



HAL
open science

Conception d'une méthodologie de gestion des risques liés à l'approvisionnement des métaux

Lamia Mouloudi

► **To cite this version:**

Lamia Mouloudi. Conception d'une méthodologie de gestion des risques liés à l'approvisionnement des métaux. Gestion et management. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2023. Français. NNT : 2023GRALG012 . tel-04861166

HAL Id: tel-04861166

<https://theses.hal.science/tel-04861166v1>

Submitted on 2 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École doctorale : EDSG- Sciences de gestion

Spécialité : Sciences de Gestion

Unité de recherche : Centre d'Etudes et de Recherches appliquées à la gestion

Conception d'une méthodologie de gestion des risques liés à l'approvisionnement des métaux

Development of a Risk Management Methodology for the Supply of Metals

Présentée par :

Lamia MOULOUDI

Direction de thèse :

Karine SAMUEL

PROFESSEURE DES UNIVERSITES, UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Directrice de thèse

Rapporteurs :

Valérie BOTTA-GENOULAZ

PROFESSEURE DES UNIVERSITES, INSA LYON

Pierre FENIÈS

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, UNIVERSITE PARIS 2 PANTHEON ASSAS

Thèse soutenue publiquement le **21 décembre 2023**, devant le jury composé de :

Vincent HOVELAQUE,

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, UNIVERSITE DE RENNES

Président

Karine SAMUEL,

PROFESSEURE DES UNIVERSITES, UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Directrice de thèse

Valérie BOTTA-GENOULAZ,

PROFESSEURE DES UNIVERSITES, INSA LYON

Rapporteuse

Pierre FENIÈS,

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, UNIVERSITE PARIS 2 PANTHEON ASSAS

Rapporteur

Blandine AGERON,

PROFESSEURE DES UNIVERSITES, UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Examinatrice

Antoine BOUBAULT,

INGENIEUR DOCTEUR, BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES

Examineur



Remerciements

Si la thèse implique un travail individuel, elle n'aurait pas vu le jour sans le soutien de ceux qui ont été à mes côtés.

En premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma directrice de thèse, Karine Samuel. Elle m'a offert l'opportunité de réaliser mon rêve de faire une thèse. Tout au long de cette aventure, elle a été à mes côtés, m'apportant écoute, encouragement et soutien. Sa patience, sa compréhension et ses précieux conseils ont été le pilier qui m'a permis d'avancer.

Je souhaite également remercier les membres du projet Need for IoT qui ont financé ma thèse et m'ont offert l'opportunité de faire de la recherche dans le domaine de la gestion des risques. Ils ont également partagé avec moi leur expertise technique. Une mention spéciale à Aurélie Catel pour sa bienveillance, son écoute et sa gentillesse

Mes remerciements vont aux membres de mon laboratoire de recherche, le CERAG, ainsi qu'aux membres de l'atelier Anticipation et Gestion des Risques pour leurs conseils. Une mention spéciale à Florence pour son soutien inestimable, au précédent directeur du laboratoire Radu Burlacu, et aux deux actuelles directrices Annick Valette et Bérangère Deschamps pour leur soutien et disponibilité. Je remercie également les membres de l'école doctorale EDSG pour leur écoute tout au long de ces années.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers les doctorants qui m'ont accompagnée dans cette aventure. Adnan, tu es devenu un véritable ami. Justine, ta joie de vivre et ta bonne humeur ont toujours été une bonne influence. Ernesto, je me souviendrai toujours de nos débats et de notre collaboration fructueuse.

Mes sincères remerciements vont également aux membres du jury, Valérie Botta-Genoulaz, Pierre Feniès, Vincent Hovelaque, Blandine Ageron et Antoine Boubault, qui ont généreusement accepté d'évaluer mon travail.

Je tiens à remercier du fond du cœur ma famille, mes parents Rabah et Nadia, ainsi que mon frère Nacim, pour leur soutien inconditionnel. Malgré la distance géographique, vous avez partagé tous mes moments, vous m'avez écouté me plaindre et vous avez toujours trouvé les bons mots. Je remercie mes amis Faten, Ayoub et Houda. Je suis consciente que je n'étais pas souvent présente, chacun d'entre nous ayant pris des chemins différents dans sa vie, mais notre amitié est restée solide.

Enfin, je remercie tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin et ceux qui prendront le temps de lire ce manuscrit de thèse.

Résumé

Dans un contexte de transformation lié à l'accélération de l'usage des technologies numériques, les métaux jouent un rôle indispensable dans notre société. Cependant, la fiabilité de l'approvisionnement de ces métaux est compromise par des facteurs tels que la complexité, la mondialisation, la perte de visibilité et les questions liées aux activités minières. Dans ce cadre, cette thèse vise à construire une méthodologie de gestion des risques de l'approvisionnement des métaux. Cette construction est basée sur l'exploration de deux domaines de recherche qui sont la gestion des risques dans les chaînes d'approvisionnement (*Supply Chain Risk Management* abrégé SCRM) et la criticité des matières. Ainsi, les résultats des phases exploratoires et la considération des défis liés à ce contexte, ont permis de construire une méthodologie en cinq étapes. Ces étapes sont l'identification des réseaux prioritaires, la cartographie des réseaux, l'estimation et l'évaluation des risques, l'analyse des risques et leur atténuation. En outre, cette méthodologie a été validée grâce à une étude de la chaîne de valeur du semi-conducteur (analyse du processus de conception et de fabrication des plaquettes de silicium). Les contributions de cette thèse viennent compléter le champ du SCRM en proposant une méthodologie adaptée aux industries dépendantes des métaux. En outre, elle permet d'ajouter une nouvelle catégorisation des risques en intégrant le concept de criticité des matières. Sur le plan managérial, la recherche propose un cadre et des outils pour une gestion proactive des risques, de même qu'un cadre pour la cartographie des réseaux et une stratégie d'analyse des risques qui aide à la prise de décisions pour la réduction des risques. Toutefois, cette recherche comporte des limites telles que l'impossibilité de garantir un risque zéro liée au caractère dynamique et à l'imprévisibilité des facteurs externes impactant les réseaux d'approvisionnement.

Mots-clés : gestion des risques, criticité des matières, réseaux d'approvisionnement, industries dépendantes des métaux.

Sommaire

Remerciements	1
Résumé	3
Sommaire	4
1 Introduction générale.....	6
1.1 Cadre de la recherche	6
1.2 Contexte.....	7
1.3 Importance de la recherche.....	11
1.4 Objectif de l'étude	11
1.5 Question de recherche et méthodologie de recherche	12
1.6 Positionnement épistémologique.....	18
1.7 Justification de l'approche de recherche.....	19
1.8 Structure de la thèse.....	20
2 Contextualisation de la recherche.....	23
2.1 Description de la chaîne d'approvisionnement	24
2.2 Description du contexte industriel.....	37
2.3 Le concept de risque et la gestion des risques	48
2.4 Conclusion de la partie N° 1	55
3 Phase Exploratoire sur la gestion des risques dans les chaînes d'approvisionnement	56
3.1 Introduction	56
3.2 Exploration du domaine de la gestion des risques dans les chaînes d'approvisionnement.....	57
3.3 Exploration du SCRM dédiés aux industries qui dépendent des métaux	82
3.4 Conclusion de la deuxième partie.....	96
4 Phase exploratoire relative à l'approvisionnement en métaux.....	98
4.1 Introduction	98
4.2 Exploration des crises liées à l'approvisionnement en métaux	99
4.3 Revue de littérature systématique sur les matières critiques et le concept de criticité 128	
4.4 Conclusion de la partie N°4.....	163
5 Élaboration d'une méthodologie pour la sécurisation de l'approvisionnement des métaux 168	
5.1 Introduction	168
5.2 La perte de visibilité comme obstacle et vecteur pour une approche de gestion des risques.....	170
5.3 La complexité comme vecteur d'approche pour la gestion des risques	183
5.4 Estimation et évaluation des risques.....	193

5.5	Analyse des résultats	201
5.6	Traitement des risques	203
5.7	Proposition d'une méthodologie pour la gestion des risques	205
5.8	Conclusion	208
6	Application de la méthodologie au cas de la fabrication des plaquettes de silicium (Raw wafers).....	210
6.1	Introduction	210
6.2	Etape N° 1 : l'importance des Raw wafers	211
6.3	Etape N° 2 : Cartographie du réseau d'approvisionnement du Raw wafer	218
6.4	Etape N° 3 : Estimation et évaluation des risques	240
6.5	Etape N° 4 : Analyse des risques	249
6.6	Etape N° 5 : Mitigation des risques	260
6.7	Conclusion	261
7	Discussion et conclusion	264
7.1	Rappel de la question de recherche	264
7.2	Synthèse des résultats	264
7.3	Contributions de la recherche	267
7.4	Limites de la recherche.....	269
7.5	Orientation pour les futures recherches	270
	Références	271
	Table des matières	304
	Liste des figures	311
	Liste des tableaux	313
	Annexes.....	315
	Annexe N°1 : Tableau des définitions de la chaîne d'approvisionnement.....	315
	Annexe N°2 : Tableau des catégories de risques liés à la chaîne d'approvisionnement	317
	Annexe N° 3 : Analyse synthétique des contributions de la recherche en SCRM dans les industries qui dépendent des métaux.....	319
	Annexe N°4 : synthèse de la revue de littérature systématique sur domaine de la criticité des matière et matières critiques	325

