivent également les mêmes tendances. Après l'ajout de flexibilité, tous les scénarios demeurent limités par l'argent. Les scénarios SSP1, SSP2 et SSP4 ne sont plus limités par le tellure ni le sélénium, tandis que le SSP5, caractérisé par une forte croissance économique, reste contraint par le sélénium.

5.3.3 Demande annuelle en métaux selon les narratifs SSP

Certains métaux ne sont concernés par **aucune contrainte d'approvisionnement** dans aucun des SSP. Ces métaux sont l'aluminium, le bore, le chrome, l'hafnium, le fer, le praséodyme, le silicium, le tantale, l'yttrium, le zinc et le zirconium. Ces métaux sont très peu utilisés pour la transition énergétique ou les autres secteurs de la transition, en comparaison de la demande du reste de l'économie, et ont une augmentation de production historique importante.

Le reste de l'économie

Pour certains métaux, la **demande du reste de l'économie** est supérieure à la projection de potentiel de production dû à une estimation de β faible (Annexe K), et une croissance économique constante. Les métaux concernés par ce dépassement initial dans l'ensemble des SSP sont l'argent, l'étain, le cadmium, le germanium, le plomb, le niobium et le sélénium. La demande annuelle en molybdène est également supérieure à la production annuelle dans tous les modèles sauf le scénario SSP4, dont la croissance économique est la plus faible. De même, la demande excède la production pour l'indium dans le SSP5, ayant la plus importante croissance économique. Si la demande du reste de l'économie augmente en suivant les tendances estimées de croissance économique, il sera nécessaire d'augmenter la production minière par rapport aux tendances actuelles. Les dynamiques de marché adaptant la demande du reste de l'économie à la production minière permettront probablement de réduire la consommation de ces métaux dans les secteurs économiques les moins essentiels.

Les autres secteurs de la transition

La **demande des autres secteurs de la transition** est importante pour le cobalt, le cuivre, le dysprosium, le néodyme, le nickel, le terbium et le vanadium.

Le vanadium, utilisé dans le stockage des batteries, est grandement contraint en approvisionnement dans l'ensemble des scénarios SSP. Dans les scénarios SSP1 et SSP4, associé au scénario APS, l'AIE considère que la demande en cuivre et en nickel du reste de l'économie est relativement stable (Fig. 5.3 et O.2). Le nickel vient à manquer à partir de 2040 dans les deux scénarios. Dans les scénarios SSP2 et SSP5, on constate un important manque d'approvisionnement en nickel sur toute la période étudiée (Fig. O.1 et O.3). La demande en cuivre provient majoritairement du reste de l'économie pour les scénarios SSP2 et SSP5, alors qu'une plus grande part est destinée au reste de la transition dans les scénarios SSP1 et SSP4. Malgré cette différence, un déficit d'approvisionnement en cuivre est constaté dans l'ensemble des scénarios. Malgré une variation de la demande du reste de l'économie et des autres secteurs de la transition, la demande en cobalt est relativement la même pour les 4 scénarios SSP. Les figures montrent que le cobalt subira un déficit d'approvisionnement entre 2030 et 2040, peu importe le narratif suivi.

Le dysprosium, le néodyme et le terbium sont majoritairement contraints dans les scénarios modélisant une importante croissance des VE, soit les scénarios SSP1 et SSP4. Il n'y a pas de dépassement de la demande par rapport à la production estimée pour ces métaux dans les scénarios SSP2 et SSP5, qui modélisent une croissance des VE plus modérée. Seul le terbium dans le scénario SSP5 serait contraint en approvisionnement, en raison d'une demande plus importante du reste de l'économie.

Le secteur de l'énergie

Selon le scénario SSP considéré, les hypothèses de mix énergétique initial varient grandement. Globalement, comme pour le SSP1, les métaux ayant une importante augmentation de consommation à destination du secteur énergétique et subissant une réduction avec l'ajout de flexibilité sont les métaux du **solaire** et de l'**éolien**.

Métaux du solaire Le scénario SSP1 modélisant une importante part de solaire, consomme dans son scénario initial davantage de gallium, de germanium, d'indium, de sélénium, d'argent et de tellure, que les estimations de production futures. Le scénario SSP5 est lui aussi

contraint par ces métaux, dû à une importante consommation du reste de l'économie. L'ensemble de ces métaux voit leur consommation diminuer avec l'ajout de flexibilité dans les deux scénarios. Les scénarios SSP2 et SSP4, ayant une part moins importante de solaire, n'ont pas d'excès de consommation de gallium, d'indium, ni de tellure. Malgré tout, un excès de germanium, sélénium et d'argent entraîne une réduction du solaire, et donc une diminution de la consommation de l'ensemble de ces métaux.

Métaux de l'éolien Les scénarios SSP1 et SSP4, associés au scénario APS, sont très consommateurs de terres rares : le dysprosium, le néodyme, et le terbium. Ces métaux étant consommés dans les aimants permanents des VE mais également des éoliennes, et la demande excédant la production, l'ajout de flexibilité réduit leur consommation pour le secteur énergétique. Le praséodyme, également utilisé dans les aimants permanents des éoliennes, mais n'ayant pas été considéré dans les données de l'AIE, n'est sujet à aucun excès de consommation. On constate également un excès de la demande en dysprosium, néodyme et terbium dans les scénarios SSP2 et SSP5. Cependant, la demande du reste de la transition étant moins importante, l'ajout de flexibilité permet de supprimer cet excès. Le potentiel de mise en place d'éoliennes utilisant des terres rares est donc étroitement lié à l'augmentation des VE.

5.3.4 Variation de puissance à apporter aux IAM selon les narratifs SSP

Energies solaires Les scénarios SSP1 et SSP4 qui modélisaient une part de solaire CSP voient l'ensemble de ces capacités de puissance être grandement diminuées (Fig. 5.4 et P.2). Les scénarios SSP2 et SSP4 ne modélisaient pas de solaire CSP dans leur hypothèse initiale, on n'observe donc pas de diminution de cette technologie (Fig. P.1 et P.2). Globalement, le solaire CSP est une technologie grandement pénalisée avec l'ajout de flexibilité, en raison de sa consommation d'argent en tant que réflecteur. Les technologies solaires à couches fines sont également réduites dans l'ensemble des scénarios SSP, utilisant différentes terres rares potentiellement limitées en approvisionnement. Dans l'ensemble des scénarios SSP, l'utilisation de la technologie solaire cristalline silicium avec conducteur en argent est réduite, et remplacée par la technologie à base de cuivre. Le scénario SSP1 voit une réduction de la moitié de son solaire malgré ce remplacement, mais dans les trois autres scénarios, l'ensemble du solaire cristallin silicium est remplacé par celui à base d'argent, avec même une légère augmentation du solaire dans les scénarios SSP4 et SSP5 (Fig. P.2 et P.3).

Energies éoliennes Concernant l'éolien, on observe globalement une augmentation de l'éolien sans aimant permanent, qui remplace les turbines avec aimant permanent, sur terre et en mer. Dans le scénario SSP1, la part de l'éolien reste marginale dans le nouveau mix. Cependant, dans les trois autres scénarios SSP, l'éolien a une plus grande variation, représentant entre un tiers et la moitié de la variation positive. L'éolien sans aimant permanent sur terre augmente grandement dans les scénarios SSP2 et SSP4 grâce à l'ajout de flexibilité sur les turbines onshore (Fig.P.1 et P.2). On observe également une augmentation importante de l'éolien sans aimant permanent offshore dans le scénario SSP5 (Fig. P.3). Malgré les contraintes de terres rares, une légère augmentation de l'éolien avec aimant permanent est réalisée en mer en 2050 dans les scénarios SSP2 et SSP5, qui n'étaient pas contraints en terres rares après 2040. Dans l'ensemble des scénarios, l'éolien à aimant permanent terrestre est diminué, utilisant des terres rares, étant moins efficace qu'en mer et pouvant facilement être remplacé par des technologies sans aimant permanent sur terre.

Autres sources d'énergie La part de la biomasse est augmentée dans l'ensemble des scénarios. L'augmentation est de 2000 GW cumulés en 2050 environ pour les scénarios SSP1, SSP4 et SSP5, et de 850 GW pour le scénario SSP2. Alors que le nucléaire était augmenté dans le scénario SSP1, dans l'ensemble des autres scénarios on observe une diminution du nucléaire, qui est consommateur d'argent. La diminution est particulièrement importante pour le SSP4, qui avait une grande part de nucléaire dans son scénario initial. Finalement, on observe une diminution des centrales hydrauliques dans les scénarios SSP2 et SSP5.

Les mix énergétiques après optimisation de chaque SSP sont disponibles en annexe Q.

CHAPITRE 6 DISCUSSION

Ce chapitre vise à revisiter les résultats présentés au Chapitre 5 et à discuter des limites de l'étude. Dans un premier temps, nous évaluerons l'atteinte des objectifs énoncés en introduction ainsi que la contribution de cette étude à la recherche. Ensuite, les hypothèses de modélisation seront analysées ainsi que leur influence sur les résultats. Enfin, des perspectives de recherche seront proposées.

6.1 Synthèse des résultats et atteinte des objectifs

Cette partie a pour but de revenir sur les résultats présentés dans le chapitre 5 et d'évaluer l'atteinte des objectifs énoncés dans la section 2.3.

6.1.1 Objectif 1 : Évaluer la faisabilité des projections énergétiques IAM et identifier les métaux contraints en disponibilité pour différents scénarios sociopolitiques et climatiques

Apport de cette étude Un code en accès libre a été développé pour quantifier la demande en métal liée aux différents scénarios à l'étude. Ce code, conçu en libre accès et accompagné de données transparentes permet à tout utilisateur de réutiliser le travail réalisé. Cet outil permet d'identifier rapidement et facilement la faisabilité d'un mix de capacité de puissance et les métaux dont l'accessibilité pourrait poser problème. Bien que ce code ait été créé à destination des mix IAM, il pourra également être utilisé pour évaluer la faisabilité d'autres mix énergétiques. De plus, les données étant stockées dans des fichiers externes, leur mise à jour est simple et rapide à effectuer. Le code pourra être adapté pour y intégrer des données d'intensités métalliques propres aux technologies d'une industrie par exemple, ou encore pour évaluer la faisabilité d'un mix à partir de projections de futures politiques minières précises.

Métaux contraints par les ressources Dans le cadre des différentes modélisations SSP réalisées pour le scénario RCP 2.6, la majorité des métaux ne fait pas face à des contraintes en termes de ressources. Cependant, la demande en **sélénium**, **argent** et **tellure** dans les scénarios IAM initiaux excède les ressources actuellement identifiées.

Métaux contraints par la production L'incapacité de la production métallique à répondre aux demandes en métal projetées dans différents futurs probables constitue la prin-

cipale contrainte d’approvisionnement métallique. L’importance des pertes minières pour certains métaux lors des différentes étapes de traitement des métaux ainsi que la difficulté à augmenter rapidement la production minière sont des obstacles importants à la transition énergétique. Le **cuivre**, largement utilisé dans les réseaux électriques, ainsi que le **cobalt**, le **nickel** et le **vanadium**, essentiels pour le stockage de l’énergie, pourraient connaître des insuffisances de production d’ici 2050. Le **dysprosium**, le **néodyme** et le **terbium**, indispensables à la fabrication des aimants permanents utilisés dans les véhicules électriques ainsi que dans les turbines éoliennes, sont également concernés par ces contraintes. En ce qui concerne le secteur solaire, les métaux tels que le **gallium**, le **germanium**, l’**indium**, le **sélénium** et le **tellure**, nécessaires à la fabrication des panneaux solaires à couche mince, sont soumis à des limitations de production dans deux scénarios SSP sur quatre, pour le RCP2.6. L’**argent**, qui intervient dans les panneaux solaires cristallins ainsi que dans les technologies CSP, présente des contraintes d’approvisionnement dans tous les scénarios.

Synthèse des apprentissages sur les bonnes pratiques de quantification de la demande métallique La demande en métaux provenant des autres secteurs de la transition ainsi que celle du reste de l’économie s’est révélée significative et constitue une part souvent majoritaire de la demande totale. Cela souligne la nécessité d’inclure des estimations de la demande de tous les secteurs économiques lors de l’évaluation de l’accessibilité aux métaux. Par ailleurs, de nombreux défis liés à l’accès aux métaux étaient associés au potentiel de production métallique. Il est donc crucial d’intégrer cette variable dans les analyses futures. Selon les hypothèses considérées dans l’étude, la quasi-totalité des scénarios prospectifs modélisés par les IAM dans le cadre du GIEC était sujette à des risques d’accès aux métaux. Il est donc essentiel de revoir les mix énergétiques projetés et d’intégrer les contraintes en métaux dans les futurs exercices prospectifs liés au futur de l’énergie.

6.1.2 Objectif 2 : Analyser le potentiel de la flexibilité des mix technologiques pour diminuer la demande de métaux en deçà des contraintes de disponibilité

Apport de cette étude Le code développé représente, à notre connaissance, le premier outil capable de calculer les ajustements technologiques à appliquer à un mix énergétique pour respecter les contraintes liées aux métaux. Ce code étant en accès libre, il est possible d’ajouter facilement de nouvelles contraintes au modèle d’optimisation spécifique à d’autres scénarios. Il est également facile d’intégrer de nouvelles technologies émergentes. Cet outil d’aide à la décision est nécessaire pour fournir des informations aux décideurs politiques et

industriels sur les technologies à privilégier pour assurer une transition énergétique conforme aux limites d'accessibilité des métaux.

Analyse de l'impact de l'ajout de flexibilité sur la demande en métal L'introduction de flexibilité dans le mix technologique a conduit à une **réduction significative de la demande en métaux** potentiellement problématiques **dans le secteur énergétique**. La modification du choix d'investissement technologique a permis d'éviter le dépassement des ressources en tellure dans l'ensemble des scénarios SSP étudiés, et en sélénium dans tous les scénarios SSP sauf le SSP5. L'ajout de flexibilité a également éliminé les contraintes d'approvisionnement annuel en dysprosium pour les SSP2 et 4, en tellure et en indium pour les SSP1 et 4, en gallium pour les SSP1 et 5, en terbium pour les SSP1 et 2, en molybdène dans le SSP4, et en néodyme dans le SSP5.

Synthèse des apprentissages sur l'ajout de flexibilité au mix technologique L'ensemble des métaux utilisés par le secteur énergétique dont l'approvisionnement n'était pas suffisant pour répondre à la demande ont vu leur demande diminuer, réduisant la pression sur la production minière. Cependant, la demande des autres secteurs de la transition et celle du reste de l'économie peuvent, à elles seules, constituer une contrainte par rapport à l'approvisionnement. Ainsi, **l'ajout de flexibilité** au mix technologique est **essentiel pour réduire la demande** en métal, mais **ne suffit pas** à lui seul à éliminer toutes les limitations en matière de métaux, soulignant la nécessité d'explorer d'autres pistes de solutions.

6.1.3 Objectif 3 : Identifier les technologies à privilégier afin de réaliser la transition énergétique en réduisant les risques liés aux contraintes de métaux

Les ajustements à réaliser sur les technologies utilisées dans les projections initiales de mix énergétiques par les IAM dépendent grandement du modèle et du scénario considéré. Intégrer les contraintes en métal dès la création des mix permettrait de proposer directement des projections énergétiques réalisables en termes de contraintes en métal. Malgré la variabilité des résultats selon le scénario choisi, de grandes tendances de technologies à privilégier et à écarter peuvent être mises en valeur dans les résultats.

Recommandations sur les investissements technologiques Les technologies **solaires à couches minces** et **CSP** utilisent des métaux dont l'approvisionnement pourrait être limité. **Réduire l'investissement** pour ces technologies permettrait d'alléger considérablement les contraintes liées à la production minière et aux ressources métalliques. Dans la

technologie solaire cristalline au silicium, le **remplacement des conducteurs en argent par du cuivre** devrait être encouragé. Pour les technologies éoliennes, il serait préférable de **réduire l’usage des aimants permanents**. Cette technologie étant plus efficace offshore, elle devrait être utilisée prioritairement en mer. Les éoliennes à boîtes de vitesses devraient être privilégiées sur terre, avec un potentiel d’expansion pour cette technologie. L’intégration de **davantage de capacités de biomasse**, sous réserve de contrôler et minimiser certains transferts d’impacts environnementaux ou socio-économiques liés à l’utilisation des terres, pourrait également contribuer à remplacer les sources d’énergie fortement dépendantes des métaux critiques. Par ailleurs, le recours aux technologies nucléaires représente une potentielle solution pour réduire la pression sur le rythme de production des métaux, sous réserve de limiter l’usage de l’argent dans cette technologie.

6.2 Limites de l’étude et pistes de solution

Pour élaborer notre modèle, différentes hypothèses ont dû être formulées. Les ajustements nécessaires dans le mix IAM initial sont conséquents, rendant indispensable une analyse de l’impact de ces hypothèses sur les résultats ainsi qu’une vérification de leur cohérence.

6.2.1 Incertitude liée aux méthodes d’estimation de la demande en métal

Exclusion de la gestion de stock des installations énergétiques Les projections de puissance des IAM sont cumulatives dans le temps, ce qui signifie que le détail concernant le moment où il faut remplacer les systèmes énergétiques obsolètes n’est pas pris en compte. En conséquence, les métaux nécessaires à l’entretien et au remplacement des infrastructures énergétiques ne sont pas considérés dans cette étude, sous-estimant ainsi la demande du secteur énergétique. Cependant, la part des technologies renouvelables installées avant 2020 reste faible [23], à l’exception du nucléaire et de l’hydroélectricité, dont les durées de vie sont respectivement de 40 et 100 ans [55]. La période d’analyse de l’étude étant limitée à 30 ans, et la durée de vie la plus courte des systèmes d’énergies renouvelables - en-dehors de certaines sources de biomasse - étant celle du solaire, estimée à environ 25 ans [8, 36, 54, 55, 81], l’impact de l’exclusion du renouvellement des infrastructures sur la demande en métal est donc limité. Par ailleurs, intégrer les durées de vie des technologies nécessiterait de recourir à une optimisation non linéaire, complexifiant le modèle et réduisant son efficacité. Néanmoins, inclure le renouvellement des infrastructures dans des études futures à plus long terme permettrait de mieux considérer la durée de vie des technologies dans leur potentiel d’installation.

Estimation de l’OSD La demande en métaux des autres secteurs de l’économie a été estimée à partir d’une hypothèse simplifiée de proportionnalité au PIB. Les dynamiques spécifiques de consommation en métaux propres à chaque secteur ainsi que les dynamiques de marché liées à l’évolution des prix n’ont donc pas été prises en compte. La littérature montre que la demande en métal tend à se découpler de la croissance économique après l’atteinte d’un certain seuil [82]. Par conséquent, l’estimation de la demande future en métaux pour lesquels aucune donnée spécifique n’était disponible dans la littérature est incertaine. Les résultats qui suggèrent que la production de certains métaux ne parviendrait pas à répondre à la demande des autres secteurs, sans que la demande liée à la transition énergétique joue un rôle, semblent ainsi peu probables, car jusqu’à présent, les dynamiques de marché ont réussi à satisfaire la demande habituelle de l’économie. Toutefois, cette incertitude a un impact limité sur nos résultats. En effet, pour la plupart des métaux identifiés comme critiques, la part de l’OSD dans la demande métallique est minoritaire, car ces métaux sont principalement utilisés pour la transition énergétique. L’ajout de la variable α à la contrainte de production a permis d’introduire une souplesse supplémentaire dans le modèle d’optimisation, renforçant ainsi la fiabilité des recommandations en matière de choix ou d’évitement de certaines technologies énergétiques. De plus, les données utilisées dans le modèle étant stockées dans des fichiers Excel externes, la demande des autres secteurs de l’économie pourra être mise à jour facilement si des estimations plus précises sont publiées dans la littérature à l’avenir.