1 Introduction générale

1.1 Cadre de la recherche

Notre recherche se concentre sur la gestion des risques associés à la chaîne d'approvisionnement de l'industrie électronique, avec une attention particulière donnée à la sécurisation de l'approvisionnement en métaux. Cette recherche a été réalisée dans le cadre du projet intitulé Need for IoT, qui a consisté à développer des méthodes de recherche et des démonstrateurs technologiques avancés pour les objets connectés et leurs composants, en intégrant une analyse économique incluant l'acceptabilité et la durabilité des nouvelles solutions proposées. Cette thèse constitue l'une des contributions du projet dans la mesure où elle a permis aux chercheurs en micro-électronique de prendre en compte la notion de criticité des matières et d'orienter les choix en matière de substitution dès les phases de conception des composants micro-électroniques.

Plus largement, l'objectif de ce projet pluridisciplinaire a été de permettre aux décideurs et aux industriels de comprendre les questions et les besoins économiques, environnementaux, sociaux et techniques, grâce au financement de huit thèses en sciences et technologies et en sciences sociales. Ces thèses ont permis de répondre à des questions de recherche liées aux transformations digitales et en particulier, la prise en considération d'une demande croissante en métaux pour la transition énergétique et numérique.

Les axes de recherche couverts par l'ensemble des thèses du projet sont les suivants :

- les risques liés aux chaînes d'approvisionnement pour les nouveaux dispositifs IoT ;
- la substitution des éléments problématiques par des éléments plus abondants ;
- la récupération des éléments problématiques ;

- la réduction de la consommation d'éléments problématiques pendant le cycle de fabrication ;
- la mise en œuvre des principes physiques de remplacement pour accomplir des fonctions déjà établies en utilisant des approches durables.

Notre recherche a permis de développer des solutions applicables et actionnables dans le cadre complexe de l'industrie du semi-conducteur, afin de contribuer à réduire les risques liés à l'approvisionnement en métaux.

1.2 Contexte

Afin de mieux comprendre la portée de nos recherches, il est essentiel de présenter le contexte dans lequel les chaînes d'approvisionnement évoluent actuellement.

1.2.1 Les chaînes d'approvisionnement aujourd'hui

La chaîne d'approvisionnement est un élément indispensable de notre vie quotidienne. Elle garantit la disponibilité et l'accessibilité de divers biens et services. Toutefois, en raison de la mondialisation et de l'externalisation des activités de l'entreprise, cette chaîne d'approvisionnement est devenue plus complexe (Son and Orchard, 2013), moins visible et plus vulnérable. C'est-à-dire que les sources et les facteurs de risque peuvent l'emporter sur les stratégies d'atténuation des risques, ce qui entraîne des conséquences négatives pour la chaîne d'approvisionnement (Sinrat and Atthirawong, 2013).

Plusieurs facteurs font en sorte que la chaîne d'approvisionnement soit vulnérable. Le premier est le caractère complexe, hostile, dynamique et incertain de l'environnement extérieur de l'entreprise (Ageron and Spalanzani, 2010). C'est cet environnement qui génère des risques perturbant ou interrompant le flux des matières et d'informations (Samuel, 2013). Le second est la matérialisation de ces risques avec des conséquences importantes pour les entreprises, comme le montrent les exemples suivants :

- Le tremblement de terre au Japon en 2011 a sévèrement affecté le constructeur automobile Nissan, car 12 % des moteurs de la société ont été achetés dans la zone sismique (Merzifonluoglu, 2015).
- L'incendie à l'usine de semi-conducteurs du fournisseur au Nouveau-Mexique, qui a causé à Ericsson une perte de 400 millions d'euros en 2000 à cause de la perturbation de la chaîne d'approvisionnement (Vanany et al., 2009).
- Les inondations catastrophiques d'octobre 2011 en Thaïlande ont affecté les chaînes d'approvisionnement des fabricants d'ordinateurs et des entreprises automobiles qui avaient des usines en Thaïlande (Chopra and Sodhi, 2004 ; Ho et al., 2015a).
- Plus récemment, la crise de la COVID-19 a impacté le monde en causant des perturbations dans la demande de produits et l'approvisionnement en matières premières. Selon (Kraemer et al., 2020), c'est une crise unique, car elle a impacté presque toutes les industries.

Ainsi, des catastrophes naturelles, des pandémies globales ainsi que d'autres perturbations dans les chaînes d'approvisionnement peuvent entraîner des conséquences dévastatrices pour différentes chaînes d'approvisionnement.

Les chaînes d'approvisionnement sont importantes dans tous les secteurs. Néanmoins, elles revêtent une importance particulière dans l'industrie électronique.

1.2.2 Importance de l'industrie électronique

Aujourd'hui, la société se trouve dans la troisième révolution technologique, dans laquelle l'industrie électronique joue un rôle stratégique. En effet, notre ère est dominée par les technologies de l'information et de la communication (TIC). Ces technologies, ainsi que les objets qui y sont associés comme les semi-conducteurs, l'Internet et les IoT, ont transformé le quotidien de la société, en modifiant les modes de communication, l'accès à l'information,

l'éducation, les loisirs, la mobilité, etc. Au niveau industriel, ces technologies ont contribué à l'automatisation et à l'optimisation des systèmes de production dans plusieurs secteurs industriels (fabrication, santé, militaires, etc.). De plus, elles fournissent aux entreprises des opportunités pour innover dans leur gamme de produits et de services.

Les TIC font appel à des composants électroniques pour le traitement et la transmission de l'information. De ce fait, l'industrie électronique est non seulement un secteur en soi, mais aussi un tremplin pour d'autres domaines industriels. Par ailleurs, ces innovations ont un effet boule de neige et stimulent l'innovation dans d'autres secteurs.

Par ailleurs, l'ère actuelle est caractérisée par une sensibilisation accrue aux enjeux environnementaux et par une orientation stratégique des politiques publiques vers la durabilité (Erdmann and Graedel, 2011). Ceci a conduit à l'émergence de la production d'énergie à faibles émissions de carbone et de nouvelles industries, comme l'industrie des énergies renouvelables. Ces industries utilisent les technologies électroniques pour produire de l'énergie provenant de sources renouvelables, comme l'énergie solaire et l'énergie éolienne.

L'industrie électronique est plus qu'un secteur industriel, elle est un levier de transformation industrielle et sociétale. Du déploiement des TIC à l'émergence de nouvelles industries, elle est la colonne vertébrale et soutient l'innovation et l'optimisation d'autres industries. Ainsi, elle est un maillon de la chaîne d'approvisionnement de plusieurs industries.

Toutefois, cette importance s'accompagne de vulnérabilités spécifiques, notamment en ce qui concerne l'approvisionnement en métaux

1.2.3 Vulnérabilités liées à l'approvisionnement en métaux

L'industrie électronique est une industrie stratégique. En se focalisant sur la phase d'approvisionnement, on constate que cette industrie dépend de métaux comme le tantale, le cuivre, l'argent, l'indium, le zinc, le silicium, le silicium, le cobalt et bien d'autres. De ce fait,

elle hérite des défis que présentent les contraintes des activités minières. De plus, elle est soumise aux contraintes associées aux phases de transformation des métaux en ressources utilisables. En effet, avant d'être utilisés en tant que produits, les métaux subissent un long processus de transformation allant de l'extraction à la production. Cette transformation nécessite plusieurs étapes dispersées géographiquement. Ainsi, ces contraintes peuvent être résumées comme suit.

- Des contraintes d'ordre réglementaire, comme des réglementations environnementales et sociales pouvant limiter l'extraction des métaux, d'ordre environnemental comme l'impact environnemental des activités minières et d'ordre technique comme la complexité des processus d'extraction difficiles à mettre en œuvre.
- Des pressions sur la demande en ressources car le développement technologique de l'électronique accroît le nombre de métaux utilisés au point de solliciter presque tous les éléments du tableau périodique (Erdmann and Graedel, 2011). De plus, la croissance démographique et l'amélioration des niveaux de vie accentuent la pression sur les ressources métalliques (Saint-Aubin, 2019).
- Les métaux sont des ressources non renouvelables extraites dans différentes régions du monde (Sievers et Tercero, 2012), ce qui constitue en soi un risque de pénurie. Par exemple, l'état actuel des réserves est de 18 ans pour le chrome, 20 ans pour l'étain, 30 ans pour le nickel, 33 ans pour le manganèse, 38 ans pour le cuivre, 60 ans pour le cobalt (Saint-Aubin, 2019).
- Les métaux sont dans certains cas des sous-produits dont la production est tributaire d'autres métaux. C'est le cas de l'indium qui est un sous-produit du zinc (Achzet and Helbig, 2013).

- La concentration de la production de métaux procure un pouvoir au pays détenteur, qui pourrait l'exercer sous forme de restrictions à l'exportation. Par exemple, le cas de la Chine qui détient 95 % des terres rares et a restreint les exportations de cette ressource vers le Japon en 2010 en réponse à un problème géopolitique (He, 2018).

1.3 Importance de la recherche

Dans le contexte actuel, l'industrie électronique et les industries qui dépendent des métaux font face à une série d'incertitudes quant à la fiabilité de l'approvisionnement en métaux. Ces incertitudes sont dues à des facteurs tels que la mondialisation, l'accroissement de la complexité des chaînes d'approvisionnement, la réduction de la visibilité et les enjeux spécifiques liés à l'extraction minière.

Dans ce cas, une perturbation dans l'approvisionnement des métaux engendrerait des conséquences en cascade, avec des répercussions bien au-delà de l'industrie électronique, impactant un ensemble de secteurs industriels qui s'étendent des secteurs de l'automobile et de la santé jusqu'aux communications et aux énergies renouvelables.

Dans ce contexte, la recherche devient un outil essentiel pour sécuriser l'approvisionnement des métaux. C'est précisément là que notre thèse se positionne. Elle aspire à fournir des outils et une méthodologie permettant aux entreprises de passer d'une gestion réactive des risques liés à l'approvisionnement en métaux à une gestion proactive. Ce changement de posture est essentiel pour anticiper les problèmes potentiels plutôt que de chercher des solutions après coup. Ainsi, notre travail contribue à fournir des outils et méthodes pour sécuriser les chaînes d'approvisionnement en métaux.

1.4 Objectif de l'étude

L'objectif de cette recherche est de construire une méthodologie de gestion des risques adaptée à la sécurisation de l'approvisionnement en métaux pour l'industrie électronique et pour les

industries qui en dépendent. Cette méthodologie cherchera à anticiper et à gérer efficacement les risques et les incertitudes découlant de la mondialisation, de la complexité croissante et du manque de visibilité, afin de garantir un approvisionnement fiable en matières premières. Ce travail aspire à combler une lacune dans les méthodologies de gestion des risques existantes en fournissant une approche scientifiquement robuste.

1.5 Question de recherche et méthodologie de recherche

La question fondamentale que cette thèse cherche à adresser est la suivante :

" Comment développer une méthodologie efficace pour sécuriser l'approvisionnement des industries qui dépendent des métaux, tout en intégrant les contraintes associées à la complexité, la mondialisation, la perte de visibilité dans le réseau d'approvisionnement, ainsi qu'aux activités minières et aux processus de transformation des métaux ? "

Pour répondre à cette question de recherche complexe et multidisciplinaire, notre étude adoptera une approche exploratoire axée sur deux objectifs principaux :

- identification des opportunités : chaque phase exploratoire vise à identifier des opportunités à intégrer dans la conception de la méthodologie. Les opportunités seront identifiées comme telles si elles peuvent prendre en compte les contraintes d'approvisionnement des métaux.
- identification des verrous scientifiques : les phases exploratoires visent également à souligner les lacunes dans la littérature existante ou dans les méthodologies actuelles, qui seront soit comblées, soit non prises en compte.

Notre démarche de recherche est composée de trois phases exploratoires permettant de recueillir l'ensemble des données nécessaires à la construction de la méthodologie. Ces données seront collectées sous forme de connaissances théoriques, d'outils et de processus qui seront pris en compte pour la construction de la méthodologie. Le but sera que la méthodologie permette aux

entreprises et aux décideurs de mieux comprendre leur contexte et ainsi améliorer leur gestion des risques et des incertitudes. Voir la figure N° 1.

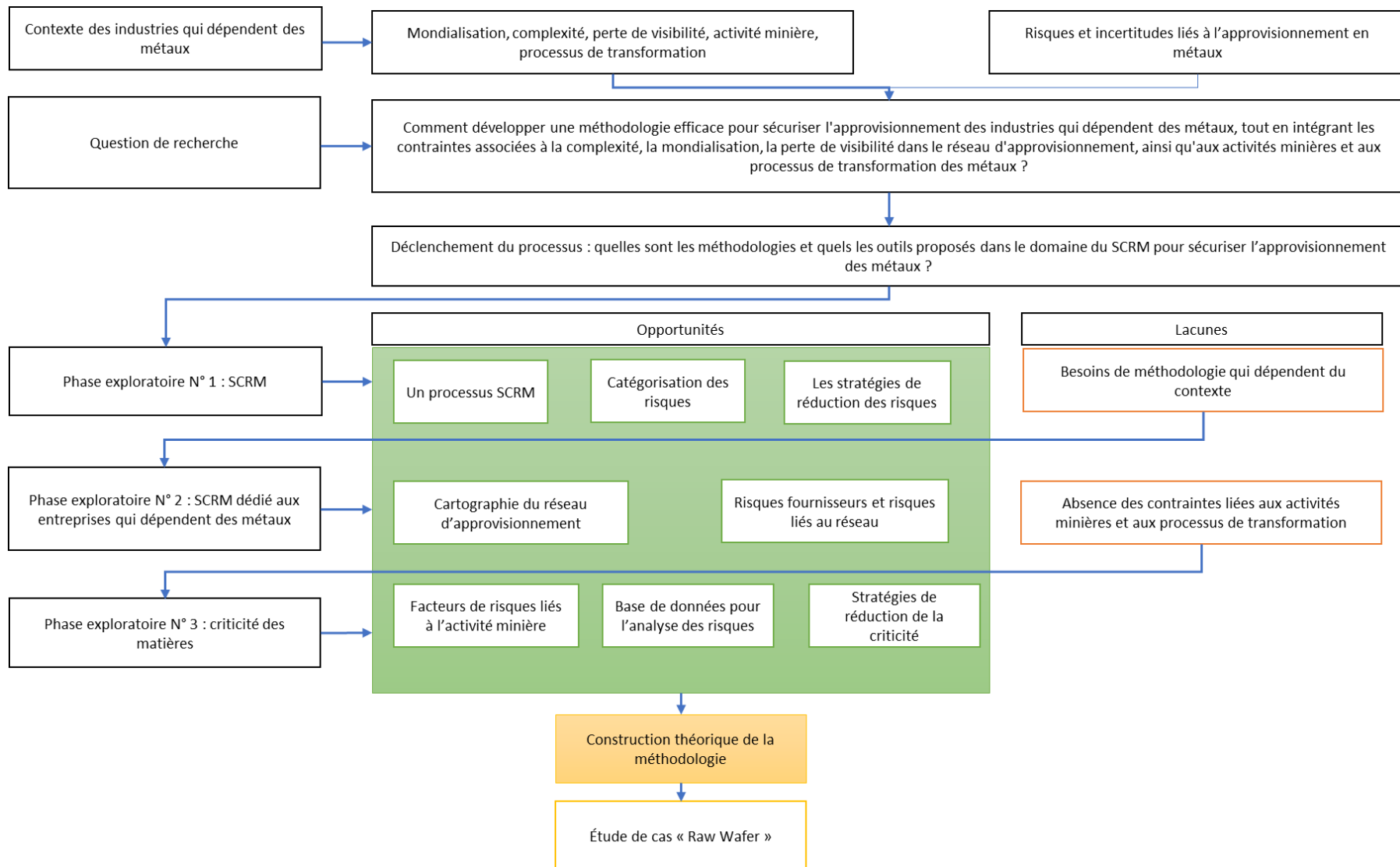


Figure 1 : Processus de recherche de la thèse

- Phase exploratoire N° 1

Le processus de recherche est déclenché par la première sous-question : Quelles sont les méthodologies et les outils proposés dans le domaine du SCRM pour sécuriser l’approvisionnement des métaux, en intégrant l’ensemble des défis tels que la mondialisation, la complexité, la perte de visibilité, et les contraintes liées aux activités minières et aux processus de transformation ?

Afin de répondre à cette question de recherche, nous avons collecté des revues de littérature, systématiques et non systématiques, publiées entre 2003 et 2020. Ainsi, cette collecte a abouti à un corpus documentaire composé de 19 articles traitant du SCRM. Les résultats de cette analyse ont révélé l'existence d'un processus de gestion des risques en cinq étapes, considéré comme la colonne vertébrale de cette gestion. Ils ont également mis en lumière une classification des différents types de risques et des stratégies de réduction des risques. Cependant, cette étude a aussi souligné l'importance de développer des approches spécifiques adaptées au secteur industriel en question.