Combinaison de scénarios variés L’étude, visant à inclure la demande en métaux de tous les secteurs de l’économie, est construite à partir de nombreuses données de la littérature. Les données de projection de puissance par les IAM sont combinées à des scénarios de projection de besoin en stockage de l’AIE, à des parts de marché actuelles de sous technologies de la Commission européenne, ainsi qu’à des estimations de la demande en métaux du reste de l’économie provenant d’études multiples. La combinaison de différents scénarios apporte de l’incertitude quant à leur définition précise. Par exemple, les métaux destinés au stockage et au réseau sont directement liés au type de source d’énergie mis en place, mais la modification du mix énergétique n’influence pas la demande en stockage dans notre modèle. Malgré l’impossibilité d’une correspondance parfaite entre scénarios, le mappage précis réalisé entre les scénarios de chaque étude permet de limiter l’impact de ces estimations sur les résultats. De plus, il nous semble essentiel de construire notre recherche sur les études les plus robustes précédemment réalisées. Les résultats obtenus sont fiables, bien qu’ils puissent s’éloigner des hypothèses intrinsèques de chaque scénario SSP-RCP. Néanmoins, réaliser des projections de besoin en véhicules électriques à partir des données des IAM, ainsi qu’une correspondance du besoin en stockage énergétique par rapport aux types de technologies installées, serait une

manière d'estimer plus précisément la demande en métaux du reste de la transition propre à chaque scénario SSP-RCP. Élargir notre scope d'étude aux autres secteurs de la transition serait également une manière d'intégrer d'autres métaux dont l'approvisionnement pourrait manquer, comme le lithium par exemple [83, 84].

6.2.2 Incertitude liée aux méthodes d'estimation de l'offre en métal

Données de réserves et ressources métalliques Les réserves et les ressources en métal estimées aujourd'hui présentent un important degré d'incertitude, et ont tendance à changer dans le temps. Avec la mobilisation autour de la transition énergétique, la demande en métal pourrait connaître une augmentation significative, entraînant une hausse des prix et une intensification de l'exploration minière. De meilleures technologies d'extraction et des prix de marché plus élevés augmenteraient la taille des réserves [28]. Pour limiter l'impact de ces incertitudes, notre étude s'appuie sur les données relatives aux ressources, afin de tenir compte du potentiel de variation des réserves dans le temps. Cependant, il est important de noter que l'exploitation des ressources est à ce jour économiquement moins faisable et que les données sont moins fiables que pour les réserves [28]. Il est essentiel de poursuivre la collecte et la mise à jour régulières des données concernant les réserves et les ressources. À cette fin, les données utilisées dans notre étude sont conservées dans un fichier distinct, simplifiant leur actualisation.

Période de temps considérée Par ailleurs, notre étude se concentre sur une période à moyen terme. Toutefois, l'épuisement total des réserves ou des ressources d'ici 2050 poserait un problème majeur pour les décennies suivantes. Nos sources de métaux reposeraient sur les stocks dans la techno-sphère et non plus sur la disponibilité dans la croûte terrestre. Il est donc nécessaire d'améliorer nos méthodes de recyclage, et d'éviter au maximum la dispersion des métaux dans les technologies, afin de pouvoir les réutiliser dans le futur. Il est essentiel de prendre en compte la temporalité de cette étude lors de l'interprétation des résultats. À cet égard, il serait pertinent de coupler cette analyse avec d'autres études portant sur la demande cumulée en métal jusqu'en 2100 [36]. Il serait également intéressant d'étendre notre étude sur 100 ans, en intégrant la fin de vie des technologies et le recyclage des métaux.

Estimation de la production métallique L'estimation du potentiel de production en métal est réalisée à partir de données historiques de production. Cependant, pour certains métaux, on observe une importante variabilité dans les données de production d'une année sur l'autre [37, 38]. De plus, cette méthode ne prend pas en compte les dynamiques de marché liées

à l'augmentation de la demande et les variations de coût, qui pourraient grandement modifier le potentiel de production [85]. La dynamique de produit hôte et de co-produit, ainsi que la production de métaux secondaire, issue du recyclage, n'ont pas non plus été incluses [86–88]. Le paramètre β , utilisé pour estimer la production future, a été choisi par expertise afin d'obtenir des projections de production future réalistes. Ces données sont utilisées à titre comparatif, bien qu'elles puissent varier dans le temps. Cependant, des projections réalisées par rapport aux projets miniers existants et annoncés, comme il a été utilisé pour le cuivre, le cobalt et le nickel, à partir des estimations de l'AIE, seraient une méthode d'estimation plus précise [63]. Mais une approche généralisée à tous les métaux requerrait un meilleur accès aux données minières, aujourd'hui très opaques.

Hypothèse de libre-échange des métaux Les données de production, de réserves et de ressources n'étant pas régionalisées, l'étude repose sur l'hypothèse d'un libre-échange de ces ressources à l'échelle mondiale. La concentration de la production dans certains pays, qui pourrait accroître le risque d'approvisionnement géopolitique, n'a pas été prise en compte [89]. Bien que la localisation géographique spécifique de la production puisse ajouter un risque, les mécanismes du marché ont été jusqu'à aujourd'hui fortement mondialisés, justifiant notre hypothèse de modélisation.

6.2.3 Exclusion de facteurs clés dans la mise en place d'un nouveau mix énergétique et le déploiement de la production minière

Facteurs influençant la mise en place des sources d'énergie Notre étude se concentre sur l'évaluation du manque de disponibilité en métal. Pourtant, le remplacement d'une source d'énergie par une autre est influencé par de nombreux autres facteurs. D'une part, la disponibilité des ressources naturelles (vent, rayonnement solaire, cours d'eau, etc.) nécessaires aux énergies renouvelables limite leur potentiel d'implantation et varie selon les régions. De plus, l'installation de nouvelles capacités énergétiques est limitée par divers facteurs, tels que la disponibilité des terres pour la biomasse [90, 91], les nuisances visuelles et sonores potentielles associées à l'éolien, ou encore l'acceptabilité sociale, le coût de démantèlement, et la gestion des déchets liés au nucléaire [92, 93]. Enfin, le coût de chaque source d'énergie influence également son déploiement régional et est susceptible de fluctuer dans le temps. Ces caractéristiques, nombreuses et spécifiques à chaque type d'énergie, compliquent une intégration exhaustive de tous les paramètres dans les analyses.

Limitation de l'impact de l'exclusion de ces facteurs La non-prise en compte de ces facteurs dans l'étude est limitée grâce à l'utilisation des données des IAM. Ces modèles intègrent des données régionales sur l'accès aux ressources biophysiques, telles que la vitesse du vent, le rayonnement solaire, et la disponibilité des terres. Les scénarios SSP incluent dans leurs narratifs diverses variables socio-économiques, telles que l'acceptabilité du nucléaire par la population ou le potentiel de transition vers un mix énergétique plus renouvelable. Des contraintes sur la croissance économique, ainsi que le coût de chaque source d'énergie, sont également prises en compte à l'échelle régionale. De plus, il est supposé qu'avec l'augmentation de la pression sur la demande de métaux, le prix des métaux critiques va augmenter. Les technologies requérant moins de ces métaux seront donc moins chères et priorisées par les dynamiques de marché naturelles. Ainsi, les modélisations initiales des IAM sont considérées comme fiables, intégrant des variables que notre étude ne peut pas inclure. C'est pourquoi notre approche méthodologique consiste à apporter le moins de modifications possibles au mix énergétique généré par l'IAM. Les seules variations effectuées visent à respecter les contraintes liées à la disponibilité des métaux. De plus, l'ajout de contraintes concernant la biomasse et l'hydroélectricité permet de limiter leur déploiement dans les limites de disponibilité des ressources biophysiques.

Impact environnemental et social des projets miniers Bien que la transition énergétique soit essentielle pour limiter les changements climatiques, l'industrie minière est connue pour avoir de nombreux impacts sociaux [94] et environnementaux [95], qui ne sont pas pris en compte dans cette étude. Ces impacts sont explorés dans d'autres recherches du projet FASC finançant l'étude présentée dans ce manuscrit, qui seront publiées prochainement respectivement par Annie Lachance et Marin Pellan. Néanmoins, bien que l'augmentation de la production minière destinée aux énergies renouvelables puisse augmenter avec la transition énergétique, celle-ci entraînera également une réduction de l'utilisation de pétrole et de charbon, qui nécessitent bien plus d'exploitation minière que les énergies bas carbone [96–98].

6.3 Pistes de recherches futures

6.3.1 Considérer d'autres mix énergétiques

Les résultats des IAM ont été utilisés comme scénarios initiaux de projection de puissance énergétique, avec comme première hypothèse la fiabilité de ces mix. Cependant, les IAM sont peu transparents dans les données qu'ils utilisent, et font l'hypothèse d'une croissance économique et d'une optimisation basée sur les coûts souvent critiqués [99]. Le code réalisé étant en accès libre et reposant sur des données transparentes et non propriétaires, il peut être

adapté à d'autres configurations énergétiques que celles des mix IAM. Il pourrait être adapté, par exemple, à des données nationales pour des études futures, à condition de régionaliser les contraintes liées aux ressources et à la production minière.

Réduire notre dépendance à la croissance économique, particulièrement dans les pays à hauts revenus, en adoptant des modes de vie énergétiquement et matériellement plus sobres, est souvent présenté comme une solution potentielle à l'épuisement des ressources [100]. Réaliser des modélisations à partir de scénarios énergétiques basés sur la décroissance réduirait la demande en énergie, ainsi que l'estimation de la demande en métaux du reste de l'économie. Il serait intéressant d'effectuer de nouvelles modélisations, en considérant un PIB fixe ou qui réduirait dans le temps afin de mimer une décroissance et une réduction de la consommation matérielle. Il serait également possible de modifier la contrainte de demande en énergie, en la fixant à 80 % de la consommation énergétique du mix IAM, afin d'observer l'impact qu'une réduction de la consommation énergétique aurait sur la consommation en métaux. Comparer les résultats obtenus avec ceux de cette étude serait une manière de mettre en lumière l'impact de la décroissance sur les résultats, et de proposer des alternatives économiques à ces scénarios.

6.3.2 Intégrer les dynamiques de circularité des métaux

La circularité contribue à réduire considérablement la pression sur les ressources métalliques. Dans cette étude, nous avons pris en compte les dynamiques de substitution des métaux au sein des technologies, ainsi que la réduction de l'intensité métallique liée aux progrès technologiques. Cependant, une meilleure intégration du recyclage et une augmentation de la durée de vie des technologies pourraient offrir une plus grande flexibilité au modèle.

Notre étude couvrant une période à moyen terme, les stocks de métaux spécifiques à la transition énergétique ne s'accumulent pas significativement sur la période d'étude, et peu de systèmes énergétiques atteignent leur fin de vie avant 2050, réduisant les flux de production secondaires de ces métaux. Néanmoins, la production secondaire de métaux représente une source d'approvisionnement à considérer. Bien que le recyclage puisse entraîner une dégradation de la qualité des métaux, compliquant leur réutilisation dans des technologies spécifiques comme les systèmes énergétiques, ce flux pourrait contribuer à diminuer la demande de production primaire dans d'autres secteurs de l'économie. Par ailleurs, prolonger la durée de vie de certaines technologies pourrait devenir un facteur essentiel à considérer dans des études à plus long terme, ce qui influencerait également les priorités d'investissement.

6.3.3 Ajouter de la flexibilité aux autres secteurs de la transition

Les estimations de la demande des autres secteurs de la transition sont exogènes à notre modèle et sont donc fixes. Les résultats ont montré l'impact important de cette demande sur la pression en approvisionnement de certains métaux. Pourtant, les intensités métalliques des différentes technologies de batterie pouvant être utilisées dans les véhicules électriques varient grandement [35,84]. Poursuivre cette étude en ajoutant de la flexibilité sur le choix de batterie des véhicules électriques et pour le stockage des énergies intermittentes permettrait de potentiellement réduire la demande de certains métaux restreints en production minière et d'aider à la décision sur les technologies de batterie à prioriser dans le futur.

CHAPITRE 7 CONCLUSION

7.1 Synthèse des travaux

Métaux contraints en disponibilité L'étude met en évidence l'infaisabilité des projections énergétiques des IAM. Les scénarios limitant l'augmentation de température à 2°C requièrent davantage de ressources que celles existantes pour le sélénium, l'argent et le tellure. Si la production minière suit les tendances historiques, elle sera insuffisante pour les métaux requis par le réseau électrique et le stockage (cuivre, cobalt, nickel, vanadium). Une pénurie est également anticipée pour les métaux essentiels aux aimants permanents dans les éoliennes et véhicules électriques (dysprosium, néodyme, terbium). Enfin, les métaux nécessaires aux technologies solaires (argent, gallium, germanium, indium, sélénium) pourraient également être à risque.

Flexibilité des mix technologiques Il est essentiel d'intégrer la demande en métaux dans les projections de mix énergétiques, car les choix technologiques influencent fortement la demande métallique de ce secteur. Introduire de la flexibilité dans les mix technologiques réduit significativement la demande en métaux du secteur de l'énergie, mais cela reste insuffisant pour éliminer tous les risques d'approvisionnement, compte tenu de la forte demande des autres secteurs de la transition et du reste de l'économie.

Technologies à privilégier Les recommandations de cette étude pour limiter la demande en métaux critiques du secteur énergétique incluent de réduire les investissements dans les technologies solaires à couches fines et CSP. Le remplacement des conducteurs en argent des technologies solaires à base de silicium cristallin par des conducteurs en cuivre est encouragé. L'utilisation des aimants permanents dans les technologies éoliennes devrait être limitée, et devrait être privilégié en mer. Augmenter l'installation d'éoliennes à boîte de vitesses permettrait de remplacer les technologies à aimant permanent sur terre. Enfin, l'intégration accrue de la biomasse, sous réserve de contrôler les transferts d'impact sur l'utilisation des terres, pourrait aider à substituer les sources d'énergie dépendantes des métaux critiques.

7.2 Recommandations

Intégration des métaux dans les modélisations énergétiques futures Le travail réalisé souligne l'importance d'intégrer la demande en métaux dans les projections de transition

énergétique pour en garantir la faisabilité en matière d’approvisionnement. En démontrant que les projections énergétiques des IAM, utilisées par le GIEC, sont irréalistes en termes d’approvisionnement et que le choix des sources d’énergie influe fortement sur la demande finale en métal, nous espérons orienter les recherches futures vers une meilleure prise en compte des métaux dans les modélisations énergétiques. De nombreuses politiques publiques se basant sur ces rapports, il est essentiel de les guider vers des projections soutenables en termes de ressources métalliques.

Nécessité d’augmenter la production des métaux de la transition L’étude a pour but d’orienter les décideurs politiques et les industries minières vers les métaux potentiellement en pénurie pour planifier leurs activités futures. La production minière y est estimée à partir de données historiques et d’un potentiel d’augmentation annuelle β , mais ce facteur peut varier, ou être remplacé par des projections de production futures, pour évaluer la capacité des politiques minières à répondre à la demande en métal. Ainsi, cette étude sert d’aide à la décision pour quantifier les besoins de production et les investissements miniers nécessaires.

Investissements énergétiques : recommandations aux industriels Cette recherche vise à identifier les sources d’énergie prioritaires pour répondre à la demande énergétique future tout en tenant compte des limites de disponibilité en métal. Nous espérons encourager les industries de l’éolien et du solaire à concentrer leurs investissements et recherches sur des technologies peu consommatrices en métaux critiques, en délaissant celles qui en sont fortement dépendantes. Ces choix leur permettraient de limiter l’impact d’une potentielle hausse des prix des métaux critiques liée à des contraintes d’approvisionnement.

Investissements énergétiques : recommandations aux décideurs politiques Le Canada a réalisé différentes hypothèses de politiques climatiques liées aux projections de l’AIE. Actuellement, des crédits d’impôt sont réalisés à l’investissement dans des technologies propres [101]. Utiliser nos résultats afin d’augmenter les crédits d’impôt des technologies consommant peu de métaux critiques permettrait d’encourager leur mise en place. Continuer d’investir dans la recherche et des projets de développement des technologies peu consommatrices de métaux est également essentiel et permettrait d’assurer une transition énergétique dans les limites métalliques. Focaliser les investissements en énergie propre vers les technologies recommandées permettrait également de prévenir la hausse des prix de l’énergie liée à la forte demande en métaux critiques.

Choix politiques futurs Adopter de nouveaux mix énergétiques basés sur des technologies bas carbone afin de réduire les impacts sur les changements climatiques est essentiel, à condition que ces nouvelles énergies se substituent aux installations fossiles aujourd’hui mises en place [102]. Ces nouvelles énergies ne doivent pas seulement s’ajouter pour permettre de répondre à des besoins énergétiques toujours croissants. Lors de la comparaison des résultats de notre étude à différents narratifs SSP, l’influence de la croissance économique sur la demande métallique du reste de l’économie a été montrée comme conséquente. Bien que l’épuisement des ressources en métal puisse être limité d’ici 2050, adopter un mode de consommation en constante croissance, basé sur des ressources limitées, est non soutenable sur le long terme [100]. Les chercheurs en économie écologique proposent la décroissance comme alternative aux modèles actuels. Cette stratégie vise à cesser de poursuivre la croissance du PIB dans les économies riches et à réduire les productions nuisibles et non essentielles, permettant de limiter l’utilisation d’énergie et de ressources naturelles [103]. En recentrant l’économie sur la satisfaction des besoins humains et le bien-être, la décroissance pourrait accélérer la décarbonation et enrayer la dégradation écologique, tout en libérant des ressources pour les pays à faible et moyen revenu, où la croissance reste nécessaire [100]. Pour progresser vers une société plus juste et durable, la transition technologique doit être accompagnée de politiques économiques, écologiques et sociales à destination des plus défavorisés, ainsi qu’une sensibilisation de la population à une consommation sobre. Le partage d’une vision alternative de nos modes de vie, axée sur le respect et l’appréciation de la nature et des autres, nous permettra de co-créeer un avenir plus vertueux.

RÉFÉRENCES

- [1] H. Ritchie, “Sector by sector : where do global greenhouse gas emissions come from ?” *Our World in Data*, 2020, <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>.
- [2] I. I. R. E. Agency), “Global renewables outlook : Energy transformation 2050,” IRENA, Rapport gouvernemental, avril 2020, 292 p.
- [3] U. N. F. C. on Climate Change (UNFCCC), “Paris agreement,” United Nations, Rapport technique, 2016, accessed : 2016-12-15. [En ligne]. Disponible : http://unfccc.int/paris_agreement/items/9444.php
- [4] Q. G. C. M. C. L. U. T. M. J. K. L. O. N. K. W. G. Achala C. Abeysinghe (Sri Lanka), Ian Burton (Canada), “Climate-Resilient Pathways : Adaptation, Mitigation, and Sustainable Development,” dans *Climate Change 2014 Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach et M. D. Mastrandrea, édit. Cambridge : Cambridge University Press, 2014, p. 1101–1131. [En ligne]. Disponible : https://www.cambridge.org/core/product/identifier/CBO9781107415379A041/type/book_part
- [5] International Energy Agency, “Mineral requirements for clean energy transitions – The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions – Analysis,” 2023, international Energy Agency Report. [En ligne]. Disponible : <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions/mineral-requirements-for-clean-energy-transitions>
- [6] European Commission. Joint Research Centre., *Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system*. LU : Publications Office, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://data.europa.eu/doi/10.2760/160859>
- [7] R. L. Moss, E. Tzimas, H. Kara, P. Willis et J. Kooroshy, “The potential risks from metals bottlenecks to the deployment of Strategic Energy Technologies,” *Energy Policy*, vol. 55, p. 556–564, avr. 2013. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512011068>
- [8] M. F. Ashby, “Materials for low-carbon power,” dans *Materials and the Environment*. Elsevier, 2013, p. 349–413. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123859716000129>
- [9] Azote, “Cmip - coupled model intercomparison project,” Coupled Model Intercomparison Project, May 2023, récupéré de <https://wcrp-cmip.org/>.

- [10] IPCC. (2024) About — ipcc. Accessed : 2024-10-14. [En ligne]. Disponible : <https://www.ipcc.ch/about/>
- [11] J.-Y. Lee, J. Marotzke, G. Bala, L. Cao, S. Corti, J. Dunne, F. Engelbrecht, E. Fischer, J. Fyfe, C. Jones, A. Maycock, J. Mutemi, O. Ndiaye, S. Panickal et T. Zhou, “Future global climate : Scenario-based projections and near-term information,” dans *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. Matthews, T. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu et B. Zhou, édit. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2021, p. 553–672.
- [12] B. C. O’Neill, E. Kriegler, K. L. Ebi, E. Kemp-Benedict, K. Riahi, D. S. Rothman, B. J. Van Ruijven, D. P. Van Vuuren, J. Birkmann, K. Kok, M. Levy et W. Solecki, “The roads ahead : Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century,” *Global Environmental Change*, vol. 42, p. 169–180, janv. 2017. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959378015000060>
- [13] M. Leimbach, E. Kriegler, N. Roming et J. Schwanitz, “Future growth patterns of world regions – A GDP scenario approach,” *Global Environmental Change*, vol. 42, p. 215–225, janv. 2017. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378015000242>
- [14] L. Jiang et B. C. O’Neill, “Global urbanization projections for the Shared Socioeconomic Pathways,” *Global Environmental Change*, vol. 42, p. 193–199, janv. 2017. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959378015000394>
- [15] N. Bauer, K. Calvin, J. Emmerling, O. Fricko, S. Fujimori, J. Hilaire, J. Eom, V. Krey, E. Kriegler, I. Mouratiadou, H. Sytze De Boer, M. Van Den Berg, S. Carrara, V. Daioglou, L. Drouet, J. E. Edmonds, D. Gernaat, P. Havlik, N. Johnson, D. Klein, P. Kyle, G. Marangoni, T. Masui, R. C. Pietzcker, M. Strubegger, M. Wise, K. Riahi et D. P. Van Vuuren, “Shared Socio-Economic Pathways of the Energy Sector – Quantifying the Narratives,” *Global Environmental Change*, vol. 42, p. 316–330, janv. 2017. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959378016301224>
- [16] K. Riahi, D. P. van Vuuren, E. Kriegler, J. Edmonds, B. C. O’Neill, S. Fujimori, N. Bauer, K. Calvin, R. Dellink, O. Fricko, W. Lutz, A. Popp, J. C. Cuaresma, S. Kc, M. Leimbach, L. Jiang, T. Kram, S. Rao, J. Emmerling, K. Ebi, T. Hasegawa, P. Havlik, F. Humpenöder, L. A. Da Silva, S. Smith, E. Stehfest,

- V. Bosetti, J. Eom, D. Gernaat, T. Masui, J. Rogelj, J. Strefler, L. Drouet, V. Krey, G. Luderer, M. Harmsen, K. Takahashi, L. Baumstark, J. C. Doelman, M. Kainuma, Z. Klimont, G. Marangoni, H. Lotze-Campen, M. Obersteiner, A. Tabeau et M. Tavoni, “The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications : An overview,” *Global Environmental Change*, vol. 42, p. 153–168, janv. 2017. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378016300681>
- [17] R. Moss, M. Babiker, S. Brinkman, E. Calvo, T. Carter, J. Edmonds, I. Elgizouli, S. Emori, L. Erda, K. Hibbard, R. Jones, M. Kainuma, J. Kelleher, J. F. Lamarque, M. Manning, B. Matthews, J. Meehl, L. Meyer, J. Mitchell, N. Nakicenovic, B. O’Neill, R. Pichs, K. Riahi, S. Rose, P. Runci, R. Stouffer, D. van Vuuren, J. Weyant, T. Wilbanks, J. P. van Ypersele et M. Zurek, “Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies,” dans *Intergovernmental Panel on Climate Change Report*. Geneva : Intergovernmental Panel on Climate Change, 2008, p. 1–132.
- [18] “Premise scenario explorer.” [En ligne]. Disponible : <https://premisedash-6f5a0259c487.herokuapp.com/>
- [19] R. P. Jr, M. G. Burgess et J. Ritchie, “Plausible 2005–2050 emissions scenarios project between 2 °C and 3 °C of warming by 2100,” *Environmental Research Letters*, vol. 17, n°. 2, p. 024027, févr. 2022, publisher : IOP Publishing. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ac4ebf>
- [20] L. van Beek, M. Hajer, P. Pelzer, D. van Vuuren et C. Cassen, “Anticipating futures through models : the rise of integrated assessment modelling in the climate science-policy interface since 1970,” *Global Environmental Change*, vol. 65, p. 102191, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378020307743>
- [21] t. harrisson, “Q&A : How ‘integrated assessment models’ are used to study climate change,” oct. 2018. [En ligne]. Disponible : <https://www.carbonbrief.org/qa-how-integrated-assessment-models-are-used-to-study-climate-change/>
- [22] G. P. Peters, A. Al Khourdajie, I. Sognnaes *et al.*, “Ar6 scenarios database : an assessment of current practices and future recommendations,” *npj Clim. Action*, vol. 2, p. 31, 2023. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1038/s44168-023-00050-9>
- [23] K. Riahi, D. P. van Vuuren, E. Kriegler, J. Edmonds, B. C. O’Neill, S. Fujimori, N. Bauer, K. Calvin, R. Dellink, O. Fricko, W. Lutz, A. Popp, J. C. Cuaresma, S. KC, M. Leimbach, L. Jiang, T. Kram, S. Rao, J. Emmerling, K. Ebi, T. Hasegawa, P. Havlik, F. HumpenÄ¶nder, L. A. D. Silva, S. Smith, E. Stehfest, V. Bosetti, J. Eom, D. Ger-

- naat, T. Masui, J. Rogelj, J. Streffer, L. Drouet, V. Krey, G. Luderer, M. Harmsen, K. Takahashi, L. Baumstark, J. C. Doelman, M. Kainuma, Z. Klimont, G. Marangoni, H. Lotze-Campen, M. Obersteiner, A. Tabeau et M. Tavoni, “The shared socio-economic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications : An overview,” *Global Environmental Change*, vol. 42, p. 153–168, jan 2017.
- [24] H. Bouillon-Duparc, “Strategic and critical rare metals : What exactly are they?” nov 2019, pollutec Learn & Connect | English. [En ligne]. Disponible : <https://learnandconnect.pollutec.com/en/strategic-and-critical-rare-metals/>
- [25] Contributeur, “Les terres rares, un enjeu de dépendance pour la transition écologique,” sept. 2024, la Fabrique Écologique. [En ligne]. Disponible : <https://www.lafabriqueecologique.fr/les-terres-rares-un-enjeu-de-dependance-pour-la-transition-ecologique/>
- [26] Service Canada. (2023, sept.) Stratégie canadienne sur les minéraux critiques. Consulté le : 25 octobre 2024. [En ligne]. Disponible : <https://www.canada.ca/fr/campagne/mineraux-critiques-au-canada/la-strategie-canadienne-sur-les-mineraux-critiques.html>
- [27] Admin, “Qu’entend-on par « ressources minérales » et « réserves minérales » ? y a-t-il une différence ?” novembre 2022. [En ligne]. Disponible : <https://amq-inc.com/quentend-on-par-ressources-minerales-et-reserves-minerales-y-a-t-il-une-difference/>
- [28] T. Henckens, “Scarce mineral resources : Extraction, consumption and limits of sustainability,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 169, p. 105511, juin 2021. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092134492100118X>
- [29] T. Watari, K. Nansai et K. Nakajima, “Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100 : A critical review,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 164, p. 105107, janv. 2021. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920304249>
- [30] K. Schulze, F. Kullmann, J. M. Weinand et D. Stolten, “Overcoming the challenges of assessing the global raw material demand of future energy systems,” *Joule*, p. S2542435124002447, juin 2024. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2542435124002447>
- [31] P. Lopion, P. Markewitz, M. Robinius et D. Stolten, “A review of current challenges and trends in energy systems modeling,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 96, p. 156–166, nov. 2018. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032118305537>

- [32] T. Watari, K. Nansai et K. Nakajima, “Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 155, p. 104669, avr. 2020. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344919305750>
- [33] G. Kavlak, J. McNerney, R. L. Jaffe et J. E. Trancik, “Metal production requirements for rapid photovoltaics deployment,” *Energy & Environmental Science*, vol. 8, n°. 6, p. 1651–1659, 2015. [En ligne]. Disponible : <http://xlink.rsc.org/?DOI=C5EE00585J>
- [34] A. Månberger et B. Stenqvist, “Global metal flows in the renewable energy transition : Exploring the effects of substitutes, technological mix and development,” *Energy Policy*, vol. 119, p. 226–241, août 2018. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421518302726>
- [35] T. Watari, B. McLellan, S. Ogata et T. Tezuka, “Analysis of Potential for Critical Metal Resource Constraints in the International Energy Agency’s Long-Term Low-Carbon Energy Scenarios,” *Minerals*, vol. 8, n°. 4, p. 156, avr. 2018. [En ligne]. Disponible : <http://www.mdpi.com/2075-163X/8/4/156>
- [36] K. Tokimatsu, H. Wachtmeister, B. McLellan, S. Davidsson, S. Murakami, M. Höök, R. Yasuoka et M. Nishio, “Energy modeling approach to the global energy-mineral nexus : A first look at metal requirements and the 2 °C target,” *Applied Energy*, vol. 207, p. 494–509, déc. 2017. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261917307055>
- [37] United States Geological Survey, “Commodity statistics and information,” <https://www.usgs.gov/centers/nmic/commodity-statistics-and-information>, 2021, accessed : 2021-06-17.
- [38] British Geological Survey, “World mineral statistics data,” <https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/wms.cfc?method=searchWMS>, 2021, accessed : 2021-06-17.
- [39] B. A. McNulty et S. M. Jowitt, “Byproduct critical metal supply and demand and implications for the energy transition : A case study of tellurium supply and CdTe PV demand,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 168, p. 112838, oct. 2022. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032122007213>
- [40] B. McLellan, E. Yamasue, T. Tezuka, G. Corder, A. Golev et D. Giurco, “Critical Minerals and Energy—Impacts and Limitations of Moving to Unconventional Resources,” *Resources*, vol. 5, n°. 2, p. 19, mai 2016. [En ligne]. Disponible : <http://www.mdpi.com/2079-9276/5/2/19>
- [41] G. Calvo, A. Valero et A. Valero, “Assessing maximum production peak and resource availability of non-fuel mineral resources : Analyzing the influence of extractable global resources,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 125, p. 208–217,

- oct. 2017. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917301635>
- [42] V. Lundaev, A. Solomon, T. Le, A. Lohrmann et C. Breyer, “Review of critical materials for the energy transition, an analysis of global resources and production databases and the state of material circularity,” *Minerals Engineering*, vol. 203, p. 108282, nov. 2023. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892687523002960>
- [43] A. Valero, A. Valero, G. Calvo et A. Ortego, “Material bottlenecks in the future development of green technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 93, p. 178–200, 2018.
- [44] J. E. Tilton, “The hubbert peak model and assessing the threat of mineral depletion,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 139, p. 280–286, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344918303276>
- [45] A. Charpentier Poncelet, C. Helbig, P. Loubet, A. Beylot, S. Muller, J. Villeneuve, B. Laratte, A. Thorenz, A. Tuma et G. Sonnemann, “Losses and lifetimes of metals in the economy,” *Nature Sustainability*, vol. 5, n^o. 8, p. 717–726, août 2022, number : 8 Publisher : Nature Publishing Group. [En ligne]. Disponible : <https://www.nature.com/articles/s41893-022-00895-8>
- [46] J. Pedneault, G. Majeau-Bettez, S. Pauliuk et M. Margni, “Sector-specific scenarios for future stocks and flows of aluminum : An analysis based on shared socioeconomic pathways,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 26, n^o. 5, p. 1728–1746, oct. 2022. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jiec.13321>
- [47] S. Deetman, H. De Boer, M. Van Engelenburg, E. Van Der Voet et D. Van Vuuren, “Projected material requirements for the global electricity infrastructure – generation, transmission and storage,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 164, p. 105200, janv. 2021. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344920305176>
- [48] G. S. Seck, E. Hache et C. Barnet, “Potential bottleneck in the energy transition : The case of cobalt in an accelerating electro-mobility world,” *Resources Policy*, vol. 75, p. 102516, mars 2022. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301420721005237>
- [49] A. Boubault, S. Kang et N. Maïzi, “Closing the times integrated assessment model (tiam-fr) raw materials gap with life cycle inventories,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 23, n^o. 3, p. 587–600, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jiec.12780>

- [50] P. Wang, W.-Q. Chen, X. Cui, J. Li, W. Li, C. Wang, W. Cai et X. Geng, “Critical mineral constraints in global renewable scenarios under 1.5 °C target,” *Environmental Research Letters*, vol. 17, n° 12, p. 125004, déc. 2022. [En ligne]. Disponible : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aca4ea>
- [51] S. Wang, Z. Hausfather, S. Davis, J. Lloyd, E. B. Olson, L. Liebermann, G. D. Núñez-Mujica et J. McBride, “Future demand for electricity generation materials under different climate mitigation scenarios,” *Joule*, vol. 7, n° 2, p. 309–332, févr. 2023. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435123000016>
- [52] I. E. Agency, “World Energy Outlook 2020,” 2020.
- [53] H. Miller, S. Dikau, R. Svartzman et S. Dees, “The Stumbling Block in ‘the Race of our Lives’ : Transition-Critical Materials, Financial Risks and the NGFS Climate Scenarios,” 2023.
- [54] Y. Liang, R. Kleijn, A. Tukker et E. van der Voet, “Material requirements for low-carbon energy technologies : A quantitative review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 161, p. 112334, juin 2022. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122002477>
- [55] T. Watari, B. C. McLellan, D. Giurco, E. Dominish, E. Yamasue et K. Nansai, “Total material requirement for the global energy transition to 2050 : A focus on transport and electricity,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 148, p. 91–103, sept. 2019. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344919302290>
- [56] J. Calderon, N. Smith, M. Bazilian et E. Holley, “Critical mineral demand estimates for low-carbon technologies : What do they tell us and how can they evolve?” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 189, p. 113938, janv. 2024. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032123007967>
- [57] R. Magdalena, A. Valero et G. Calvo, “Limit of recovery : How future evolution of ore grades could influence energy consumption and prices for Nickel, Cobalt, and PGMs,” *Minerals Engineering*, vol. 200, p. 108150, sept. 2023. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892687523001644>
- [58] M. F. Ashby, “Chapter 12 - Materials for low-carbon power,” dans *Materials and the Environment (Second Edition)*, M. F. Ashby, édit. Boston : Butterworth-Heinemann, janv. 2013, p. 349–413. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123859716000129>
- [59] J. Van Oorschot, B. Sprecher, B. Roelofs, J. Van Der Horst et E. Van Der Voet, “Towards a low-carbon and circular economy : Scenarios for metal stocks and flows in the Dutch electricity system,” *Resources, Conservation*

- and Recycling*, vol. 178, p. 106105, mars 2022. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344921007138>
- [60] N. T. Nassar, G. W. Lederer, J. L. Brainard, A. J. Padilla et J. D. Lessard, “Rock-to-Metal Ratio : A Foundational Metric for Understanding Mine Wastes,” *Environmental Science & Technology*, vol. 56, n°. 10, p. 6710–6721, mai 2022, publisher : American Chemical Society. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07875>
- [61] International Energy Agency, *Critical Minerals Market Review 2023*. OECD, juill. 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.oecd-ilibrary.org/energy/critical-minerals-market-review-2023_9cdf8f39-en
- [62] United States Geological Survey, “Mineral commodity summaries 2023,” 2023, uSGS, 2023.
- [63] International Energy Agency, “Critical minerals data explorer – data tools,” 2024, consulté le 08-10-24. [En ligne]. Disponible : <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/critical-minerals-data-explorer>
- [64] P. Wang, Y.-Y. Yang, O. Heidrich, L.-Y. Chen, L.-H. Chen, T. Fishman et W.-Q. Chen, “Regional rare-earth element supply and demand balanced with circular economy strategies,” *Nature Geoscience*, vol. 17, n°. 1, p. 94–102, janv. 2024, publisher : Nature Publishing Group. [En ligne]. Disponible : <https://www.nature.com/articles/s41561-023-01350-9>
- [65] A. K. Pathak, M. Khan, K. A. Gschneidner Jr., R. W. McCallum, L. Zhou, K. Sun, K. W. Dennis, C. Zhou, F. E. Pinkerton, M. J. Kramer et V. K. Pecharsky, “Cerium : An unlikely replacement of dysprosium in high performance nd–fe–b permanent magnets,” *Advanced Materials*, vol. 27, n°. 16, p. 2663–2667, 2015. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201404892>
- [66] C. C. Pavel, R. Lacal-Arántegui, A. Marmier, D. Schüler, E. Tzimas, M. Buchert, W. Jenseit et D. Blagoeva, “Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines,” *Resources Policy*, vol. 52, p. 349–357, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420717300077>
- [67] L. Grandell et A. Thorenz, “Silver supply risk analysis for the solar sector,” *Renewable Energy*, vol. 69, p. 157–165, sept. 2014. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114001785>
- [68] A. García-Olivares, “Substituting silver in solar photovoltaics is feasible and allows for decentralization in smart regional grids,” *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 17, p. 15–21, déc. 2015. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210422415000428>

- [69] S. Davidsson et M. Höök, “Material requirements and availability for multi-terawatt deployment of photovoltaics,” *Energy Policy*, vol. 108, p. 574–582, sept. 2017. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421517303798>
- [70] A. Kribus, “Concentrated Solar Power : Components and materials,” *EPJ Web of Conferences*, vol. 148, p. 00009, janv. 2017.
- [71] E. Pihl, D. Kushnir, B. Sandén et F. Johnsson, “Material constraints for concentrating solar thermal power,” *Energy*, vol. 44, n°. 1, p. 944–954, 2012, integration and Energy System Engineering, European Symposium on Computer-Aided Process Engineering 2011. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421200374X>
- [72] International Renewable Energy Agency, “Renewable power generation costs in 2022,” Abu Dhabi, 2023.
- [73] N. Bolson, P. Prieto et T. Patzek, “Capacity factors for electrical power generation from renewable and nonrenewable sources,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 119, n°. 52, p. e2205429119, déc. 2022. [En ligne]. Disponible : <https://pnas.org/doi/10.1073/pnas.2205429119>
- [74] “U.S. energy capacity factors by source 2022.” [En ligne]. Disponible : <https://www.statista.com/statistics/183680/us-average-capacity-factors-by-selected-energy-source-since-1998/>
- [75] S. Searle et C. Malins, “A reassessment of global bioenergy potential in 2050,” *GCB Bioenergy*, vol. 7, n°. 2, p. 328–336, 2015, eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/gcbb.12141>. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcbb.12141>
- [76] T. Searchinger et R. Heimlich, “Avoiding Bioenergy Competition for Food Crops and Land,” dans *Creating a Sustainable Food Future*. World Resources Institute, January 2015.
- [77] S. Nakada, D. Saygin et D. Gielen, “Global bioenergy supply and demand projections,” p. 5, 2014, a Working Paper for REmap 2030.
- [78] M. Errera, T. C. Dias, D. Maya et E. Lora, “Global bioenergy potentials projections for 2050,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 170, p. 106721, mars 2023. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953423000193>
- [79] “Global bioenergy statistics 2022,” 2022, flagship publication of the World Bioenergy Association, first published in 2014.
- [80] D. E. H. J. Gernaat, P. W. Bogaart, D. P. v. Vuuren, H. Biemans et R. Niessink, “High-resolution assessment of global technical and economic hydropower potential,”

- Nature Energy*, vol. 2, n^o. 10, p. 821–828, oct. 2017, publisher : Nature Publishing Group. [En ligne]. Disponible : <https://www.nature.com/articles/s41560-017-0006-y>
- [81] Y. Liang, R. Kleijn et E. Van Der Voet, “Increase in demand for critical materials under IEA Net-Zero emission by 2050 scenario,” *Applied Energy*, vol. 346, p. 121400, sept. 2023. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626192300764X>
- [82] K. Halada, M. Shimada et K. Ijima, “Decoupling status of metal consumption from economic growth,” *Journal of the Japanese Institute of Metals*, vol. 71, p. 823–830, 2007.
- [83] P. Greim, A. A. Solomon et C. Breyer, “Assessment of lithium criticality in the global energy transition and addressing policy gaps in transportation,” *Nature Communications*, vol. 11, n^o. 1, p. 4570, sept. 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.nature.com/articles/s41467-020-18402-y>
- [84] K. Habib, S. T. Hansdóttir et H. Habib, “Critical metals for electromobility : Global demand scenarios for passenger vehicles, 2015–2050,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 154, p. 104603, mars 2020. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344919305099>
- [85] J. E. Tilton, “The Hubbert peak model and assessing the threat of mineral depletion,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 139, p. 280–286, déc. 2018. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344918303276>
- [86] N. T. Nassar, T. E. Graedel et E. M. Harper, “By-product metals are technologically essential but have problematic supply,” *Science Advances*, vol. 1, n^o. 3, p. e1400180, avr. 2015, publisher : American Association for the Advancement of Science. [En ligne]. Disponible : <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1400180>
- [87] G. M. Mudd, S. M. Jowitt et T. T. Werner, “The world’s by-product and critical metal resources part I : Uncertainties, current reporting practices, implications and grounds for optimism,” *Ore Geology Reviews*, vol. 86, p. 924–938, juin 2017. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016913681630066X>
- [88] T. E. Graedel, J. Allwood, J.-P. Birat, M. Buchert, C. Hagelüken, B. K. Reck, S. F. Sibley et G. Sonnemann, *Recycling rates of metals : a status report*. Nairobi, Kenya : United Nations Environment Programme, 2011, oCLC : 772475608.
- [89] K. Habib, L. Hamelin et H. Wenzel, “A dynamic perspective of the geopolitical supply risk of metals,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 133, p. 850–858, 2016. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261630590X>
- [90] J. R. Oakleaf, C. M. Kennedy, S. Baruch-Mordo, J. S. Gerber, P. C. West, J. A. Johnson et J. Kiesecker, “Mapping global development potential for renewable