- Phase exploratoire N° 2

À partir de cette recommandation, nous avons entamé une deuxième phase de recherche exploratoire consacrée aux études de SCRM dédiées aux industries qui dépendent des métaux. Plus précisément, les industries de l'aéronautique, de l'automobile, de l'électronique et du spatial. Cette collecte documentaire a permis d'identifier 19 articles supplémentaires. L'analyse de ces articles a souligné l'importance des risques fournisseurs et des risques liés au réseau d'approvisionnement comme les domaines d'analyse les plus problématiques. D'un autre côté, elle a mis en évidence l'importance de la cartographie comme première étape essentielle à ajouter au processus de gestion des risques existant.

Cependant, il était évident que les contraintes relatives aux activités minières et au processus de transformation, sont largement absentes des travaux en matière de gestion des risques de la chaîne d'approvisionnement (SCRM). Ainsi, cette lacune nous conduit à envisager une autre voie de recherche pour notre étude.

- Phase exploratoire N° 3

Dans cette troisième phase exploratoire, nous avons cherché à comprendre les crises passées liées à l'approvisionnement des métaux. Plus précisément, nous avons examiné la chronologie des événements ayant conduit à la perturbation de l'approvisionnement des métaux dans le passé. Cette exploration nous a fait découvrir l'existence d'un nouveau domaine de recherche, souvent désigné sous les termes de "matières critiques" ou "évaluation des matières critiques". Ce domaine a la particularité de s'intéresser aux contraintes environnementales, techniques, économiques et géopolitiques des activités minières.

Initialement construit par des initiatives gouvernementales, il a ensuite suscité un intérêt croissant au sein de différentes communautés scientifiques.

Reconnaissant le potentiel de ce domaine pour apporter une réponse à une partie de notre question de recherche, nous avons procédé à une revue de littérature systématique. Les résultats de cette revue de littérature nous ont permis d'identifier de nouveaux facteurs de risque qui caractérisent la criticité et qui incarnent les défis émergents des activités minières. De plus, cette étape a permis l'identification de nouvelles stratégies de réduction de ces facteurs de risque. En complément, les résultats ont révélé l'existence de bases de données et d'outils d'évaluation qui pourraient être considérés dans la construction de notre méthodologie.

- Construction théorique de la méthodologie

Afin de construire théoriquement la méthodologie, nous avons pris en compte les résultats obtenus lors des trois phases exploratoires.

Cette méthodologie s'appuie sur le processus de gestion (SCRM), que nous considérons comme la colonne vertébrale de notre approche. À ce processus, nous avons ajouté une première phase intitulée "Cartographie de la chaîne d'approvisionnement" afin d'améliorer la visibilité au sein du réseau d'approvisionnement. Étant donné que la littérature sur le SCRM n'apporte pas un cadre précis sur la façon de réaliser cette cartographie (le comment ?), nous avons proposé une méthodologie permettant d'effectuer une cartographie du réseau d'approvisionnement basée sur les données secondaires.

De plus, nous avons intégré l'ensemble des risques et des facteurs de risque identifiés lors des deux phases exploratoires. Ainsi, notre méthodologie prend en compte nos préoccupations spécifiques et se base sur les résultats des phases exploratoires précédentes. Afin de prendre en compte les préoccupations liées à la complexité des réseaux d'approvisionnement, nous avons divisé le réseau en quatre sous-systèmes : un pour les fournisseurs, un pour la structure du réseau d'approvisionnement, un pour les ressources, ainsi qu'un quatrième qui englobe l'interconnexion entre ces trois sous-systèmes.

En ce qui concerne le défi de la perte de visibilité au sein des réseaux d'approvisionnement, nous avons intégré cette problématique en envisageant deux scénarios distincts : la gestion des risques dans un système où la visibilité est totale et la gestion des risques dans un système où la visibilité est restreinte ou inexistante.

- Étude de cas

Pour tester l'applicabilité de notre méthodologie, nous avons mené une étude de cas focalisée sur le "*Raw wafer*", un composant indispensable à la fabrication des composants électroniques. Cette ressource est par conséquent cruciale pour les industries du secteur électronique. Dans l'application de la méthodologie, nous avons considéré l'hypothèse que tout le réseau

d'approvisionnement est invisible afin de se mettre dans la position la plus défavorable pour la gestion des risques.

1.6 Positionnement épistémologique

Selon Piaget (1967, p. 6), l'épistémologie est l'étude de la constitution des connaissances valables (Avenier, 2011), tandis que la méthodologie se concentre sur les méthodes de constitution des connaissances (Avenier and Gavard-Perret, 2012).

Le paradigme épistémologique est un système d'hypothèses relatives aux questions qu'étudie l'épistémologie. Ces hypothèses concernent ce qui est considéré comme connaissable, la nature de la connaissance, et la manière dont elle se constitue (Avenier and Gavard-Perret, 2012). Ainsi, un chercheur doit établir comment sa vision du monde (ontologie) influence ce qu'il pense pouvoir connaître (épistémologie) et la manière dont il pense que le monde peut être étudié (méthodologie et techniques de recherche (Qazi, 2017).

Il existe de multiples classifications de paradigmes épistémologiques dans le domaine des sciences sociales et de la gestion (Avenier and Gavard-Perret, 2012). Cependant, selon (Velmuradova, 2004), il y a trois grands paradigmes de base en sciences sociales : le positivisme, l'interprétativisme et le constructivisme.

- Le paradigme positivisme : le paradigme du positivisme considère que la connaissance a une essence et que la réalité est indépendante du sujet et de l'objet. Il croit que le monde est régi par des lois nécessaires (Maurand-Valet, 2011).
- L'interprétativisme considère que l'essence de l'objet ne peut pas être atteinte (Maurand-Valet, 2011). Ce paradigme prend acte de la dépendance de la réalité par rapport à la subjectivité, le chercheur se chargeant désormais d'élucider les représentations, les motivations et les raisons d'agir des acteurs (Rappin, 2011).

- Le constructivisme qui affirme également que l'essence de l'objet ne peut pas être atteinte. Pour ce paradigme, la réalité est construite par les individus (Rappin, 2011). Les critères de validité dans ce paradigme sont l'adéquation et l'enseignabilité (Maurand-Valet, 2011).

Définir une position épistémologique revient à expliquer comment la thèse appréhende le monde et comment la connaissance est formée (Velmuradova, 2004). Par conséquent, cette position aura un impact sur la démarche et les approches de recherche employées.

Selon (Thiéart, 2014), un chercheur dispose de trois options pour se positionner. La première est l'isolation qui considère les paradigmes comme incompatibles. De ce fait, un seul paradigme est choisi. La deuxième est l'intégration qui cherche à unifier les paradigmes autour d'un consensus. Enfin, le multiparadigme considère l'emploi de divers paradigmes comme une richesse.

Dans le cadre de cette thèse, l'objet de recherche ne concerne pas l'être humain, mais plutôt des événements pouvant impacter la fiabilité de l'approvisionnement des métaux. Ainsi, la position épistémologique que nous avons adoptée est le positivisme. Dans ce cadre, le risque est considéré comme une réalité qui peut être analysée et mesurée objectivement. Ainsi, l'objectif est de construire une méthodologie qui répond à des critères bien définis, qui guideront la sélection de théories et d'outils ayant été validés empiriquement.

1.7 Justification de l'approche de recherche

La gestion des risques associés à l'approvisionnement en métaux est un enjeu complexe et multidisciplinaire. Ce sujet se positionne à l'intersection de plusieurs disciplines académiques, englobant les sciences et technologies et les sciences sociales. L'objectif premier de la gestion des risques est de prévenir la matérialisation de cette réalité qui est le risque, ce qui pose des défis pour la validation empirique traditionnelle.

Pour pallier ces défis, cette recherche mettra l'accent sur plusieurs aspects. Tout d'abord, l'exhaustivité de la méthodologie, en veillant à ce que toutes les préoccupations mentionnées dans la question de recherche globale soient intégrées. Deuxièmement, la cohérence interne de la méthodologie, en garantissant que les étapes sont logiquement liées et que chaque étape renforce la précédente. Troisièmement, l'intégration d'outils consensuels ayant démontré leur efficacité dans la gestion des risques.

Pour intégrer la complexité du réseau d'approvisionnement des métaux et afin d'aborder efficacement la problématique de visibilité du réseau, nous avons construit une étude de cas proposant un environnement incertain et d'une extrême opacité empêchant la visibilité en amont de la chaîne d'approvisionnement.

Cette démarche permet d'évaluer la capacité de la méthodologie à générer des informations utiles pour les entreprises afin de sécuriser le réseau d'approvisionnement. Le but est de vérifier comment la méthodologie se comporte lorsqu'il s'agit de sécuriser le réseau d'approvisionnement dans les conditions les plus difficiles.