- energy, fossil fuels, mining and agriculture sectors,” *Scientific Data*, vol. 6, n^o. 1, p. 101, juin 2019, publisher : Nature Publishing Group. [En ligne]. Disponible : <https://www.nature.com/articles/s41597-019-0084-8>
- [91] V. Fthenakis et H. C. Kim, “Land use and electricity generation : A life-cycle analysis,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n^o. 6, p. 1465–1474, août 2009. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032108001354>
- [92] D. Klingelhöfer, M. Braun, G. M. Oremek, D. Brüggmann et D. A. Groneberg, “Global research on nuclear energy in the context of health and environmental risks, considering economic interests,” *WIREs Energy and Environment*, vol. 13, n^o. 1, p. e497, 2024, _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/wene.497>. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wene.497>
- [93] S. Leray, “Nuclear energy basics,” *EPJ Web of Conferences*, vol. 268, p. 00008, 2022. [En ligne]. Disponible : <https://www.epj-conferences.org/10.1051/epjconf/202226800008>
- [94] L. Mancini et S. Sala, “Social impact assessment in the mining sector : Review and comparison of indicators frameworks,” *Resources Policy*, vol. 57, p. 98–111, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420717301484>
- [95] P. Nuss et M. J. Eckelman, “Life cycle assessment of metals : A scientific synthesis,” *PLoS ONE*, vol. 9, n^o. 7, p. e101298, 2014.
- [96] H. Ritchie, “Low-carbon technologies need far less mining than fossil fuels,” *Our World in Data*, 2024, <https://ourworldindata.org/low-carbon-technologies-need-far-less-mining-fossil-fuels>.
- [97] J. Nijnsens, P. Behrens, O. Kraan, B. Sprecher et R. Kleijn, “Energy transition will require substantially less mining than the current fossil system,” *Joule*, vol. 7, n^o. 11, p. 2408–2413, 2023. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435123004117>
- [98] L. Rosa, K. F. Davis, M. C. Rulli et P. D’Odorico, “Environmental consequences of oil production from oil sands,” *Earth’s Future*, vol. 5, n^o. 2, p. 158–170, 2017.
- [99] A. Gambhir, I. Butnar, P.-H. Li, P. Smith et N. Strachan, “A review of criticisms of integrated assessment models and proposed approaches to address these, through the lens of beccs,” *Energies*, vol. 12, n^o. 9, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/9/1747>
- [100] J. Hickel, G. Kallis, T. Jackson, D. W. O’Neill, J. B. Schor, J. K. Steinberger, P. A. Victor et D. Ürge Vorsatz, “Degrowth can work—here’s how science can help,” *Nature*, vol. 612, n^o. 7940, p. 400–403, 2022.

- [101] R. de l'énergie du Canada, "OnÉ - scénarios et hypothèses," novembre 2023. [En ligne]. Disponible : <https://www.cer-rec.gc.ca/fr/donnees-analyse/avenir-energetique-canada/2023/scenarios-et-hypotheses/>
- [102] Oxford Institute for Energy Studies, "Energy transition scenarios : Impact on natural gas," 2023. [En ligne]. Disponible : <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2023/02/Energy-Transition-Scenarios-Impact-on-Natural-Gas.pdf>
- [103] P. Achakulwisut, P. Erickson, C. Guivarch et al., "Global fossil fuel reduction pathways under different climate mitigation strategies and ambitions," *Nature Communications*, vol. 14, p. 5425, 2023.
- [104] T. Harrisson, "Q&a : How 'integrated assessment models' are used to study climate change," April 26 2021, carbon Brief. [En ligne]. Disponible : <https://www.carbonbrief.org/qa-how-integrated-assessment-models-are-used-to-study-climate-change/>
- [105] J. Mudi et D. Sinha, "Comparative study among different wind turbines used for wind energy system," dans *2014 1st International Conference on Non Conventional Energy (ICONCE 2014)*. Kalyani, India : IEEE, janv. 2014, p. 175–179. [En ligne]. Disponible : <http://ieeexplore.ieee.org/document/6808715/>
- [106] A. Beainy, C. Maatouk, N. Moubayed et F. Kaddah, "Comparison of different types of generator for wind energy conversion system topologies," dans *2016 3rd International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC)*. Zouk Mosbeh, Lebanon : IEEE, juill. 2016, p. 1–6. [En ligne]. Disponible : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7577535/>
- [107] H. Lara et H. Lara. (2022, septembre) Reportage : voici comment la boîte de vitesse d'une éolienne est remplacée. Consulté le 2 octobre 2024. [En ligne]. Disponible : <https://www.revolution-energetique.com/reportage-voici-comment-la-boite-de-vitesse-dune-eolienne-est-remplacee/>
- [108] J. Jean, P. R. Brown, R. L. Jaffe, T. Buonassisi et V. Bulović, "Pathways for solar photovoltaics," *Energy & Environmental Science*, vol. 8, n° 4, p. 1200–1219, 2015. [En ligne]. Disponible : <http://xlink.rsc.org/?DOI=C4EE04073B>
- [109] G. M. Wilson, M. Al-Jassim, W. K. Metzger, S. W. Glunz, P. Verlinden, G. Xiong, L. M. Mansfield, B. J. Stanbery, K. Zhu, Y. Yan, J. J. Berry, A. J. Ptak, F. Dimroth, B. M. Kayes, A. C. Tamboli, R. Peibst, K. Catchpole, M. O. Reese, C. S. Klinga, P. Denholm, M. Morjaria, M. G. Deceglie, J. M. Freeman, M. A. Mikofski, D. C. Jordan, G. TamizhMani et D. B. Sulas-Kern, "The 2020 photovoltaic technologies roadmap," *Journal of Physics D : Applied Physics*, vol. 53, n° 49, p. 493001, déc. 2020. [En ligne]. Disponible : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/ab9c6a>

- [110] D. Chambonnet, R. Gauthier, R. M'Ghaieth et P. Pinard, "Le ruban de silicium E.P.R. : élaboration et mise au point d'un dispositif d'analyse des contraintes résiduelles," *Revue de Physique Appliquée*, vol. 22, n°. 7, p. 557–562, 1987. [En ligne]. Disponible : <http://www.edpsciences.org/10.1051/rphysap:01987002207055700>
- [111] C. S. Tao, J. Jiang et M. Tao, "Natural resource limitations to terawatt-scale solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, n°. 12, p. 3176–3180, déc. 2011. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024811003527>
- [112] D. S. Philipps, W. Warmuth, F. ISE et P. P. GmbH, "Photovoltaics report," Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Rapport technique, 2023, consulté le 2 octobre 2024.
- [113] A. H. Alami, A. Olabi, A. Mdallal, A. Rezk, A. Radwan, S. M. A. Rahman, S. K. Shah et M. A. Abdelkareem, "Concentrating solar power (CSP) technologies : Status and analysis," *International Journal of Thermofluids*, vol. 18, p. 100340, mai 2023. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666202723000599>
- [114] SolarPACES, "How csp works," 2018, accessed : 2024-09-18. [En ligne]. Disponible : <https://www.solarpaces.org/how-csp-works/>
- [115] K. Kermeli, O. Y. Edelenbosch, W. Crijns-Graus, B. J. Van Ruijven, D. P. Van Vuuren et E. Worrell, "Improving material projections in Integrated Assessment Models : The use of a stock-based versus a flow-based approach for the iron and steel industry," *Energy*, vol. 239, p. 122434, janv. 2022. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544221026839>
- [116] L. Rostek, E. Pirard et A. Loibl, "The future availability of zinc : Potential contributions from recycling and necessary ones from mining," *Resources, Conservation & Recycling Advances*, vol. 19, p. 200166, nov. 2023. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S266737892300038X>

ANNEXE A NARRATIFS DES DIFFÉRENTS SSP

TABLE A.1 Résumé des narratifs SSP, reproduit de [16]

SSP1 : Sustainability – Taking the Green Road

The world shifts gradually, but pervasively, toward a more sustainable path, emphasizing more inclusive development that respects perceived environmental boundaries. Management of the global commons slowly improves, educational and health investments accelerate the demographic transition, and the emphasis on economic growth shifts toward a broader emphasis on human well-being. Driven by an increasing commitment to achieving development goals, inequality is reduced both across and within countries. Consumption is oriented toward low material growth and lower resource and energy intensity.

SSP2 : Middle of the Road

The world follows a path in which social, economic, and technological trends do not shift markedly from historical patterns. Development and income growth proceeds unevenly, with some countries making relatively good progress while others fall short of expectations. Global and national institutions work toward but make slow progress in achieving sustainable development goals. Environmental systems experience degradation, although there are some improvements and overall the intensity of resource and energy use declines. Global population growth is moderate and levels off in the second half of the century. Income inequality persists or improves only slowly and challenges to reducing vulnerability to societal and environmental changes remain.

SSP3 : Regional Rivalry – A Rocky Road

A resurgent nationalism, concerns about competitiveness and security, and regional conflicts push countries to increasingly focus on domestic or, at most, regional issues. Policies shift over time to become increasingly oriented toward national and regional security issues. Countries focus on achieving energy and food security goals within their own regions at the expense of broader-based development. Investments in education and technological development decline. Economic development is slow, consumption is material-intensive, and inequalities persist or worsen over time. Population growth is low in industrialized and high in developing countries. A low international priority for addressing environmental concerns leads to strong environmental degradation in some regions.

SSP4 : Inequality – A Road Divided

Highly unequal investments in human capital, combined with increasing disparities in economic opportunity and political power, lead to increasing inequalities and stratification both across and within countries. Over time, a gap widens between an internationally-connected society that contributes to knowledge- and capital-intensive sectors of the global economy, and a fragmented collection of lower-income, poorly educated societies that work in a labor intensive, low-tech economy. Social cohesion degrades and conflict and unrest become increasingly common. Technology development is high in the high-tech economy and sectors. The globally connected energy sector diversifies, with investments in both carbon-intensive fuels like coal and unconventional oil, but also low-carbon energy sources. Environmental policies focus on local issues around middle and high income areas.

SSP5 : Fossil-fueled Development – Taking the Highway

This world places increasing faith in competitive markets, innovation and participatory societies to produce rapid technological progress and development of human capital as the path to sustainable development. Global markets are increasingly integrated. There are also strong investments in health, education, and institutions to enhance human and social capital. At the same time, the push for economic and social development is coupled with the exploitation of abundant fossil fuel resources and the adoption of resource and energy intensive lifestyles around the world. All these factors lead to rapid growth of the global economy, while global population peaks and declines in the 21st century. Local environmental problems like air pollution are successfully managed. There is faith in the ability to effectively manage social and ecological systems, including by geo-engineering if necessary.

ANNEXE B LE FONCTIONNEMENT DES IAM

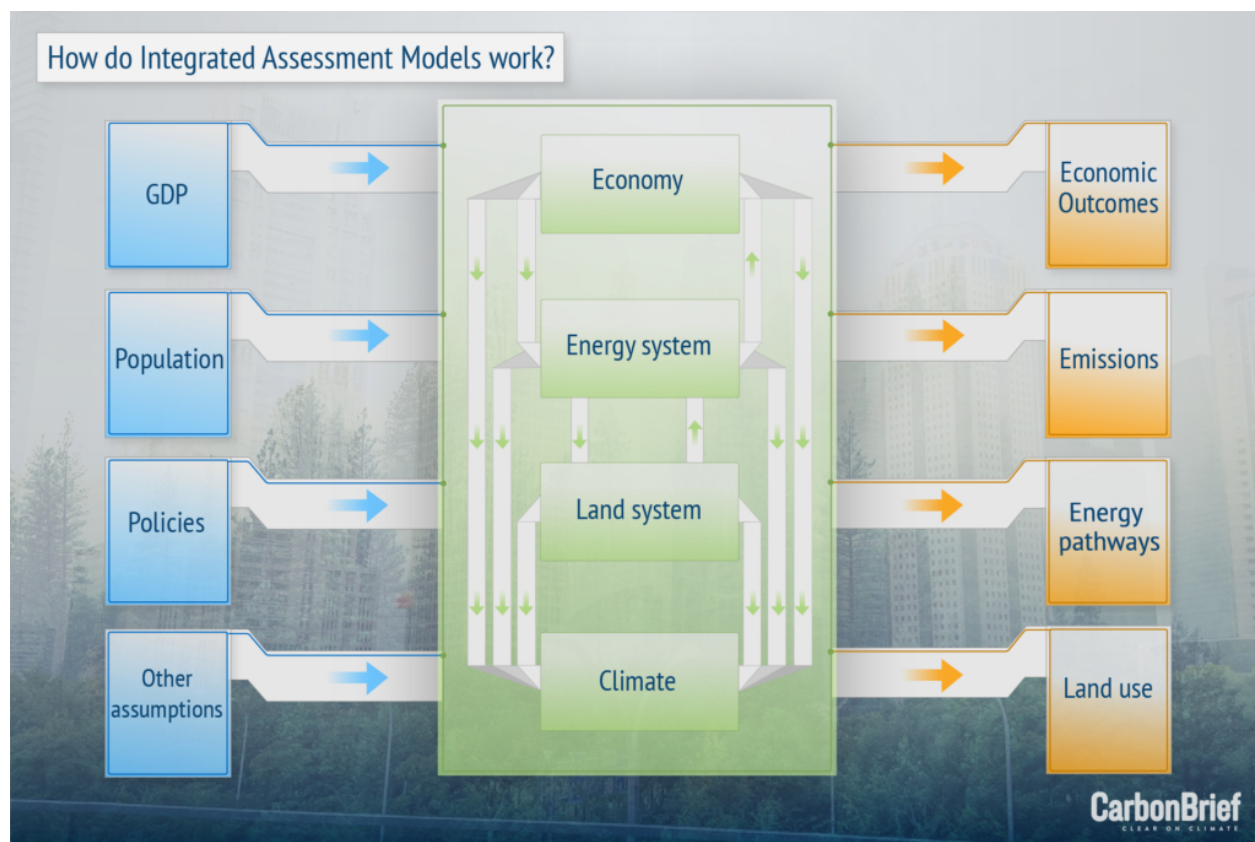


FIGURE B.1 Le fonctionnement des IAM, reproduit de [104]

ANNEXE C LISTE DES MÉTAUX INTÉGRÉS À L'ÉTUDE

TABLEAU C.1 Liste de métaux à l'étude

Métaux à l'étude
Aluminium
Argent
Bore
Cadmium
Chrome
Cobalt
Cuivre
Dysprosium
Étain
Fer
Gallium
Germanium
Hafnium
Indium
Molybdène
Néodyme
Nickel
Niobium
Plomb
Praséodyme
Sélénium
Silicium
Tantale
Tellure
Terbium
Vanadium
Yttrium
Zinc
Zirconium

ANNEXE D LISTE DES SOURCES D'ÉNERGIE INTÉGRÉES À L'ÉTUDE

TABLEAU D.1 Liste des sources d'énergie à l'étude

Sources d'énergie à l'étude	Abréviation
Solaire silicium cristallin - conducteur en argent	Sol_C-si_Silver
Solaire silicium cristallin - conducteur en cuivre	Sol_C-si_Copper
Solaire à couche fine CdTe	Sol_CdTe
Solaire à couche fine CIGS	Sol_CIGS
Solaire à couche fine a-SiGe	Sol_a-SiGe
Solaire CSP parabolique	Sol_CSP_parabol
Solaire CSP à tour	Sol_CSP_tower
Eolienne terrestre à excitation électrique	Wind_DD-EESG_Onshore
Eolienne terrestre à boîte de vitesse DFIG et SCIG	Wind_GB-DFIG_SCIG_Onshore
Eolienne terrestre à aimant permanent	Wind_DD-PMSG_Onshore
Eolienne terrestre hybride	Wind_GB-PMSG_Onshore
Eolienne maritime à excitation électrique	Wind_DD-EESG_Offshore
Eolienne maritime à boîte de vitesse DFIG et SCIG	Wind_GB-DFIG_SCIG_Offshore
Eolienne maritime à aimant permanent	Wind_DD-PMSG_Offshore
Eolienne maritime hybride	Wind_GB-PMSG_Offshore
Nucléaire	Nuclear
Centrale hydroélectrique	Hydro
Biomasse	Biomass
Géothermie	Geothermal
Charbon fossile	Foss_Coal
Gaz naturel fossile	Foss_NaturalGas
Pétrole fossile	Foss_Oil
Hydrogène fossile	Foss_Hydrogen

ANNEXE E DESCRIPTION DES SOUS-TECHNOLOGIES DE L'ÉOLIEN ET DU SOLAIRE

Afin d'estimer précisément la demande en métaux du secteur énergétique, et d'**ajouter de la flexibilité** au mix technologique, il est nécessaire d'avoir une compréhension précise des **variantes technologiques** et leur **potentiel de substitution**. Cette annexe vise à présenter le fonctionnement des sous-technologies de l'éolien, du solaire photovoltaïque et du solaire thermodynamique à concentration, puis à estimer le potentiel de remplacement d'une technologie par une autre.

Fonctionnement et caractéristiques des sous-technologies éoliennes

Une éolienne est constituée d'un mât supportant des pales et d'une nacelle à une hauteur suffisante pour capter des vents forts. Les pales captent l'énergie du vent et la transforment en force de rotation. Cette force est ensuite transmise à un moyeu, situé dans la nacelle. L'énergie mécanique du rotor (pale et moyeu) est transformée en électricité par un générateur.

Dans cette étude, on se concentre sur quatre **sous-technologies** principales de l'éolien. Les éoliennes à boîte de vitesse **GB-DFIG et SCIG** sont agrégées en une seule catégorie. Les éoliennes à entraînement direct sont divisées entre les éoliennes à aimant permanent **DD-PMSG** et celles à excitation électrique **DD-EESG**. La dernière catégorie **GB-PMSG** est une technologie hybride à boîte de vitesse et aimant permanent. Ces catégories proviennent d'une étude de la Commission européenne [6].

Éoliennes à boîte de vitesse (GB)

Les éoliennes à boîte de vitesses (« Gearbox », ou « GB » en anglais) possèdent des générateurs nécessitant une importante vitesse de rotation pour créer un courant. La puissance du vent fait tourner le rotor, mais la vitesse n'est pas suffisante pour générer de l'énergie. La boîte de vitesses multiplie mécaniquement la vitesse initiale du rotor, et la transmet au générateur qui produit un courant. Technologie simple et ancienne, elle représente aujourd'hui 70 % du marché [5].

Générateur à Induction à Cage d'Écureuil (SCIG) Le générateur utilisé dans la technologie **SCIG** est une cage d'écureuil. Un courant initial provenant du réseau active la cage d'écureuil. Lorsque le générateur est alimenté, un champ magnétique rotatif créé par le

stator induit un courant dans les barres du rotor, provoquant la rotation du rotor. Cependant, la vitesse du rotor doit être à la vitesse du réseau, et est donc presque constante. La puissance générée par le vent est limitée, car la technologie fonctionne à vitesse de vent fixe, rendant son utilisation en mer peu attractive du fait de (explication) [105, 106]. Son utilisation a progressivement diminué avec l'apparition du générateur à induction à double alimentation.