1.8 Structure de la thèse

Le manuscrit est composé de six parties, détaillées comme suit :

- Partie N° 1 : Introduction générale
- Partie N° 2 : Contextualisation de la recherche

Cette partie permet de poser les bases de notre recherche.

- Chapitre N° 1 : *Description de la chaîne d'approvisionnement* - Ce chapitre fournit une vue d'ensemble détaillée de la chaîne d'approvisionnement, mettant en lumière ses structures complexes et sa globalisation.

- Chapitre N° 2 : *Description de l'industrie électronique et des industries qui dépendent des métaux* - Ce chapitre présentera l'industrie électronique et des autres industries dépendantes de l'approvisionnement en métaux. Ceci en décrivant la chaîne de valeur globale de l'industrie électronique, ainsi que les acteurs et ressources impliqués.
- Chapitre N° 3 : *Description du concept des risques et de la gestion des risques* - Le dernier chapitre de cette partie introduit le concept du risque et de gestion des risques, éléments centraux de cette recherche.
- Partie N°3 : Les phases exploratoires de la gestion des risques dans les chaînes d'approvisionnement
 - Chapitre N° 4 : *Supply Chain Risk Management (SCRM)* - Ce chapitre passe en revue les littératures systématiques et non-systématiques pour explorer diverses stratégies et méthodologies de gestion des risques dans les chaînes d'approvisionnement.
 - Chapitre N° 5 : *SCRM dédiés aux industries qui dépendent des métaux* - Ce chapitre présente l'application des principes de SCRM dans les industries spécifiques qui sont dépendantes des métaux.
- Partie N°4 : Les phases exploratoires sur le contexte de l'approvisionnement des métaux
 - Chapitre N° 6 : *Les crises liées à l'approvisionnement des métaux* - Ce chapitre analyse les crises passées liées à l'approvisionnement en métaux, identifiant la notion de "criticité des matériaux" comme un facteur clé dans la gestion des risques.

- Chapitre N° 7 : *Revue de littérature systématique sur les matières critiques et leur criticité* — Ce chapitre présente une revue systématique de la littérature sur les matières critiques, structurant ce domaine de recherche et identifiant des éléments clés pour la méthodologie.
- Partie N°5 : *Construction théorique de la méthodologie* - Cette partie synthétise les résultats des phases exploratoires et détaille la construction de la méthodologie, expliquant ses étapes et ses outils.
- Partie N° 6 : *Étude de cas du « Raw wafer »* - Cette partie présente une étude de cas axée sur le « *Raw wafer* » (plaquettes de silicium), un élément crucial pour l'industrie électronique, et analyse la gestion des risques associés à son réseau d'approvisionnement.
- Partie N° 7 : *Discussion et Conclusion* - La dernière partie offre une discussion approfondie des résultats et des contributions théoriques et pratiques de cette thèse, tout en mettant en lumière ses limites.

Dans la suite du manuscrit, nous exposerons la première partie qui décrira la chaîne d'approvisionnement, l'industrie électronique, le concept du risque, ainsi que la gestion de des risques.

2 Contextualisation de la recherche

Avant d'entreprendre ce projet de recherche, il était essentiel d'établir le cadre conceptuel des objets de recherche qui y sont associés. Cette partie est composée de trois chapitres, chacun se concentrant sur un aspect clé de la recherche.

Le premier chapitre met l'accent sur la chaîne d'approvisionnement. Il abordera les différentes structures qui la composent. Il examinera également la gestion de la chaîne d'approvisionnement, en mettant en évidence les niveaux décisionnels. De plus, nous présentons le concept de chaîne d'approvisionnement globale (mondiale) et complexe.

Le deuxième chapitre est dédié à la description de l'industrie électronique, en expliquant sa chaîne de valeur globale. Ce chapitre identifie également les entreprises qui dépendent des métaux et qui, par conséquent, sont dépendantes de l'industrie électronique.

Le troisième chapitre est dédié à l'étude du concept du risque. Nous examinerons son évolution conceptuelle au fil du temps. Puis, nous présentons le processus de gestion des risques, en mettant en évidence les différentes étapes.

2.1 Description de la chaîne d'approvisionnement

2.1.1 Définition de la chaîne d'approvisionnement

D'un point de vue opérationnel, la chaîne d'approvisionnement est considérée par (Ganeshan and Harrison, 1995; Lee and Billington, 1993) comme « un réseau d'installations, des moyens et d'activités qui remplit, effectue, assure des fonctions et des tâches d'approvisionnement en matières premières, de transformation de ces matières premières en produit fini, semi-fini ou composant et de la distribution de ces derniers aux clients ».

En incluant l'esprit de la chaîne de valeur selon (Lambert et al., 1998), la chaîne d'approvisionnement inclut le parcours de l'achat des matières premières à la vente en passant par le développement du produit, la production, le stockage et la distribution.

Du point de vue de (Mouloua, 2007), la chaîne d'approvisionnement « englobe l'ensemble des opérations réalisées pour la fabrication d'un produit ou d'un service allant de l'extraction de la matière première à la livraison au client final, en passant par les étapes de transformation, de stockage, et de distribution ». Quant à (Chopra et al., 2007), ils considèrent que la chaîne d'approvisionnement « consiste en toutes les étapes impliquées directement ou indirectement dans la satisfaction de la requête d'un client ».

D'un point de vue entreprise, la chaîne d'approvisionnement est considérée comme un réseau d'organisations ou de fonctions géographiquement dispersées sur plusieurs sites qui coopèrent, afin de réaliser les objectifs suivants :

- améliorer les flux des matériels et des informations entre les fournisseurs et les clients (Govil and Proth, 2002) ;
- réduire les coûts et augmenter la vitesse des processus et activités entre les fournisseurs et les clients (Genin, 2003).

Ainsi, la chaîne d'approvisionnement inclut non seulement le fabricant et ses fournisseurs, mais aussi les transporteurs, les centres d'entreposage, les détaillants et les clients eux-mêmes ».

(Khemiri, 2017) a proposé une définition qui englobe la vision entreprise et la vision opérationnelle. Elle stipule que la chaîne d'approvisionnement « est un ensemble d'organisations géographiquement dispersées coopérant via des flux matériels, informationnels et financiers. Cette coopération assure l'approvisionnement des matières premières, les différents processus de transformation de ces matières premières jusqu'à l'obtention des produits finis, ainsi que la distribution de ces derniers jusqu'aux clients finaux. L'objectif d'une telle organisation correspond bien à la satisfaction du client ».

Le tableau des définitions de la chaîne d'approvisionnement se trouve dans l'annexe N° 1.

Dans ce réseau d'entités formé par des entreprises (Hassan, 2006) s'échangent et circulent trois types de flux (Bouhaddou, 2015; Féliès, 2006):

- des flux matériels ou physiques qui circulent de l'amont vers l'aval. Ils constituent le cœur de la chaîne d'approvisionnement et peuvent être sous forme de composants, produits semi-finis ou des produits finis ;
- des flux d'informations qui circulent dans les deux sens. Ils représentent les échanges de données commerciales sur les commandes passées entre clients et fournisseurs et des données techniques relative au produit, à la production et au transport;
- des flux financiers qui circulent de l'aval vers l'amont. Ils constituent les échanges de valeurs monétaires issues des activités de la chaîne d'approvisionnement et sont utilisés comme un indicateur de performance.

2.1.2 Les structures de la chaîne d'approvisionnement

La structure de la chaîne d'approvisionnement décrit la façon dont ses différentes composantes sont interconnectées, spécifiant les relations entre fournisseurs et acheteurs pour constituer une chaîne cohérente (Huang et al., 2003; Mehrabikoushki, 2008).

Pour représenter visuellement cette structure, des nœuds et des liens sont utilisés (voir figure N°2). Dans ce contexte, un nœud symbolise une entité capable de prendre des décisions, telle qu'un fournisseur, une usine, un centre de distribution, un entrepôt ou un client (Carter et al., 2015). Ces nœuds sont les lieux où les produits sont conçus, fabriqués, entreposés et utilisés (Hadj-Hamou, 2002). Les liens, quant à eux, symbolisent les transactions qui impliquent des flux de matériaux, d'informations et/ou de finances entre ces différentes entités (Carter et al., 2015).

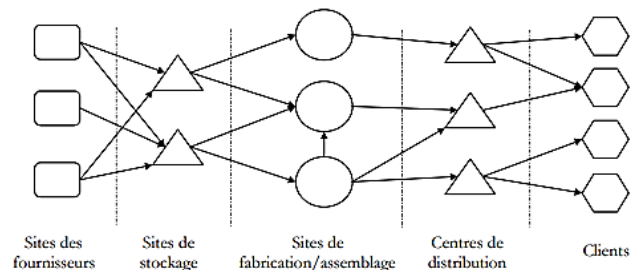


Figure 2 : Structure de l'entreprise (Hadj-Hamou, 2002)

Selon le nombre et la localisation des installations, diverses structures de chaînes d'approvisionnement peuvent être observées (George and Pillai, 2019). Bien que chaque chaîne d'approvisionnement soit singulière et distincte (Forme-Chretien, 2007). La littérature académique identifie plusieurs catégories (comme illustré dans la Figure N°3).

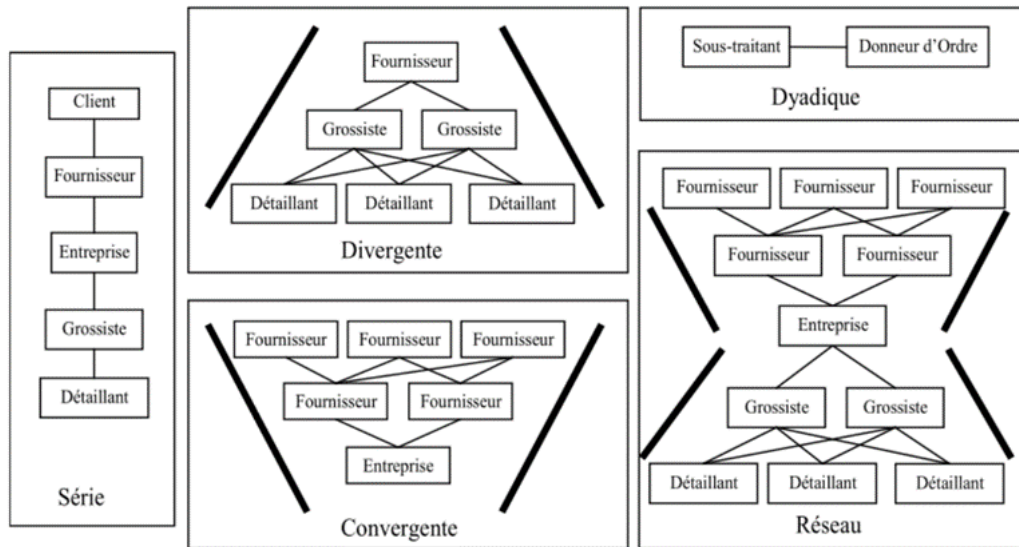


Figure 3 : les différentes structures de la chaîne d'approvisionnement (Mahmoudi, 2006)

Ainsi, selon (Huang et al., 2003), (Mehrabikoushki, 2008) et (Montoya-Torres and Ortiz-Vargas, 2014), il existe cinq types de structures de la chaîne d'approvisionnement.

- La structure dyadique, qui représente la structure la plus simple et qui est constituée de deux entités (ex : acheteur/vendeur).
- La structure en série, formée par la disposition en cascade de plusieurs structures dyadiques. Selon la littérature, les entités qui la composent généralement sont le fournisseur, le fabricant, le distributeur et le détaillant.
- La structure divergente est une modification de la structure en série. Elle représente une chaîne d'approvisionnement d'une entreprise (un fabricant) qui distribue des stocks à plusieurs entités en aval (ex : détaillant). Dans cette structure, chaque nœud d'une structure divergente a au plus un prédécesseur, mais un nombre quelconque de successeurs.
- La structure convergente est une autre modification de la structure en série. Elle représente une chaîne d'approvisionnement d'une entreprise (fabricant) qui reçoit des composants et des matériaux pour les assembler. Dans cette structure, chaque nœud (ou

entité) de la chaîne a au plus un successeur, mais peut avoir un nombre quelconque de prédécesseurs.

- La structure en réseau est une structure complexe qui combine les structures convergente et divergente.

2.1.3 Les sous-systèmes de la chaîne d'approvisionnement

La structure de la chaîne d'approvisionnement peut se décomposer en trois sous-réseaux avec des rôles bien définis, un réseau d'approvisionnement, un réseau de production et un réseau de distribution (Bouhaddou, 2015).

Le réseau d'approvisionnement a pour mission de fournir aux centres de production des matières premières, des composants en quantités demandées et en respectant les délais. Le second, quant à lui, transforme, fabrique ou assemble les matières et composants afin d'obtenir des articles finis. Enfin, le troisième sous-réseau s'occupe du stockage, du transport des articles finis et assure leurs livraisons aux clients (Hadj-Hamou, 2002).

2.1.4 Les dimensions de la chaîne d'approvisionnement

Selon (Forme-Chretien, 2007) et (Lambert et al., 1998), la structure de la chaîne d'approvisionnement est composée de trois dimensions.

La dimension horizontale fait référence au nombre de niveaux (tiers) existant le long de la chaîne, qui peut être plus ou moins large allant du fournisseur du fournisseur, jusqu'au client du client (Forme-Chretien, 2007). La dimension verticale fait référence au nombre de fournisseurs ou clients à chaque niveau de la chaîne d'approvisionnement, qui peut ainsi être plus ou moins large. Enfin, la troisième dimension fait référence à la position qu'occupe une entreprise dans la chaîne.

2.1.5 Analyser la chaîne d'approvisionnement comme un système complexe

Afin d'analyser la chaîne d'approvisionnement, que ce soit pour optimiser ses performances ou pour la gestion des risques, il est possible de la considérer sous trois angles différents : comme un système, comme un système de systèmes, et finalement comme un système complexe.

La chaîne d'approvisionnement est considérée comme un système

Un système est constitué de nombreuses parties ou éléments de différents types, qui sont liés entre eux, directement ou indirectement (Isik, 2011). Ainsi, la chaîne d'approvisionnement est considérée comme un système composé d'un ensemble de sous-systèmes : fournisseurs, producteurs, sous-traitants, entrepôts, détaillants et clients finaux (Mastrocinque et al., 2014). Entre ces entités sont échangés des matériaux, des informations et des flux financiers (Raaidi et al., 2018). De plus, chaque sous-système est indépendant et a ses propres objectifs, tout en respectant les objectifs de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement. (Mastrocinque et al., 2014).

La chaîne d'approvisionnement est un système de systèmes

Un système de systèmes est "un ensemble ou un arrangement de systèmes qui résulte de l'intégration de systèmes indépendants et utiles dans un système plus large qui fournit des capacités uniques" (Defense (DoD), 2004). Ce type de système décrit l'intégration à grande échelle de nombreux systèmes indépendants et autonomes afin de répondre à un besoin global. Chaque système influe sur les autres. La combinaison des systèmes complexes individuels en un système de systèmes plus vaste entraîne une complexité et des défis supplémentaires pour assurer le fonctionnement du système (Ghadge et al., 2010).

La chaîne d'approvisionnement est considérée comme un système de sous-système, car elle est composée de diverses entités et nœuds de la chaîne qui travaillent ensemble pour accomplir une tâche unique. Les différentes entités doivent être considérées ensemble pour obtenir le résultat

souhaité et s'assurer ainsi que le flux n'est pas perturbé (Ghadge et al., 2010). Ainsi, selon (Serman, 2000), il est nécessaire d'envisager les systèmes de la chaîne d'approvisionnement sous l'angle d'un « système de systèmes » pour saisir la nature dynamique, complexe et interdépendante de la chaîne d'approvisionnement.

La chaîne d'approvisionnement est un système complexe

Un système complexe est un système composé d'un ensemble d'éléments, qu'ils soient homogènes ou hétérogènes, interagissant entre eux de manière non linéaire. Cette interaction met en œuvre une dynamique permettant à l'ensemble du système d'exister comme un tout (Raaidi et al., 2018).

La complexité au sein du système de la chaîne d'approvisionnement peut être définie comme une condition résultant de l'association de nombreuses entités interdépendantes, liées entre elles dans le système d'approvisionnement par le biais de plusieurs processus interconnectés (Ghadge et al., 2013).

Elle est considérée comme un système complexe par (Isik, 2011) et (Raaidi et al., 2018), car elle en présente les mêmes caractéristiques qui sont :

- le nombre (nombreuses, multiples) de composants de la chaîne d'approvisionnement comme les produits, les processus, les clients les fournisseurs les relations les interactions les lieux ;
- la diversité liée à l'homogénéité ou à l'hétérogénéité d'un système, Un niveau élevé de diversité de tout composant tel que client, produit ou canaux de transport le long de la chaîne d'approvisionnement entraîne l'hétérogénéité ;
- l'interdépendance des composants, de sorte qu'ils ne peuvent pas fonctionner l'un sans l'autre ou sans l'influence de l'un sur l'autre ;

- la variabilité du système qui fait référence au changement rapide au fil du temps entre l'état prévu et l'état réel du système ;
- la variété qui représente le comportement dynamique du système ;
- l'incertitude qui représente la difficulté de se faire une idée claire du système en raison du manque d'information ou de connaissances.