Générateur à Induction à Double Alimentation (DFIG) La technologie **DFIG** est une version « améliorée » du SCIG. La cage d'écureuil est remplacée par des bobines réglables selon la vitesse du vent. La technologie DFIG adapte l'énergie générée à la vitesse du vent, permettant une augmentation de l'efficacité de la turbine par rapport au SCIG [105]. La technologie peut être utilisée en mer comme sur terre. Le moteur à boîte de vitesses fonctionne avec des aimants plus légers que la technologie appelée « Direct Drive » et demande donc moins de métaux lors de sa construction.

La technologie **GB-DFIG & SCIG** est **simple, robuste et moins coûteuse**. Cependant, les boîtes de vitesses demandent une **maintenance importante**, avec une durée de vie autour de 8 ans, en comparaison à la turbine qui dure environ 20 [107]. La maintenance est donc très coûteuse, spécialement pour les éoliennes en mer. Les boîtes de vitesse sont également lourdes, et occupent toute la nacelle. Leur taille est donc limitée, imposant ainsi une **limite à la puissance** pouvant être générée. De plus, bien que la technologie DFIG permette d'opérer à une vitesse de vent variable, la gamme d'opérations de révolution par minute reste limitée [66]. C'est pourquoi elles sont **moins utilisées en mer**, là où le potentiel de vent et de puissance générée est important [106].

Éoliennes à entraînement direct (DD)

Le rotor de l'éolienne à **entraînement direct** est connecté au générateur sans intermédiaire, il est directement entraîné par les pâles. Il tourne donc à une vitesse inférieure à celle du générateur à boîte de vitesses. La technologie DD requiert des générateurs différents, souvent de tailles plus importantes, pour fonctionner. [66]

Générateur synchrone à aimants permanents (DD-PMSG) Le générateur de la technologie DD-PMSG est conçu à partir d'aimants permanents. Composé de davantage de pôles magnétiques, il fonctionne à vitesse basse et est **plus léger** [68, 107]. Il crée un champ magnétique stable, sans avoir besoin d'une alimentation électrique externe. La machine ayant moins de pièces en rotation, et n'utilisant plus de boîte de vitesses, le **besoin en maintenance est réduit**. Les pertes liées à l'excitation du rotor, qui constituaient 30 % des

perdes totales, sont éliminées pour un **meilleur rendement** [106]. La taille n'est également plus limitée par la boîte de vitesses, permettant de **générer de plus grandes puissances**. Elle offre également une conversion de puissance complète et fonctionne dans une plage de vitesse variable plus importante. Ces caractéristiques la rendent particulièrement intéressante pour une **utilisation en mer** [6]. Cependant, les éoliennes PMSG sont conçues à partir de technologies plus complexes les rendant **plus chères** que les technologies DFIG ou SCIG, et l'aimant permanent nécessite des **terres rares**.

Générateur synchrone à excitation électrique (DD-EESG) L'EESG est un autre modèle de générateur à entraînement direct. Contrairement au PMSG, il est produit sans aimant permanent, mais son poids est supérieur, rendant son **utilisation en mer peu adaptée**. [6]. L'EESG est actuellement très peu utilisé, car il possède de nombreux inconvénients par rapport à son équivalent à vitesse variable PMSG. En effet, la technologie est **moins efficace, moins fiable et plus lourde**. Il est également **plus cher** que le générateur à PMSG [105].

Éolienne hybride

Générateur synchrone à aimants permanents et boîte de vitesse (GB-PMSG)

La technologie hybride combine une boîte de vitesse et un aimant permanent, la rendant plus fiable qu'une technologie à boîte de vitesse seulement. Elle est **moins coûteuse** que les éoliennes à entraînement direct, bien qu'elle demande de plus grands **coûts de maintenance** en raison de la présence de la boîte de vitesse. L'aimant permanent utilisé étant plus petit, elle nécessite **moins de terres rares**. Elle peut être utilisée en mer comme sur terre. [6].

Fonctionnement et caractéristiques des sous-technologies solaires photovoltaïques

Les cellules **solaires photovoltaïques** (PV) sont constituées d'un empilement de couches de matériaux semi-conducteurs [6]. La première couche, appelée la couche donneuse d'électrons (couche négative, ou type n), et la seconde couche, appelée la couche accepteuse d'électrons (couche positive, ou type p), forment une jonction p-n. Quand la cellule est exposée à la lumière du soleil, l'énergie des photons (particules de lumière) est suffisante pour libérer des électrons de la couche donneuse. Ces électrons se déplacent alors vers la couche accepteuse à travers un circuit conducteur. Ce mouvement des électrons crée un courant électrique, convertissant l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique. Chaque cellule PV générant une tension électrique faible, il est nécessaire de connecter de multiples cellules ensemble, ce qui constitue le panneau PV.

Dans cette étude, le solaire photovoltaïque est divisé en cinq sous-technologies. La technologie de première génération, le solaire silicium cristallin (c-Si), se dérive en **c-Si Silver** avec un circuit conducteur en argent et en **c-Si Copper** avec une substitution de l'argent par le cuivre [68]. La technologie de seconde génération, à couche mince, se divise en trois catégories, selon les métaux utilisés comme semi-conducteurs : le **CdTe**, le **CIGS** et le **a-SiGe**.

Solaire de 1re génération – silicium cristallin

Les couches n-p des panneaux PV de 1re génération sont composées de silicium (extrait du sable). Bien que cet élément soit l'**un des plus abondants** de la planète, il doit être converti en silicium très pur, nécessitant une quantité importante d'énergie [69]. L'une des couches est dopée par des atomes de phosphore, créant un surplus d'électrons (type N). Du bore, possédant un déficit d'électrons, est ajouté sur l'autre couche (type P). Les couches N et P sont reliées par un circuit conducteur. D'autres métaux structurels sont utilisés sous forme de couches additionnelles pour encadrer le système, ajouter des effets antireflet, améliorer la performance de la cellule, etc.

Crystalline Silicon (C-Si Silver) Le silicium cristallin (**C-Si**) est la technologie photovoltaïque (PV) la plus ancienne et la plus couramment utilisée de nos jours. Elle représente **95 % de la production mondiale** de panneaux PV [108] et possède une efficacité entre 22 % et 23 % [109]. Il existe trois catégories de C-Si : le silicium monocristallin, qui représente 84 % du marché, le silicium polycristallin, et le silicium en rubans [110]. La composition métallique de ces sous-catégories étant relativement similaire, la distinction n'a pas été prise en compte dans cette étude.

Crystalline Silicon Copper (C-Si Copper) La production typique de c-Si utilise de l'**argent comme conducteur**, un métal critique [67]. Cependant, l'argent pourrait être **substitué par du cuivre** à l'avenir. C'est pourquoi la technologie C-Si au cuivre est également incluse comme variante dans notre étude, le cuivre remplaçant l'argent en masse équivalente [68].

Solaire de 2e génération – Technologies à couche mince

Les couches n-p des cellules PV 2^{ème} génération utilisent des matériaux semi-conducteurs, déposés en couche mince sur un substrat, comme du verre, du plastique ou du métal [111]. Les matériaux étant très fins, elles absorbent efficacement la lumière, avec une épaisseur moindre par rapport aux cellules c-Si. Cette technologie représente à ce jour une **part de marché**

d'environ 5 % [112]. Généralement plus **légères et flexibles**, les cellules PV à couche mince offrent des **avantages d'applications** dans des systèmes PV intégrés aux bâtiments ou encore du vitrage PV laminé sur fenêtre. Cependant, elles utilisent des **métaux rares** et peu disponibles, et leur rendement est à ce jour légèrement inférieur à celui des technologies C-Si.

Cellules solaires Tellure de Cadmium (CdTe) Les cellules solaires CdTe utilisent du Cadmium et du Tellure comme matériau semi-conducteur. Avec une épaisseur entre 2 et 8 micromètres [111], cette technologie constitue à ce jour **la plus grande part de marché des technologies à couche mince**. En 10 ans, l'efficacité de ces cellules a augmenté de 9 à 19 %, avec une efficacité record en laboratoire de 21 % [112]. La part de marché des technologies CdTe pourrait augmenter dans le futur en raison de sa **flexibilité et de sa légèreté**, avec une plus grande pénétration dans le domaine de la **distribution** et du **bâtiment**. Cependant, cela ajouterait une pression importante sur les ressources de cadmium et de tellure [5]. De plus, des préoccupations environnementales liées au cadmium, métal toxique, posent des défis de recyclage et de gestion des déchets des panneaux CdTe.

Cellules solaires Cuivre-Indium-Gallium-Sélénium (CIGS) Les matériaux semi-conducteurs des cellules solaires CIGS sont composés de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénium. Leur épaisseur varie entre 1 et 2,5 micromètres [111]. La fabrication des cellules CIGS est plus **complexe et coûteuse** que celle des CdTe en raison de ses matériaux multiples. Cependant, ils offrent généralement de **meilleures performances**. L'efficacité record enregistrée en laboratoire pour cette technologie est de 23,4 % [112].

Cellules solaires Silicium amorphe (a-Si) Les cellules solaires Silicium Amorphe utilisent du silicium non cristallin comme matériau semi-conducteur. Cette technologie ne représente que 1 % des parts de marché du solaire [5]. Elle a une **efficacité** de conversion **inférieure** aux autres technologies de couches minces, autour de 6 à 10 %. Son efficacité peut également se dégrader au cours du temps à cause du phénomène de dégradation lumineuse. Cependant, son processus de **fabrication est plus simple et moins énergivore**, réduisant les coûts de production.

Fonctionnement et caractéristiques des sous-technologies solaires thermodynamiques à concentration

Les technologies à énergie solaire concentrée (CSP) génèrent de la puissance en utilisant des miroirs ou des lentilles pour concentrer les rayons solaires vers un récepteur. La lumière est convertie en chaleur pour produire de l'électricité. L'argent est essentiel à cette technologie due à sa réflectivité supérieure. [67,70]. La technologie CSP offre l'avantage de pouvoir stocker l'énergie sous forme d'énergie thermique, pouvant redélivrer la puissance à la demande. [113]

Dans cette étude, le solaire CSP est divisé en deux sous-technologies : la **CSP parabol** et la **CSP tour** [113]. La technologie CSP linéaire Fresnel, dont la part de marché est marginale [113], a été exclue de cette étude par manque de données d'intensité métallique. Chacune de ces sous-technologies présente des avantages et des inconvénients, ainsi que des méthodes de construction et donc des métaux différents.

Tours solaires à concentration (CSP tour) La technologie **CSP** la plus utilisée aujourd'hui est le système de **tour solaire** ou à récepteur central. Il est constitué de milliers de miroirs à suivi solaire appelés héliostats, concentrant la lumière sur un récepteur situé au sommet d'une tour [113]. Un fluide caloporteur chauffé dans le récepteur jusqu'à environ 600°C est utilisé pour générer de la vapeur, qui est ensuite utilisée dans une turbine classique pour produire de l'électricité. Cette technologie atteint des températures plus hautes que les autres CSP, atteignant une importante efficacité [114].

Centrales solaires à capteur cylindro-parabolique (CSP parabolique) Dans un système **CSP parabolique**, l'énergie du soleil est concentrée par des réflecteurs courbes en forme de parabole sur un tube récepteur – appelé tube absorbeur de chaleur – situé à environ un mètre au-dessus de la surface courbée des miroirs [113]. Le fluide caloporteur, généralement de l'huile thermique, qui circule à travers ce tube voit sa température augmenter de 293°C à 393°C. Cette énergie thermique est ensuite utilisée dans le bloc de puissance thermique pour générer de l'électricité à l'aide d'un générateur de vapeur conventionnel. Un champ de capteurs solaires utilisant des miroirs en forme de parabole se compose de plusieurs réflecteurs parallèles, pouvant s'étendre sur plus de cent mètres [113]. Ces miroirs sont montés sur un système à axe unique qui suit le mouvement du soleil d'est en ouest pendant la journée, garantissant que les rayons solaires restent concentrés sur les tubes récepteurs.

ANNEXE F LISTE DES PARAMÈTRES

TABLEAU F.1 Définitions des paramètres et sections du mémoire où ils sont calculés

Paramètre	Définition	Section
$S_0(r, t_{\text{flex}}, d)$	Mix de capacités de puissance cumulée installée initiale	3.2.1
$IM(m, t_{\text{det}}, d)$	Intensité métallique	3.2.2
$RR_{\text{Prod}}(m)$	Taux de récupération des pertes de fabrication et transformation des métaux	3.2.3
$RR_{\text{Res}}(m)$	Taux de récupération des pertes de production, fabrication et transformation des métaux	3.2.3
$OTD(m, d)$	Demande métallique des autres secteurs de la transition	3.3
$OTD_d(m, d)$	Demande cumulée sur la décennie d	
$OTD_y(m, d)$	Demande annuelle à la décennie d	
$OSD(m, d)$	Demande métallique des autres secteurs de l'économie	3.4
$OSD_d(m, d)$	Demande cumulée sur la décennie d	
$OSD_y(m, d)$	Demande annuelle à la décennie d	
$Res(m)$	Ressources (ou réserves) du métal m	3.5.1
$Prod(m, y)$	Production de métal m à l'année y	3.5.2
$H(t_{\text{det}}, t_{\text{flex}})$	Matrice technologique	4.1
$CF(r, t_{\text{flex}}, d)$	Facteur de charge	4.3.2
$Biom_P(y)$	Potentiel maximum d'installation de puissance de biomasse à l'année y	4.3.7
$Hydro_P(r)$	Potentiel maximum d'installation de puissance de centrales hydroélectriques dans la région r	4.3.7

ANNEXE G PARTS DE MARCHÉ DES SOUS-TECHNOLOGIES CONSIDÉRÉES DANS L'ÉTUDE

TABLEAU G.1 Parts de marché des sous-technologies éoliennes terrestres par année [6]

Année	DD-EESG (%)	DD-PMSG (%)	GB-PMSG (%)	GB-DFIG-SCIG (%)
2020	6.03	18.89	14.76	60.32
2030	2.38	20.63	17.14	59.84
2040	1.43	23.49	19.68	55.40
2050	0.00	26.50	23.20	50.30

TABLEAU G.2 Parts de marché des sous-technologies éoliennes maritimes par année [6]

Année	DD-EESG (%)	DD-PMSG (%)	GB-PMSG (%)	GB-DFIG-SCIG (%)
2020	5.26	56.80	18.20	19.74
2030	0.00	60.58	9.97	29.45
2040	0.00	59.42	10.76	29.82
2050	0.00	59.00	11.00	30.00

TABLEAU G.3 Parts de marché des sous-technologies solaires PV par année [6]

Année	C-si (%)	CdTe (%)	CIGS (%)	a-Si (%)
2020	95.40	2.40	1.90	0.30
2030	93.60	3.10	2.77	0.53
2040	91.80	3.80	3.63	0.77
2050	90.00	4.50	4.50	1.00

TABLEAU G.4 Parts de marché des sous-technologies CSP, fixes dans le temps [56]

Parabolique (%)	Tour (%)
76	24

ANNEXE H TABLEAU DE RÉPARTITION DES MÉTAUX STRUCTURELS ET SPÉCIFIQUES

TABLEAU H.1 Classification des métaux structurels et spécifiques

Métal	Structurel	Spécifique à la technologie
Aluminium	x	
Boron		x
Cadmium		x
Chromium	x	
Cobalt	x	
Copper	x	
Dysprosium		x
Gallium		x
Germanium		x
Hafnium		x
Indium		x
Iron	x	
Lead	x	
Molybdenum	x	
Neodymium		x
Nickel	x	
Niobium		x
Praesodymium		x
Selenium		x
Silicon	x	
Silver	x	
Tantalum		x
Tellurium		x
Terbium		x
Tin	x	
Tungsten		x
Vanadium	x	
Yttrium		x
Zinc	x	
Zirconium		x

ANNEXE I DONNÉES ET SOURCES DE DONNÉES DES TAUX DE RÉCUPÉRATION

TABLEAU I.1 Taux de récupération par métal

Métal	RR prod (%)	RR res (%)	Source
Aluminium	90.81	79.85	[45]
Boron	96.12	74.59	[45]
Cadmium	99.79	76.12	[45]
Chromium	89.22	67.04	[45]
Cobalt	97.06	42.65	[45]
Copper	97.75	81.60	[45]
Dysprosium	83.45	55.26	[45]
Gallium	95.00	59.85	[86]
Germanium	100	0.66	[45]
Hafnium	99.99	0.27	[45]
Indium	83.28	24.98	[45]
Iron	100	87.41	[45]
Lead	95.74	85.40	[45]
Magnesium	94.08	63.90	[45]
Manganese	96.43	67.50	[45]
Molybdenum	100	60.00	[45]
Neodymium	96.55	57.79	[45]
Nickel	94.46	74.40	[45]
Niobium	92.24	65.49	[45]
Praesodymium	90.29	53.76	[45]
Selenium	99.45	4.48	[45]
Silicon	92.00	73.60	[45]
Silver	100	84.26	[45]
Tantalum	99.81	67.79	[45]
Tellurium	99.00	4.46	[45]
Terbium	86.50	55.89	[45]
Tin	99.24	87.57	[45]
Tungsten	89.03	29.26	[45]
Vanadium	100	88.57	[45]
Yttrium	89.28	59.29	[45]
Zinc	97.57	81.74	[45]
Zirconium	95.60	81.74	[45]

ANNEXE J ESTIMATION DE LA DEMANDE EN MÉTAUX DU RESTE DE L'ÉCONOMIE PROVENANT DE LA LITTÉRATURE

TABLEAU J.1 Estimation de la demande en métaux du reste de l'économie dans la littérature

Métal	Méthode	Mappage des scénarios	Source
Aluminium	Analyse de flux de matière. Le besoin estimé pour la génération d'énergie a été exclu.	Scénarios spécifiques pour chaque SSP.	[46]
Cuivre, Cobalt, Nickel	Projections de la demande en métaux dans d'autres secteurs de l'économie que les secteurs de la transition, méthode non transparente	Utilisation du mappage entre les scénarios de l'IEA et les scénarios SSP définis précédemment.	[63]
Fer	Approche basée sur le stock : analyse par région des secteurs de la construction, de la machinerie, des voitures et des canettes	Demande considérée identique pour tous les scénarios.	[115]
Zinc	Régression linéaire par secteur : galvanisation, moulage sous pression, laiton, feuilles et fils, composés chimiques, autres	Demande considérée identique pour tous les scénarios.	[116]

ANNEXE K HYPOTHÈSES DE CALCUL DE L'ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION MÉTALLIQUE

TABLEAU K.1 Estimation de l'augmentation de production annuelle β par métal

Métal	Beta (%)	Type de données
Aluminium	6	Anciennes
Bore	5	Anciennes
Cadmium	1	Récentes
Chrome	6	Anciennes
Dysprosium	6	Récentes
Gallium	8	Anciennes
Germanium	2	Récentes
Hafnium	7	Anciennes
Indium	4	Récentes
Fer	4	Anciennes
Plomb	2	Récentes
Magnésium	3	Récentes
Manganèse	4	Anciennes
Molybdène	3	Récentes
Néodyme	6	Récentes
Niobium	1	Récentes
Praséodyme	6	Récentes
Sélénium	2	Récentes
Silicium	8	Estimation
Argent	2	Récentes
Tantale	8	Récentes
Tellure	4	Anciennes
Terbium	5	Récentes
Étain	2	Anciennes
Tungstène	3	Anciennes
Vanadium	4	Anciennes
Yttrium	5	Récentes
Zinc	4	Anciennes
Zirconium	7	Anciennes