2.1.6 La mondialisation de la chaîne d'approvisionnement

La mondialisation se manifeste par une intégration accrue et une interdépendance entre les entreprises, stimulées par les avancées dans les domaines des communications et des transports (Magnusson et al., 2008). Ce phénomène a conduit à plusieurs développements clés tels que la facilitation de l'internationalisation des systèmes de production (Ferdows, 1997), l'augmentation du mouvement transfrontalier des biens et l'émergence de nouvelles opportunités et des concurrents sur la scène internationale.

Initié dans les années 1960, le mouvement a vu des entreprises américaines chercher des fournisseurs étrangers et peu coûteux et compétents. Son impact s'étend désormais au-delà des produits finis pour inclure également des composants et des sous-assemblages. Il touche une variété de secteurs, allant au-delà du domaine manufacturier pour englober l'industrie de l'énergie, la production alimentaire, et divers services (Gereffi and Lee, 2012).

Ainsi, un nombre croissant d'entreprises choisit de diviser leurs processus de production en plusieurs étapes, réparties dans différents pays ou régions (Fujita and Thisse, 2006). De plus, l'ouverture des frontières au commerce international, également appelée 'libre-échange', observée ces dernières décennies, a permis aux entreprises et aux industries d'implanter de nouvelles filiales sur différents continents. L'objectif est de mieux satisfaire les clients et de proposer des produits à des coûts et des délais inférieurs à ceux de leurs concurrents (Raaidi et

al., 2018). Ainsi, plus les chaînes d'approvisionnement se mondialisent, plus un grand volume de biens intermédiaires sont échangés au-delà des frontières (Feenstra, 1998).

Les chaînes d'approvisionnement mondiales sont complexes et composées d'acteurs répartis dans le monde entier. Ces acteurs, situés dans différentes zones géographiques, collaborent pour transformer les matériaux en produits finis et les distribuer (Brandao and Godinho-Filho, 2022).

Les chaînes d'approvisionnement mondiales englobent des flux de matières et d'informations qui traversent les frontières. Ces flux concernent divers processus tels que la fabrication, la gestion des stocks et le transport, mais aussi différentes entreprises, y compris les fabricants, les transporteurs, les sociétés de services logistiques et les distributeurs. Ils s'étendent également à divers contextes, allant des continents aux nations et régions (Scholz-Reiter et al., 2010).

Selon (Fujita and Thisse, 2006), la mondialisation de la chaîne d'approvisionnement peut suivre le schéma suivant : les entreprises délocalisent leurs activités de production vers des pays où les salaires sont plus bas, tout en conservant sur leur territoire d'origine des fonctions stratégiques telles que la gestion, la R&D, le marketing et la finance. Selon (Cagliano et al., 2008), les entreprises peuvent adopter quatre configurations différentes en ce qui concerne l'aspect local ou global de leur activité : chaîne d'approvisionnement locale, vendeur mondial, acheteur mondial et chaîne d'approvisionnement mondiale.

2.1.7 La visibilité dans la chaîne d'approvisionnement

Comme expliqué précédemment, les chaînes d'approvisionnement sont des systèmes complexes et mondiaux. De ce fait, elles traversent plusieurs frontières, depuis l'origine des matières premières jusqu'au client final (Véronneau et al., 2008). L'une des conséquences de ces deux caractéristiques est la perte de visibilité au sein de la chaîne d'approvisionnement.

Selon (Ekanayake et al., 2021), la visibilité fait référence à la connaissance de l'état des ressources opérationnelles au sein d'un réseau d'approvisionnement et de son environnement.

Elle est caractérisée par la capacité à accéder aux informations à travers ce réseau (Basole and Bellamy, 2014a). Ainsi, cette perte d'information constitue un défi supplémentaire pour la gestion efficace de la chaîne d'approvisionnement et pourrait empêcher celle-ci d'atteindre ses objectifs.

2.1.8 Le management de la chaîne d'approvisionnement

Le terme SCM (*Supply Chain Management*) a été créé par deux consultants, Oliver et Webber en 1982 (Stadtler, 2015). C'est l'ensemble des efforts et approches mises en place par les acteurs le long de la chaîne d'approvisionnement (Mahmoudi, 2006). Ces actions comprennent :

- la coordination et la gestion des flux matériels, informationnels et financiers (Stadtler, 2005) (Hudnurkar et al., 2017) (Blos et al., 2009) (Mentzer et al., 2001) ;
- la coordination (Hugos, 2003) (Hudnurkar et al., 2017) (Mentzer et al., 2001), la collaboration (Blos et al., 2009) et le contrôle (Hudnurkar et al., 2017) des fonctions de production, du stockage, de la localisation, du marketing, des ventes, de la R&D de produits, de l'approvisionnement, de la logistique, des technologies de l'information et des finances au sein de la chaîne d'approvisionnement ;
- l'intégration (Simchi-Levi, 2003) (Stadtler, 2005) (Mentzer et al., 2001), le pilotage (Bouhaddou, 2015) et la synchronisation des entités (Mentzer et al., 2001) (c'est-à-dire les fournisseurs, les fabricants, les prestataires logistiques, les grossistes/distributeurs et les détaillants).

Cette succession d'actions permet de produire et de livrer des produits aux clients (Blos et al., 2009) en étant distribués à la bonne quantité, au bon moment et au bon endroit, et en assurant le niveau de service exigé par le client final (Simchi-Levi, 2003) (Mahmoudi, 2006) (Prakash et al., 2017), afin d'améliorer la compétitivité (Stadtler, 2005) et la performance (Thierry, 2003) de la chaîne d'approvisionnement.

Concernant la gestion de la chaîne d'approvisionnement mondiale elle est considérée comme la combinaison de trois processus opérationnels principaux : l'approvisionnement global, c'est-à-dire la gestion des relations avec les fournisseurs dans une perspective global ; la fabrication globale, c'est-à-dire la gestion des activités de fabrication réparties dans le monde entier ; et la distribution globale, c'est-à-dire la manière dont les entreprises gèrent leurs canaux de vente et de distribution au niveau mondial (Cagliano et al., 2008).

2.1.9 Les décisions dans la chaîne d'approvisionnement

Le management de la chaîne d'approvisionnement nécessite la prise de décisions (Khemiri, 2017) en considérant l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement (Zheng 2012). Ces décisions sont associées à une partie de la chaîne d'approvisionnement (amont, interne, aval) (Forme-Chretien, 2007) ou à une activité de la chaîne d'approvisionnement (approvisionnement, production, distribution et vente) (Bouhaddou, 2015). Ces décisions sont envisagées sur trois niveaux selon deux dimensions, une dimension hiérarchique (Mouloua, 2007) ou axes managériaux (stratégique, tactique et opérationnel) (Forme-Chretien, 2007) et une dimension temporelle (long terme, moyen terme, court terme) (Mouloua, 2007) (Cho et al., 2012).

Les décisions stratégiques sont prises par la direction au plus haut niveau de l'entreprise (Mouloua, 2007) (Cho et al., 2012), pour une vision à long terme (Mouloua, 2007) (Cho et al., 2012), (Khemiri, 2017) (Bouhaddou, 2015) s'étalant sur plusieurs années selon le cycle de vie des produits (Mouloua, 2007). Ces décisions concernent la conception (Mouloua, 2007) (Cho et al., 2012), (Khemiri, 2017) et la configuration de la chaîne d'approvisionnement (Mouloua, 2007) (Khemiri, 2017) par des choix liés aux implantations, à la sélection des fournisseurs, au dimensionnement des capacités des sites, à l'affectation des familles d'articles aux sites. Également, ces décisions concernent des politiques d'approvisionnement, de production, de distribution et de transport (Bouhaddou, 2015).

Les décisions tactiques sont prises par les cadres au niveau de l'usine (Khemiri, 2017) (Mouloua, 2007), pour une vision à moyen terme (Mouloua, 2007) (Khemiri, 2017). Cet horizon temporelle est traduit par (Mouloua, 2007) comme étant moins de 18 mois, par (Cho et al., 2012) comme étant entre une fois par trimestre et une fois par an et par (Khemiri, 2017) comme étant entre trois mois et 18 mois et par (Bouhaddou, 2015) comme étant entre quelques jours et quelques mois. Ces décisions sont alignée à celles du niveau stratégique (Khemiri, 2017) (Bouhaddou, 2015) (Cho et al., 2012) et concerne l'allocation des ressources physiques et informationnelles nécessaire à la production(Cho et al., 2012) ainsi que l'affectation des fournisseurs aux sites de production, l'allocation des articles aux sites de production ainsi que la définition des niveaux de production de chaque site, l'allocation des centres de distribution aux clients et le dimensionnement des niveaux de stock (Bouhaddou, 2015).