**ANNEXE L DONNÉES ET SOURCES DE DONNÉES DES RESSOURCES
ET RÉSERVES**

TABLEAU L.1 Ressources et réserves par métal

Métal	Ressources	Réserves	Source
Aluminium	30,000,000,000	12,000,000,000	[42]
Boron	N/A	N/A	
Cadmium	5,700,000	690,000	[42]
Chromium	12,000,000,000	560,000,000	[42], [62]
Cobalt	25,000,000	8,300,000	[42], [62]
Copper	2,100,000,000	890,000,000	[62]
Dysprosium	4,009,000	544,000	[42]
Gallium	13,845,000	1,513,000	[42]
Germanium	N/A	36,000	[42]
Hafnium	N/A	N/A	
Indium	356,000	21,000	[42]
Iron	2.30E+11	2.30E+11	[62]
Lead	2,000,000,000	85,000,000	[62]
Magnesium	N/A	N/A	
Manganese	17,273,000,000	1,500,000,000	[42], [62]
Molybdenum	25,400,000	16,000,000	[62]
Neodymium	62,433,000	16,070,000	[42]
Nickel	300,000,000	95,000,000	[42]
Niobium	N/A	N/A	[62]
Praesodymium	19,847,000	4,718,000	[42]
Selenium	171,000	100,000	[42], [62]
Silicium	N/A	N/A	
Silicon	N/A	N/A	
Silver	1,200,000	550,000	[42], [62]
Tantalum	N/A	N/A	[42], [62]
Tellurium	48,000	32,000	[42]
Terbium	827,000	102,000	[62]
Tin	N/A	4,600,000	[62]
Tungsten	N/A	3,800,000	[62]
Vanadium	63,000,000	24,000,000	[42]
Yttrium	32,329,000	3,120,000	[62]
Zinc	1,900,000,000	250,000,000	[62]
Zirconium	N/A	68,000,000	[62]

ANNEXE M ÉVOLUTION DE LA PUISSANCE MONDIALE INITIALE DU SCÉNARIO RCP 2.6, POUR DIFFÉRENTS SSP

Evolution of the World Cumulated Power Capacity - SSP2-26 MESSAGE-GLOBIOM - Init

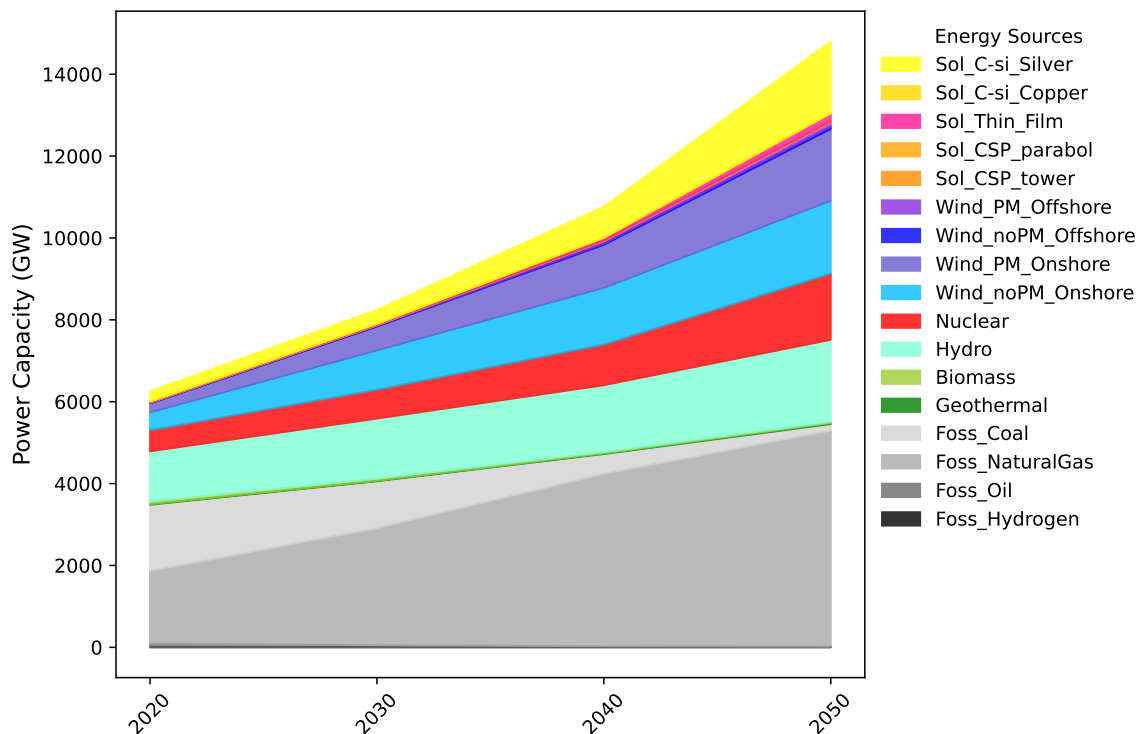


FIGURE M.1 Évolution de la puissance installée cumulée en GW de 2020 à 2050 par source d'énergie. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP2-26 modélisé par MESSAGE-GLOBIOM, après désagrégation des sous-technologies, mais sans ajout de flexibilité au mix technologique. Par souci de visualisation, les sous-technologies solaires à couches fines sont regroupées en une seule catégorie (rose). Les technologies éoliennes sont regroupées selon qu'elles soient terrestres (Onshore, en clair) ou maritimes (Offshore, en foncé), et qu'elles soient construites avec aimant permanent (PM, en violet) ou sans (noPM, en bleu)

Evolution of the World Cumulated Power Capacity - SSP4-26 GCAM4 - Init

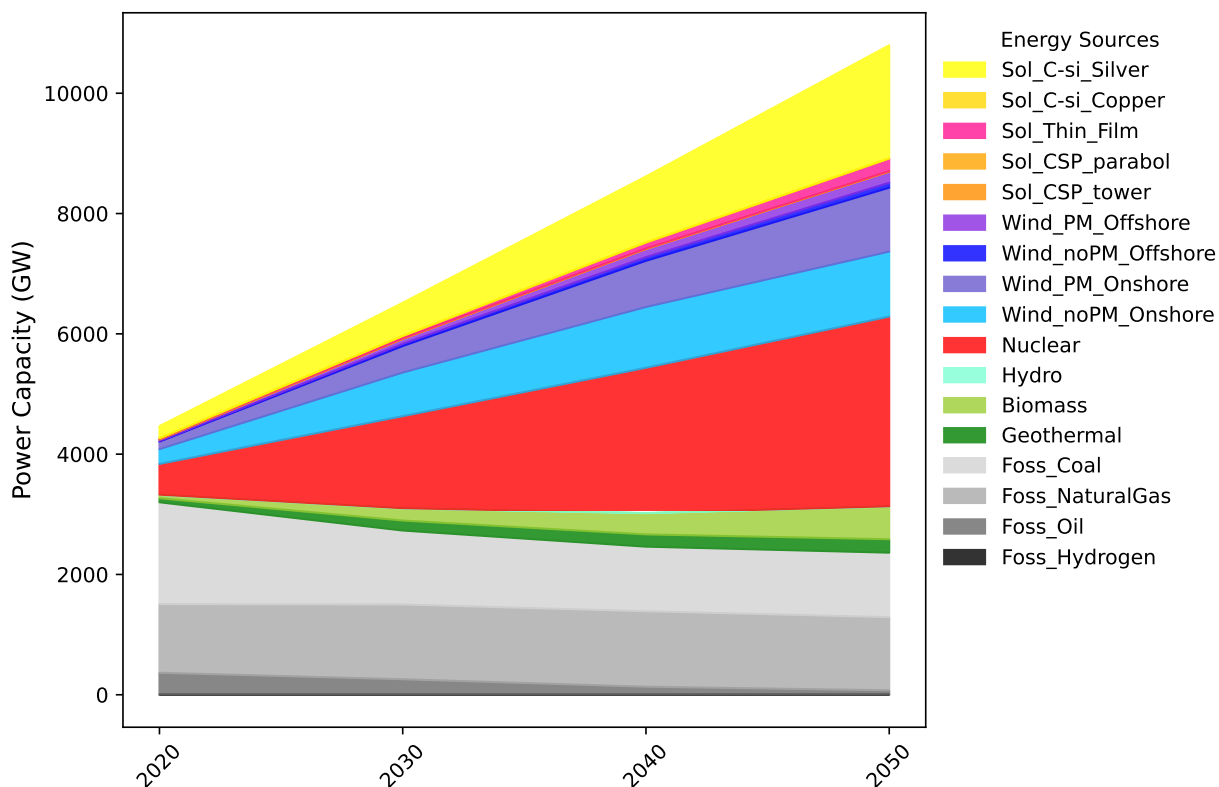


FIGURE M.2 Évolution de la puissance installée cumulée en GW de 2020 à 2050 par source d'énergie. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP4-26 modélisé par GCAM4, après désagrégation des sous-technologies, mais sans ajout de flexibilité au mix technologique. Par souci de visualisation, les sous-technologies solaires à couches fines sont regroupées en une seule catégorie (rose). Les technologies éoliennes sont regroupées selon qu'elles soient terrestres (Onshore, en clair) ou maritimes (Offshore, en foncé), et qu'elles soient construites avec aimant permanent (PM, en violet) ou sans (noPM, en bleu)

Evolution of the World Cumulated Power Capacity - SSP5-26 REMIND-MAGPIE - Init

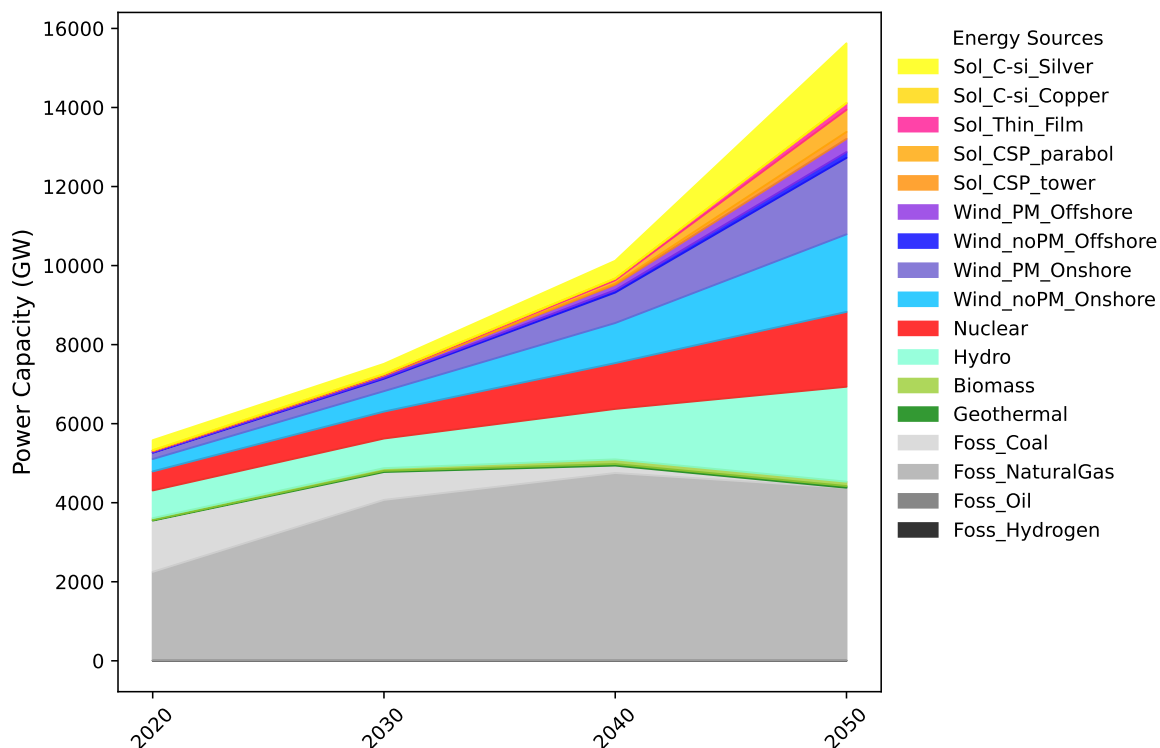


FIGURE M.3 Évolution de la puissance installée cumulée en GW de 2020 à 2050 par source d'énergie. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP5-26 modélisé par REMIND-MAGPIE, après désagrégation des sous-technologies, mais sans ajout de flexibilité au mix technologique. Par souci de visualisation, les sous-technologies solaires à couches fines sont regroupées en une seule catégorie (rose). Les technologies éoliennes sont regroupées selon qu'elles soient terrestres (Onshore, en clair) ou maritimes (Offshore, en foncé), et qu'elles soient construites avec aimant permanent (PM, en violet) ou sans (noPM, en bleu)

ANNEXE N COMPARAISON DE LA DEMANDE CUMULÉE EN MÉTAL DU SCÉNARIO RCP 2.6 AUX RESSOURCES, POUR DIFFÉRENTS SSP

Cumulated consumption of metals in 2050 in tons - Scenario SSP2-26 MESSAGE-GLOBIOM, Alpha = 5

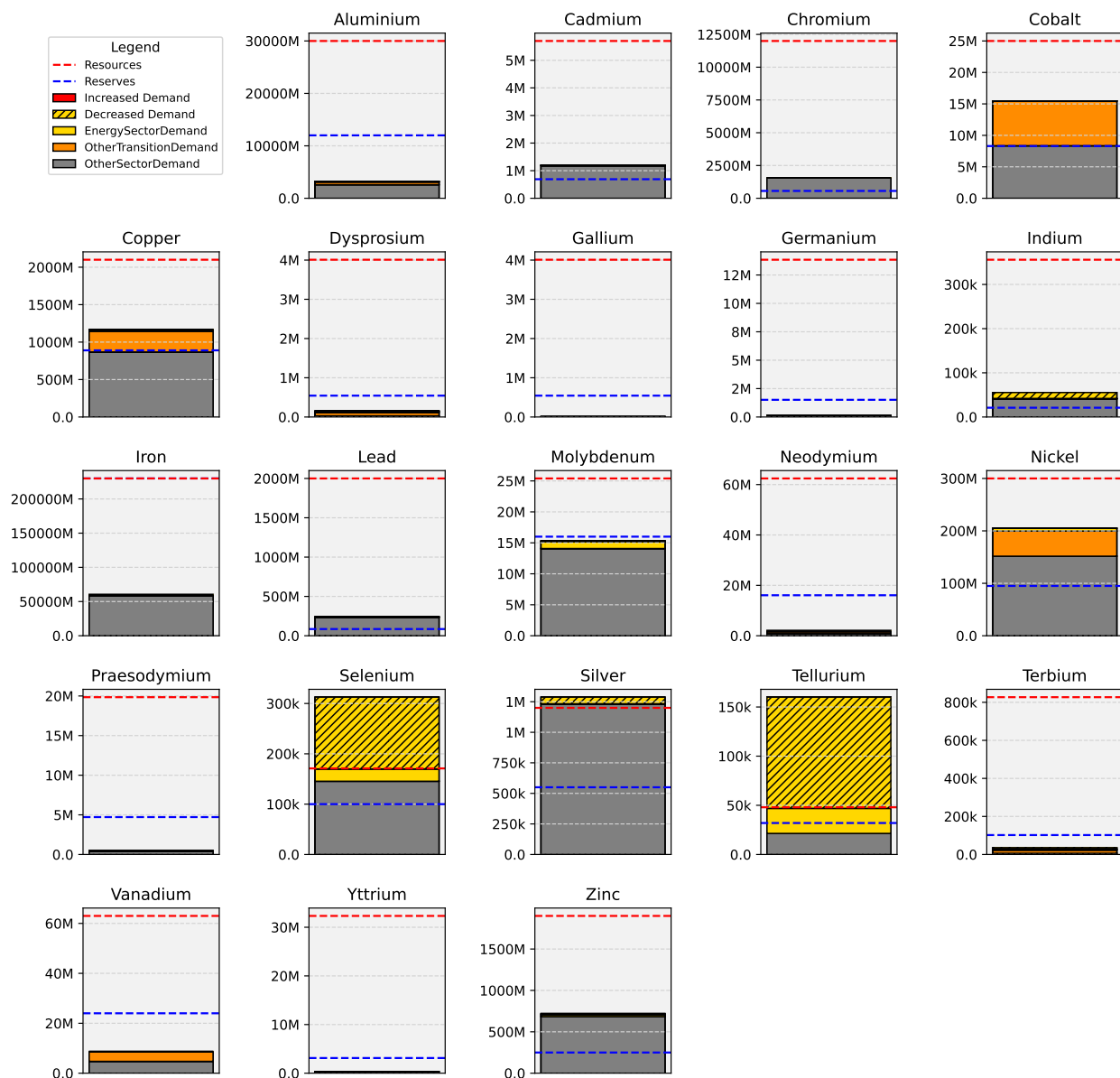


FIGURE N.1 Demande cumulée en tonnes par métaux en 2050 nécessaires à la transition énergétique, divisée par secteur, et comparée aux réserves et aux ressources. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP2-26 modélisé par MESSAGE-GLOBIOM, avec un alpha de 5.

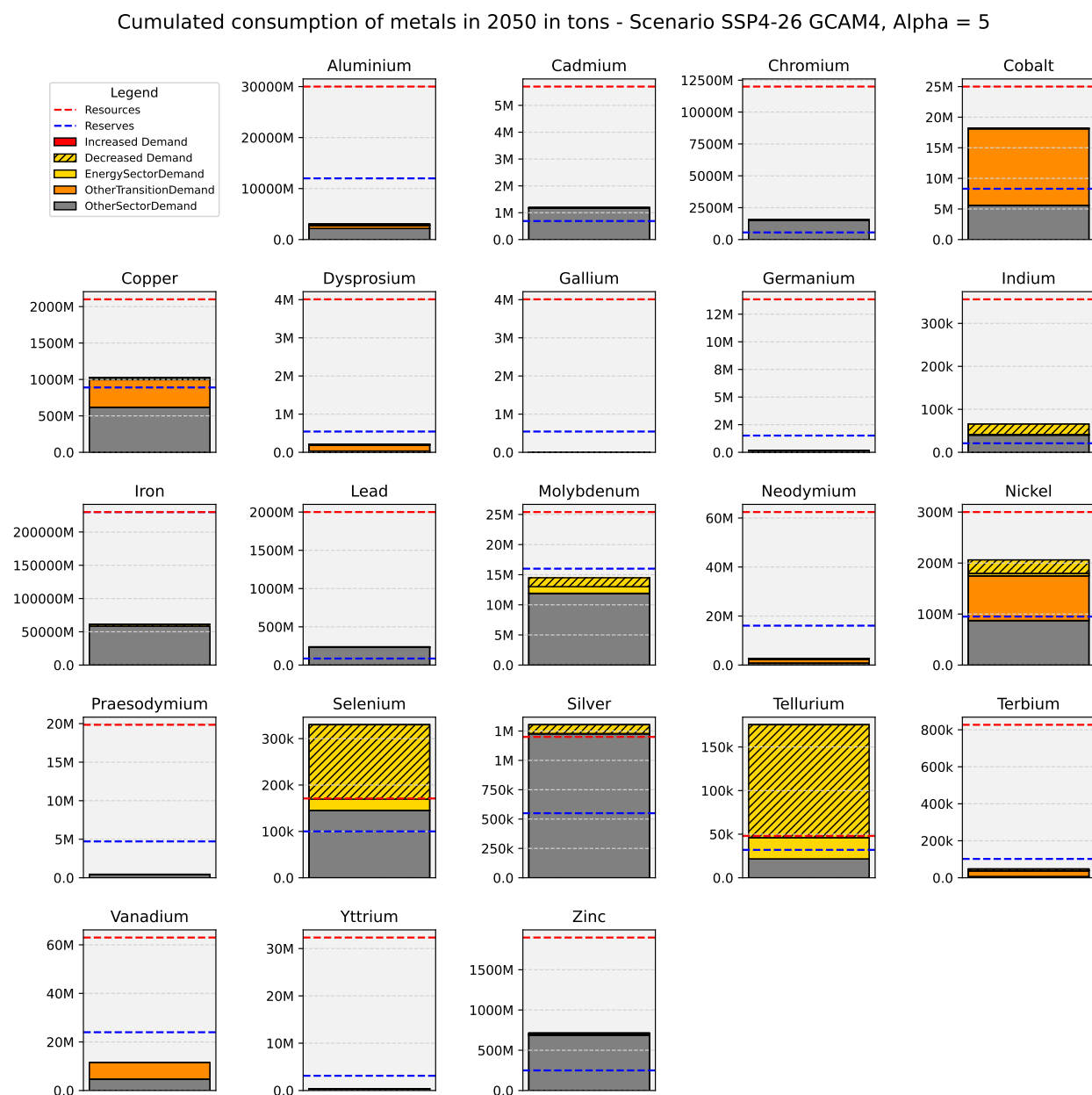


FIGURE N.2 Demande cumulée en tonnes par métaux en 2050 nécessaires à la transition énergétique, divisée par secteur, et comparée aux réserves et aux ressources. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP4-26 modélisé par GCAM4, avec un alpha de 5

Cumulated consumption of metals in 2050 in tons - Scenario SSP5-26 REMIND-MAGPIE, Alpha = 5

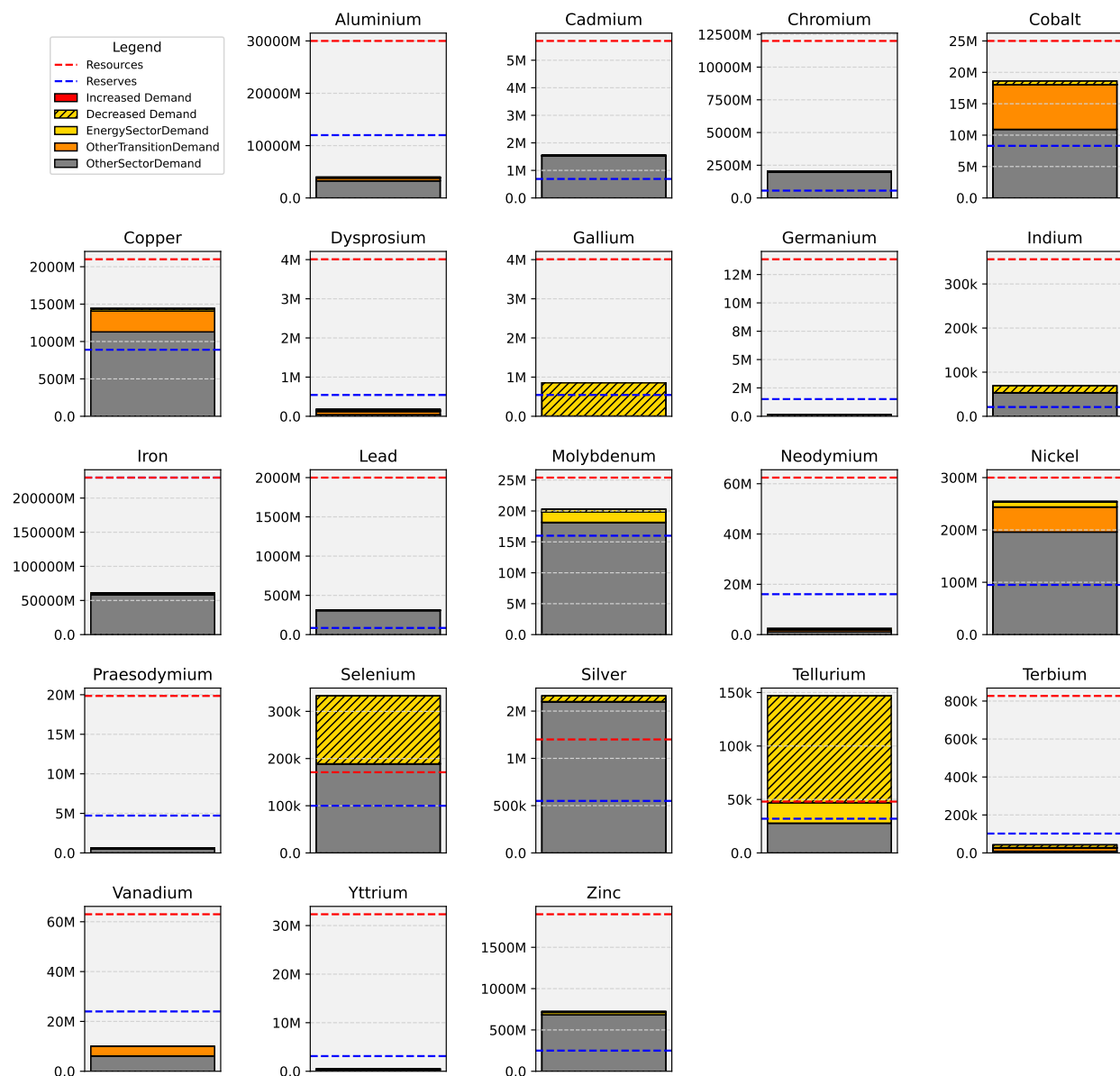


FIGURE N.3 Demande cumulée en tonnes par métaux en 2050 nécessaires à la transition énergétique, divisée par secteur, et comparée aux réserves et aux ressources. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP5-26 modélisé par REMIND MAGPIE, avec un alpha de 5

ANNEXE O COMPARAISON DE LA DEMANDE ANNUELLE EN MÉTAL DU SCÉNARIO RCP 2.6 À LA PRODUCTION, POUR DIFFÉRENTS SSP

Future metal consumption and potential production in t/year - Scenario SSP2-26 MESSAGE-GLOBIOM, Alpha = 5

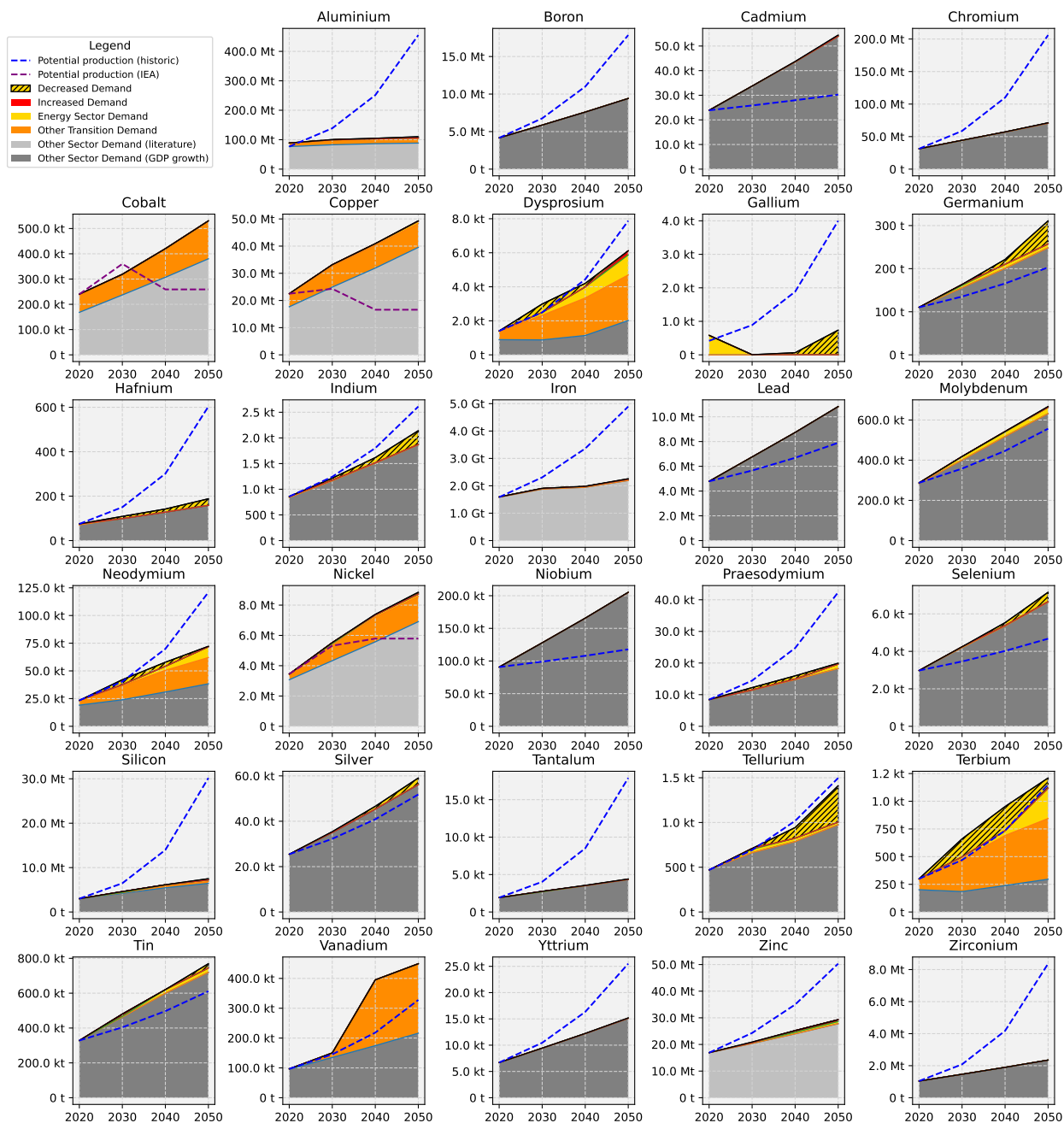


FIGURE O.1 Demande annuelle par métaux en tonnes par an de 2020 à 2050 nécessaire à la transition énergétique comparée au potentiel de production annuelle. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP2-26 modélisé par MESSAGE-GLOBIOM, avec un alpha de 5.

Future metal consumption and potential production in t/year - Scenario SSP4-26 GCAM4, Alpha = 5

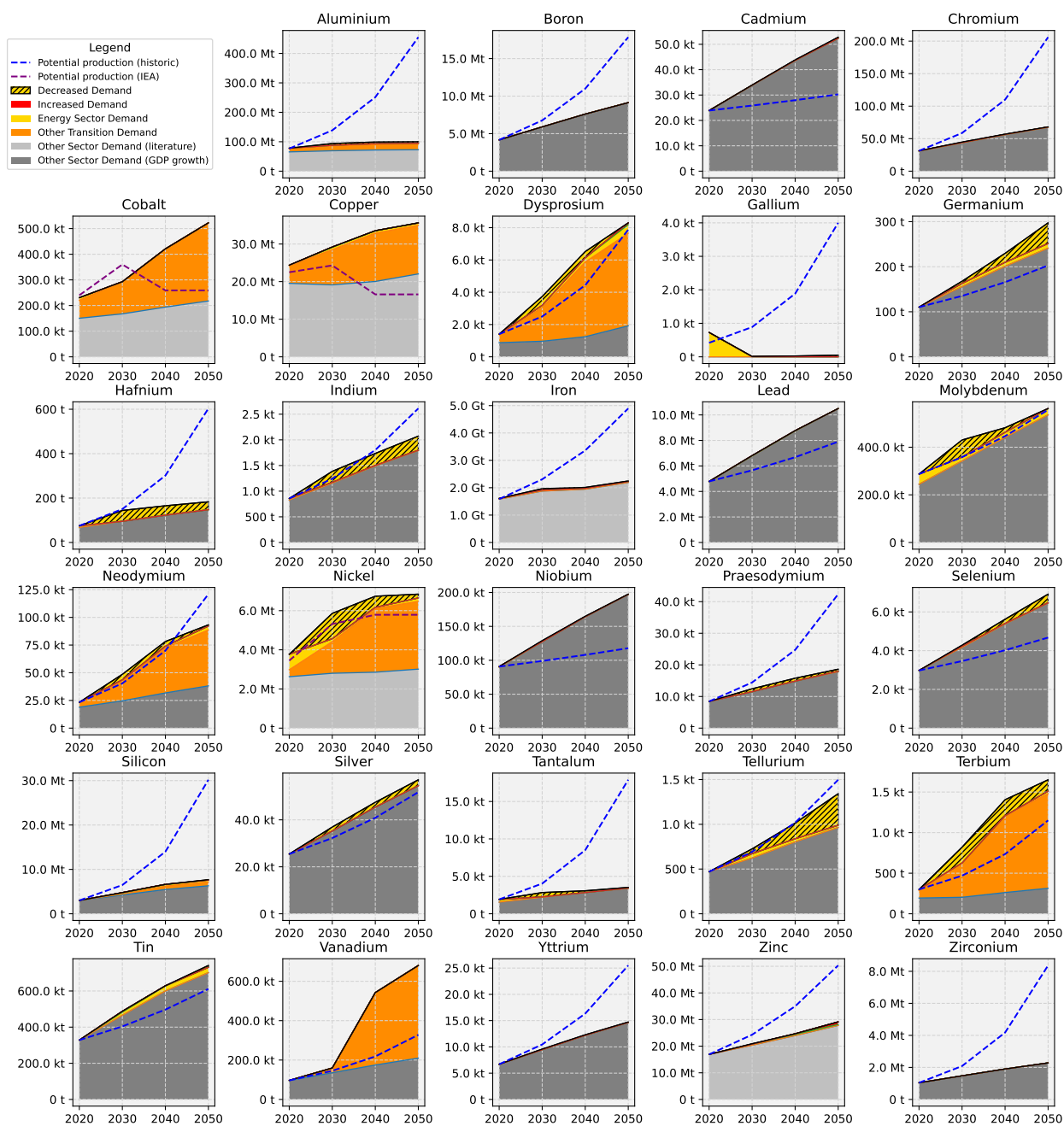


FIGURE O.2 Demande annuelle par métaux en tonnes par an de 2020 à 2050 nécessaire à la transition énergétique, divisée par secteur, comparée au potentiel de production annuelle. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP4-26 modélisé par GCAM4, avec un alpha de 5.

Future metal consumption and potential production in t/year - Scenario SSP5-26 REMIND-MAGPIE, Alpha = 5

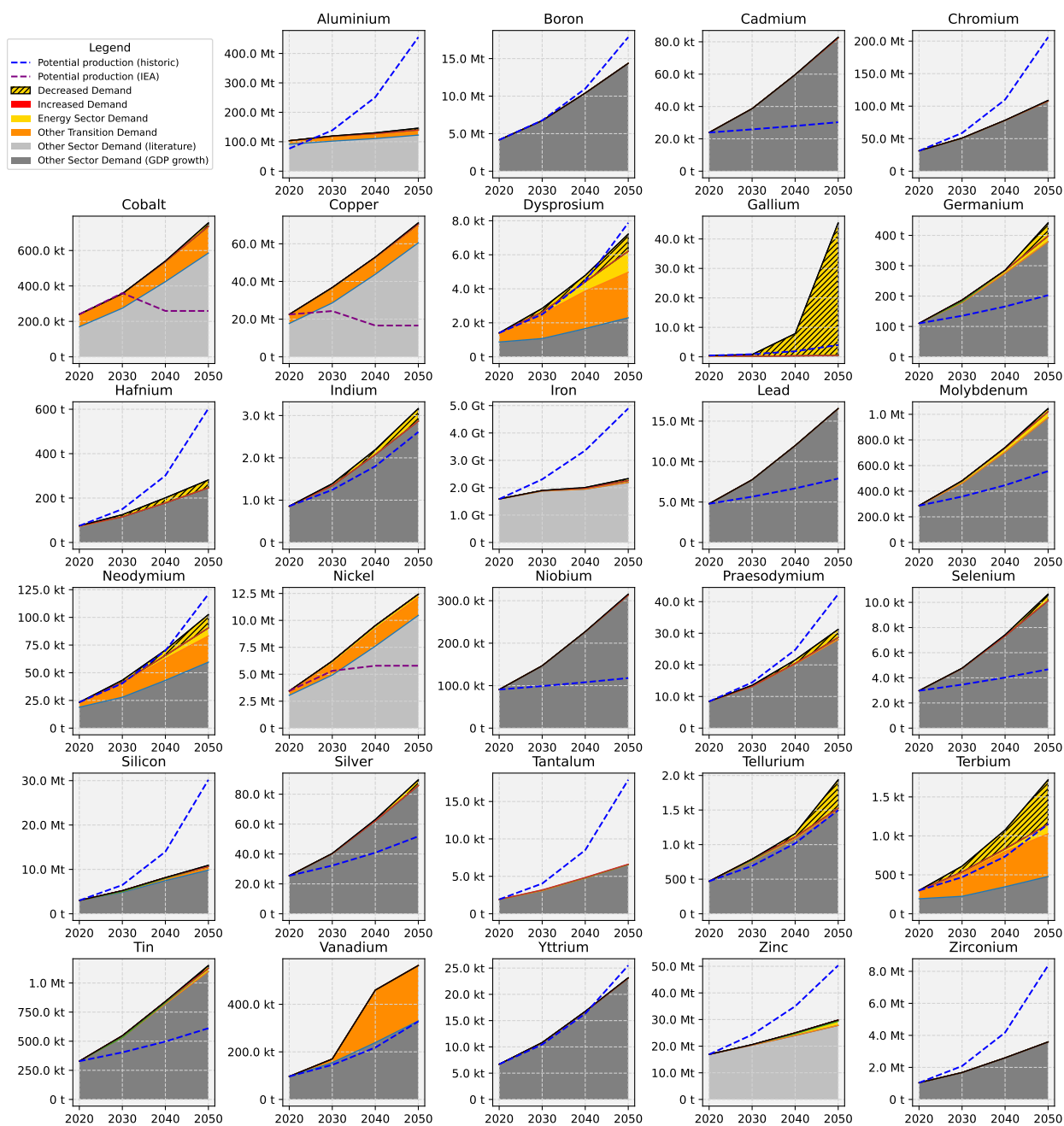


FIGURE O.3 Demande annuelle par métaux en tonnes par an de 2020 à 2050 nécessaire à la transition énergétique, divisée par secteur, comparée au potentiel de production annuelle. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP1-26 modélisé par REMIND-MAGPIE, avec un alpha de 5.

ANNEXE P VARIATION DE CAPACITÉS DE PUISSANCE INSTALLÉES PAR TECHNOLOGIE DU RCP 2.6, POUR DIFFÉRENTS SSP

Power variation with initial SSP2-26 MESSAGE-GLOBIOM model after adding technological flexibility

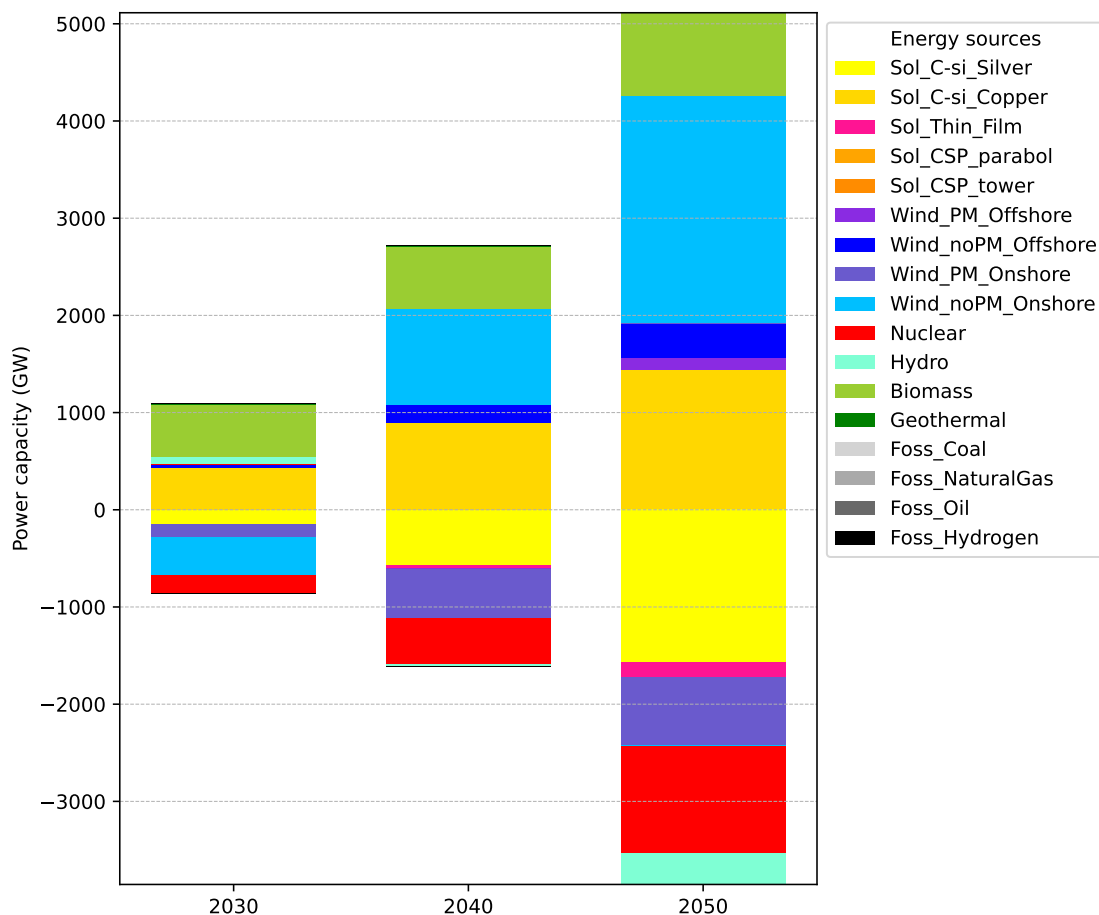


FIGURE P.1 Variation d'installation de capacité de puissances cumulées mondiales en GW, par décennie, entre le scénario IAM initialement à l'étude (SSP2-26 MESSAGE GLOBIOM) et le nouveau mix de puissance généré par le logiciel d'optimisation après ajout de flexibilité au mix technologique. Les technologies dont la valeur se trouve au-dessus de 0 sont celles pour lesquelles l'installation de capacité de puissance a été augmentée, celles en dessous de 0 ont une diminution de leur puissance installée. Pour la facilité de lecture, les technologies solaires à couches fines (thin film, rose), suivant des tendances similaires, ont été agrégées. De même, les technologies éoliennes avec aimant permanent (PM, violet) et sans (noPM, bleu) sont regroupées selon chaque lieu d'installation : terrestre (Onshore, clair) et maritime (Offshore, foncé).

Power variation with initial SSP4-26 GCAM4 model after adding technological flexibility

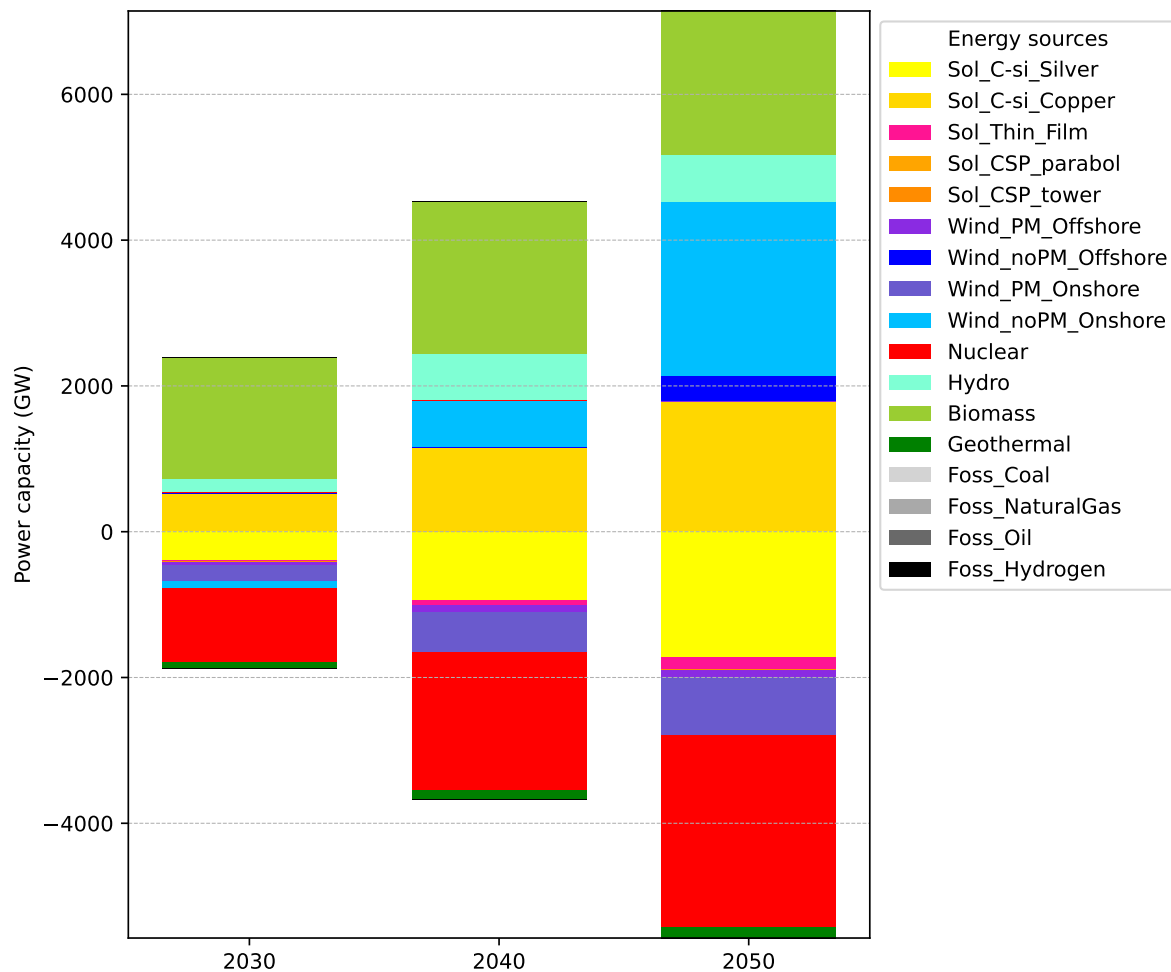


FIGURE P.2 Variation d'installation de capacité de puissances cumulées mondiales en GW, par décennie, entre le scénario IAM initialement à l'étude (SSP4-26 GCAM4) et le nouveau mix de puissance généré par le logiciel après ajout de flexibilité au mix technologique. Les technologies dont la valeur se trouve au-dessus de 0 sont celles pour lesquelles l'installation de capacité de puissance a été augmentée, celles en dessous de 0 ont une diminution de leur puissance installée. Pour la facilité de lecture, les technologies solaires à couches fines (thin film, rose), suivant des tendances similaires, ont été agrégées. De même, les technologies éoliennes avec aimant permanent (PM, violet) et sans (noPM, bleu) sont regroupées selon chaque lieu d'installation : terrestre (Onshore, clair) et maritime (Offshore, foncé).

Power variation with initial SSP5-26 REMIND-MAGPIE model after adding technological flexibility

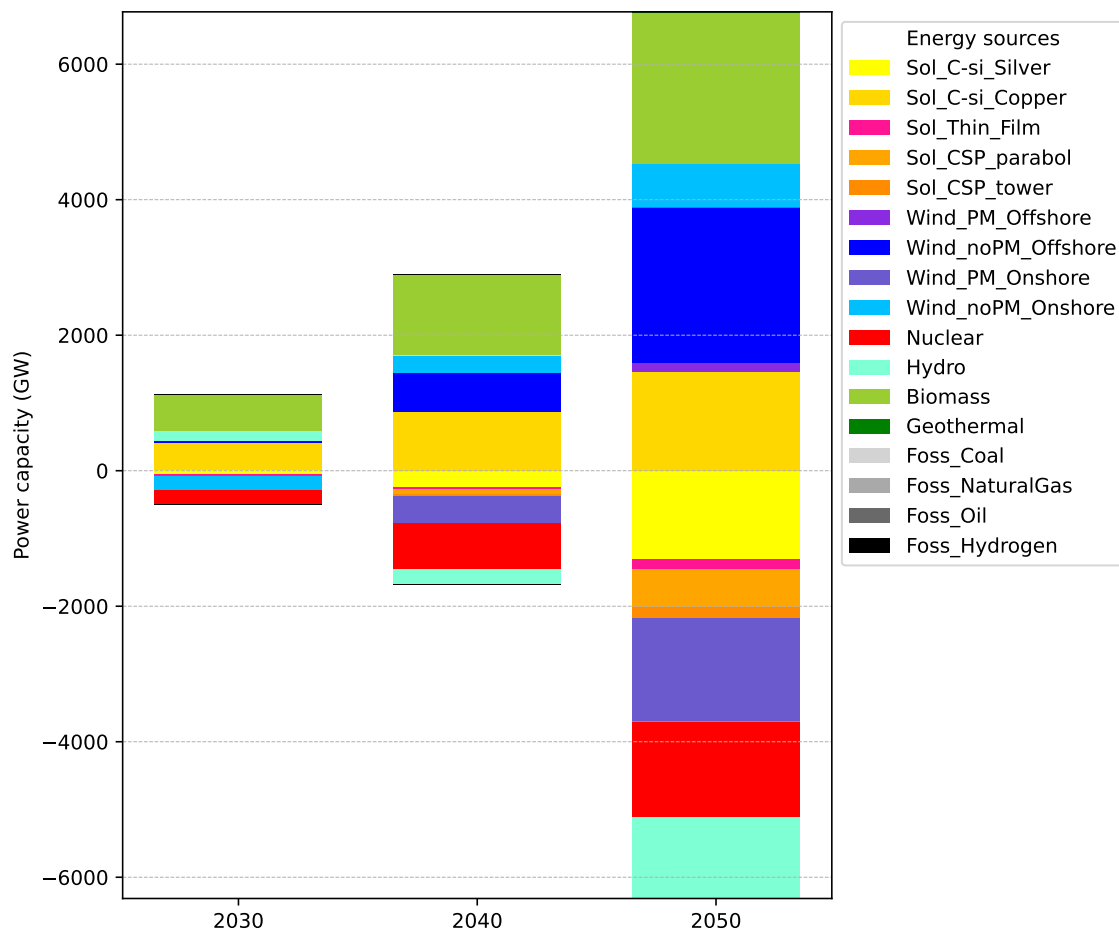


FIGURE P.3 Variation d'installation de capacité de puissances cumulées mondiales en GW, par décennie, entre le scénario IAM initialement à l'étude (SSP5-26 REMIND-MAGPIE) et le nouveau mix de puissance généré par le logiciel après ajout de flexibilité au mix technologique. Les technologies dont la valeur se trouve au-dessus de 0 sont celles pour lesquelles l'installation de capacité de puissance a été augmentée, celles en dessous de 0 ont une diminution de leur puissance installée. Pour la facilité de lecture, les technologies solaires à couches fines (thin film, rose), suivant des tendances similaires, ont été agrégées. De même, les technologies éoliennes avec aimant permanent (PM, violet) et sans (noPM, bleu) sont regroupées selon chaque lieu d'installation : terrestre (Onshore, clair) et maritime (Offshore, foncé).

ANNEXE Q ÉVOLUTION DE LA PUISSANCE MONDIALE OPTIMISÉE DU SCÉNARIO RCP 2.6, POUR DIFFÉRENTS SSP

Evolution of the World Cumulated Power Capacity - SSP2-26 MESSAGE-GLOBIOM - Opti

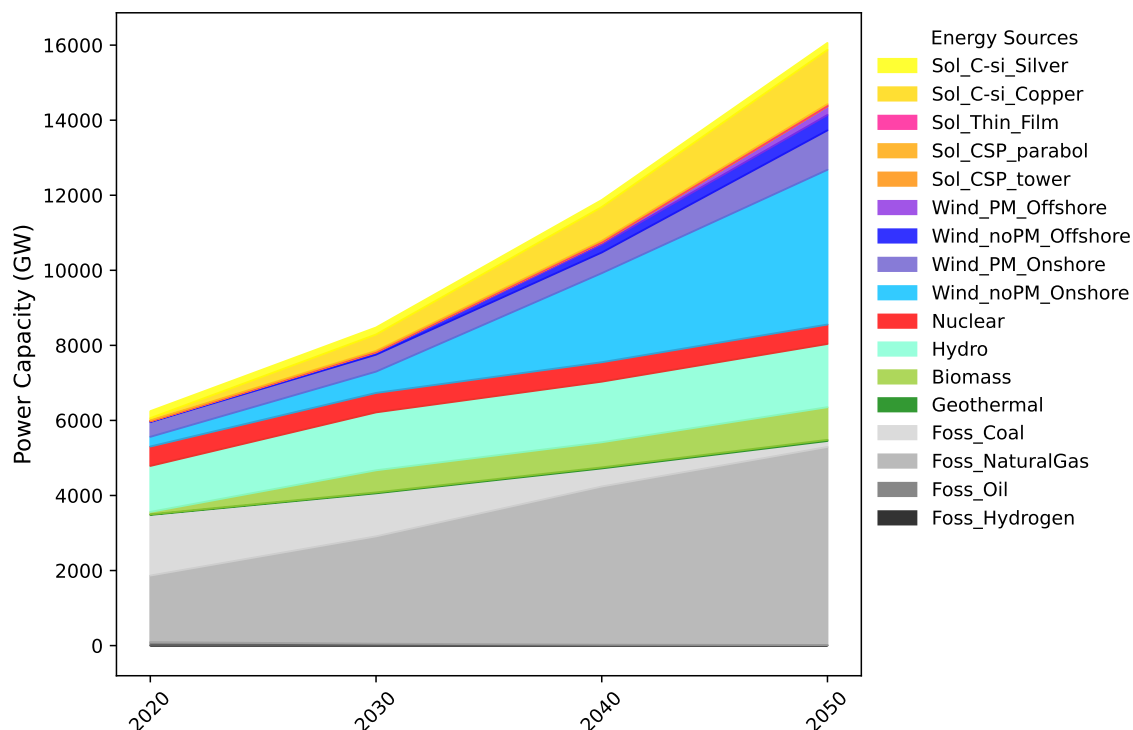


FIGURE Q.1 Évolution de la puissance installée cumulée en GW de 2020 à 2050 par source d'énergie. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP2-26 modélisé par MESSAGE-GLOBIOM, après désagrégation des sous-technologies et ajout de flexibilité au mix technologique. Par souci de visualisation, les sous-technologies solaires à couches fines sont regroupées en une seule catégorie (rose). Les technologies éoliennes sont regroupées selon qu'elles soient terrestres (Onshore, en clair) ou maritimes (Offshore, en foncé), et qu'elles soient construites avec aimant permanent (PM, en violet) ou sans (noPM, en bleu)

Evolution of the World Cumulated Power Capacity - SSP4-26 GCAM4 - Opti

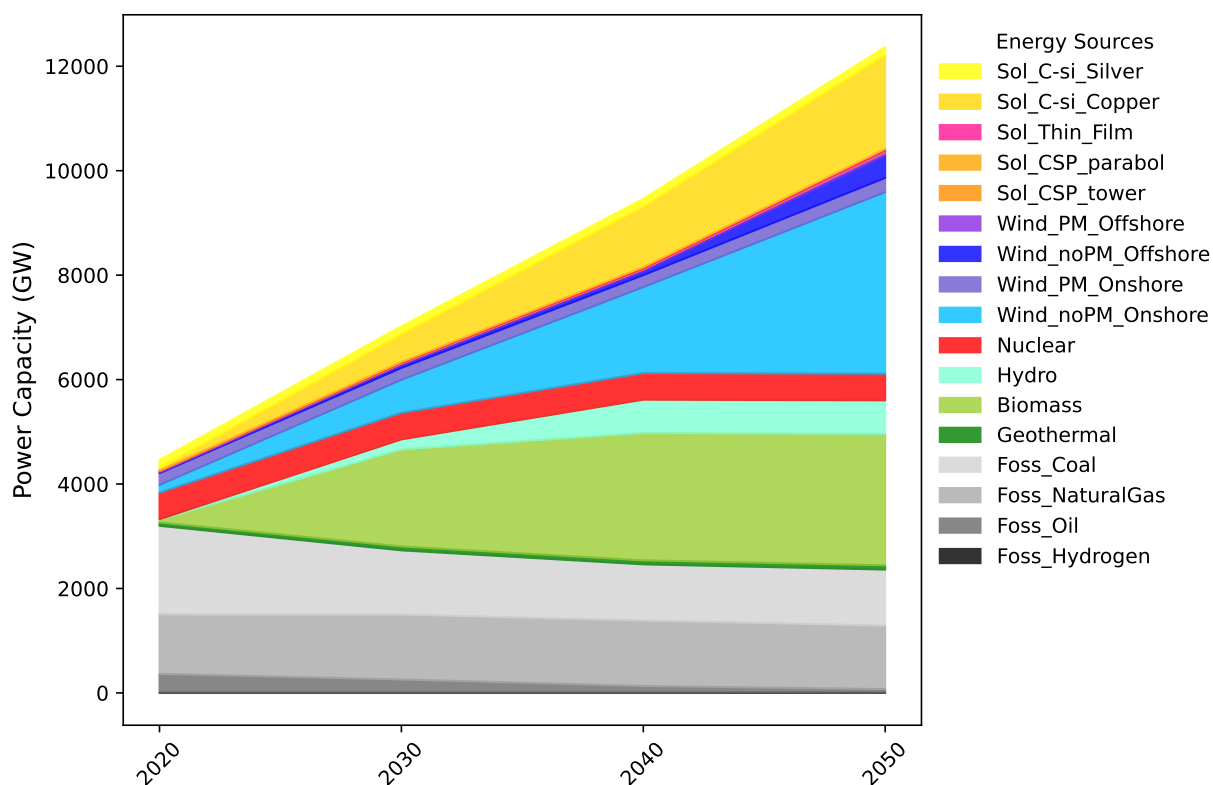


FIGURE Q.2 Évolution de la puissance installée cumulée en GW de 2020 à 2050 par source d'énergie. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP4-26 modélisé par GCAM4, après désagrégation des sous-technologies et ajout de flexibilité au mix technologique. Par souci de visualisation, les sous-technologies solaires à couches fines sont regroupées en une seule catégorie (rose). Les technologies éoliennes sont regroupées selon qu'elles soient terrestres (Onshore, en clair) ou maritimes (Offshore, en foncé), et qu'elles soient construites avec aimant permanent (PM, en violet) ou sans (noPM, en bleu)

Evolution of the World Cumulated Power Capacity - SSP5-26 REMIND-MAGPIE - Opti

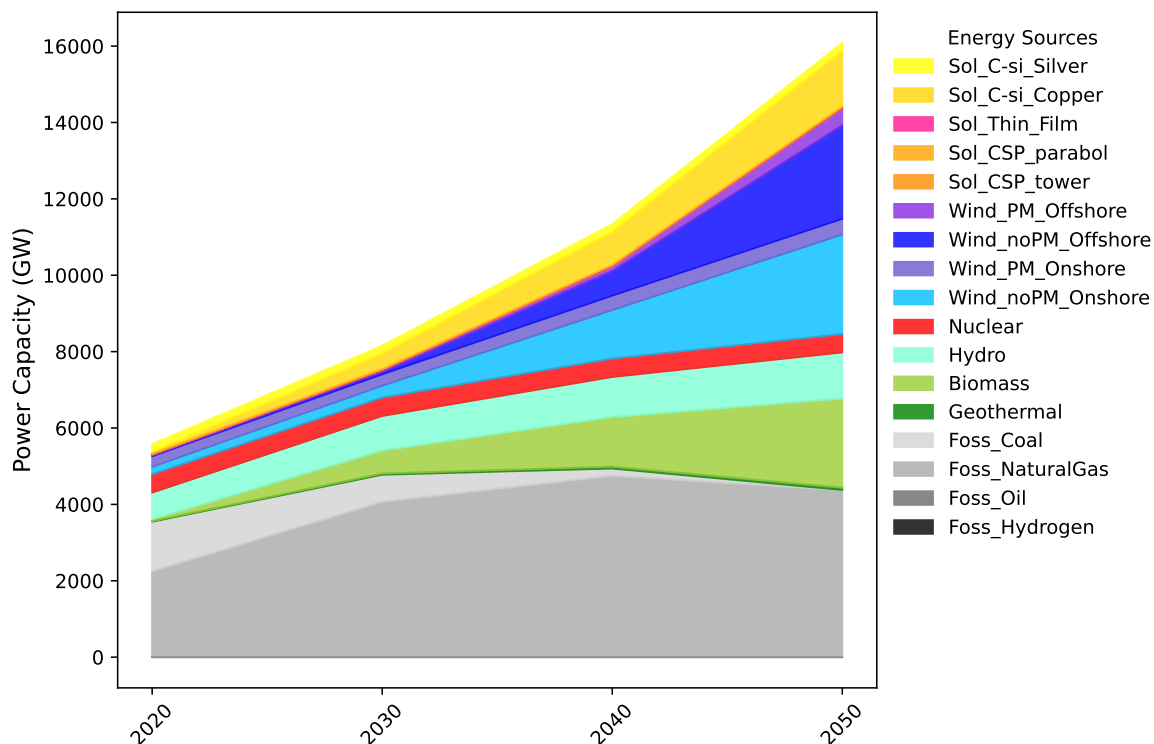


FIGURE Q.3 Évolution de la puissance installée cumulée en GW de 2020 à 2050 par source d'énergie. Résultats s'appuyant sur les données du scénario SSP5-26 modélisé par REMIND-MAGPIE, après désagrégation des sous-technologies et ajout de flexibilité au mix technologique. Par souci de visualisation, les sous-technologies solaires à couches fines sont regroupées en une seule catégorie (rose). Les technologies éoliennes sont regroupées selon qu'elles soient terrestres (Onshore, en clair) ou maritimes (Offshore, en foncé), et qu'elles soient construites avec aimant permanent (PM, en violet) ou sans (noPM, en bleu)