Les décisions opérationnelles sont prises à l'échelle d'un site de production (Bouhaddou, 2015) ou d'un atelier par les responsables d'ateliers, pour un horizon de très court terme (Mouloua, 2007). Ces décision sont prises au quotidien pour assurer le fonctionnement de la chaîne d'approvisionnement (Cho et al., 2012) (Mouloua, 2007) et doivent être alignées aux décisions tactiques et stratégiques (Mouloua, 2007) (Khemiri, 2017). Elles concernent la gestion et le contrôle des stocks, le dimensionnement des lots, l'affectation des stocks aux clients, l'ordonnancement de la production et la définition des programmes de transport et de livraison (Bouhaddou, 2015).

2.1.10 Conclusion

Au regard de la sécurisation de l'approvisionnement des métaux, la compréhension de la chaîne d'approvisionnement est essentielle.

Ce premier chapitre met en évidence le cadre théorique de la chaîne d'approvisionnement. Il souligne que la chaîne d'approvisionnement peut être considérée comme un système, un système de systèmes, ou comme un système complexe. Dans cette optique, elle peut être

décomposée en trois sous-systèmes (approvisionnement, production et distribution). De plus, elle peut être analysée au travers de ces trois dimensions, (horizontale, verticale et position de l'entreprise focale) et selon différentes dimensions (hiérarchique, temporelle). Enfin, ce chapitre aborde également la mondialisation comme un facteur contribuant à la complexité des chaînes d'approvisionnement, impliquant des acteurs répartis à l'échelle mondiale, ainsi que la perte de visibilité comme une conséquence à ses caractéristiques.

2.2 Description du contexte industriel

2.2.1 Présentation de l'industrie électronique

L'industrie électronique est composée d'acteurs qui s'occupent de la conception, le développement, la fabrication, l'assemblage de composants électronique (Lv et al., 2018). Cette industrie offre des produits intermédiaires, des composants, des pièces et des produits finaux électroniques (Frederick and Gereffi, 2013). Les produits de cette industrie sont nombreux et diversifiés. De plus, ils sont utilisés dans presque toutes les activités de la vie quotidienne. De plus, elle est considérée comme un secteur propulseur (Sturgeon and Kawakami, 2010) dans l'économie mondiale (Ha et al., 2022). Cette qualification fait référence au fait que l'industrie électronique propose des technologies de plus en plus intégrés dans la plupart des autres industries (Council, 1991) comme l'aérospatiale, l'agriculture, la biomédecine, la métallurgie, les textiles, l'automobile, la santé, l'internet des objets, la défense et la sécurité (Deliverable, 2021) (Maldonado et al., 2022).

2.2.2 Modularité et mondialisation de la chaîne de valeur

Un système modulaire est un système "composé d'unités (ou modules) conçues indépendamment, mais fonctionnant comme un tout intégré" (Delautre, 2017).

L'industrie électronique est dite « modulaire », car ces produits peuvent être décomposés en sous-systèmes (modules) (Delautre, 2017) ainsi que sa chaîne de valeur. La modularité de la chaîne de valeur est dû au fait que, les principaux processus de l'industrie électronique comme la conception des produits, la planification de la production, le contrôle des stocks et de la logistique ainsi que les processus de production (par exemple, l'assemblage, le test et l'inspection, la manipulation des matériaux) (Cattaneo et al., 2010) ont fait l'objet de normalisation, de codification, de formalisation et l'informatisation (Frederick and Gereffi, 2013) (Sturgeon and Kawakami, 2010). Ceci a permis la fragmentation du processus de

production en différentes étapes (De Backer and Miroudot, 2014) avec une division technique claire du travail à plusieurs points de la chaîne de valeur (Sturgeon and Kawakami, 2010).

L'architecture modulaire des produits et de la chaîne de valeur a permis la participation de plusieurs entreprises dans le processus de fabrication d'un produit ou d'un composant (Frederick and Gereffi, 2013) (Cattaneo et al., 2010). Ces entreprises allant des multinationales aux petites PME sont situées dans différents pays (De Backer and Miroudot, 2014). Rendant la chaîne de valeur mondiale (De Backer and Miroudot, 2014) dynamique et plus étendue géographiquement que tout autre secteur de production de biens (Sturgeon and Kawakami, 2010). La modularité est l'une des raisons du caractère mondiale de l'industrie (Sturgeon and Kawakami, 2010), car elle facilite l'accomplissement de travaux sur de grandes distances (Cattaneo et al., 2010). De plus, l'internet a facilité la coordination entre les différentes étapes de la production dans différents pays (De Backer and Miroudot, 2014). Enfin, le rapport valeur/poids élevé a rendu le transport maritime à longue distance relativement peu coûteux (Cattaneo et al., 2010).

2.2.3 La chaîne de valeur mondiale de l'industrie électronique

La chaîne de valeur de l'électronique (illustrée dans la figure N°4) se compose de matières premières et d'intrants, de composants électroniques, de sous-ensembles et d'assemblages de produits finaux destinés à divers segments du marché et d'acheteurs. La chaîne de valeur comprend également plusieurs activités qui ajoutent de la valeur aux produits finaux, en dehors du processus de fabrication, comme la recherche, le développement de produits et de processus, la conception, le marketing et les services après-vente (Frederick and Gereffi, 2013) (Frederick et al., 2017).

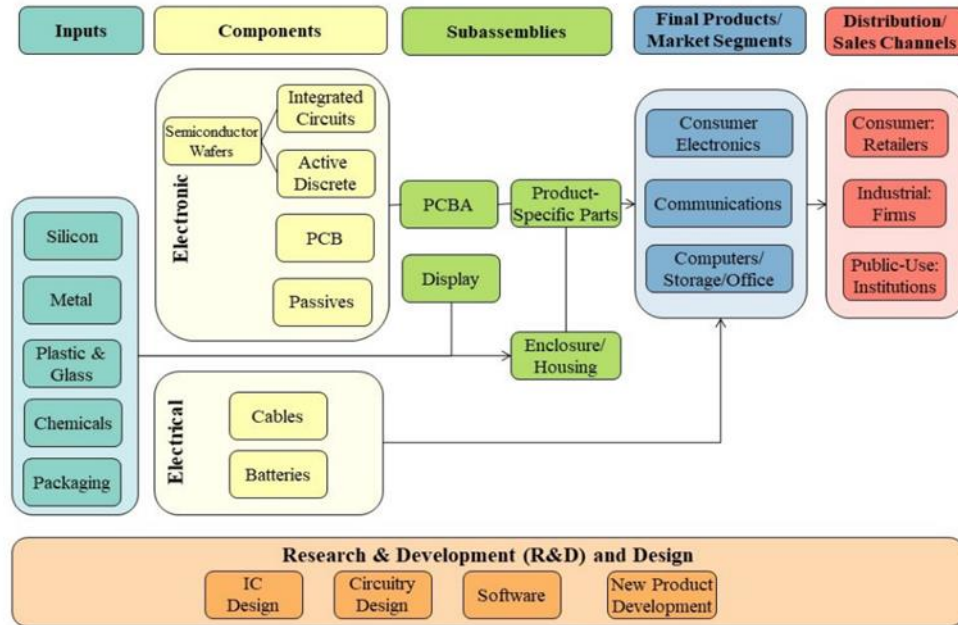


Figure 4 : La chaîne de valeur globale de l'industrie électronique

Matières premières et intrants : ils sont nécessaires à la fabrication des composants électroniques et des sous-ensembles électroniques. Ils varient selon les composants. Par exemple, le silicium est destiné à la fabrication des semi-conducteurs, le verre pour les produits verriers, le plastique pour former les couches de la carte de circuit imprimé. Par ailleurs, divers métaux tels que l'aluminium, l'or, l'argent et le cuivre, sont utilisés en différentes quantités (Frederick and Gereffi, 2013) (Frederick et al., 2017).

Composants électroniques : c'est l'élément de base d'un circuit électronique ou système électronique qui remplit une fonction spécifique. Il peut être soit un composant actif, comme les transistors et les circuits intégrés, soit un composant passif, comme les condensateurs, les résistances et les varistances (A.Abbas et al., 2023). Il peut être un composant discret, ne contenant qu'un seul dispositif par puce pour exécuter une seule fonction électrique (Frederick and Gereffi, 2013). Il peut aussi être un circuit intégré (CI) (ou semi-conducteurs), comme les microprocesseurs et les microcontrôleurs, dans lequel de nombreux éléments actifs et/ou passifs sont fabriqués et connectés (Frederick et al., 2017).

Un autre type de composant est le circuit imprimé (PCB, Printed Circuit Board). Ce dernier est une feuille de matériau isolant telle que la fibre de verre, où sont imprimées ou gravées des lignes conductrices. Il est utilisé pour supporter mécaniquement et connecter électriquement des composants électroniques.

Sous-ensemble électronique : il comprend les principaux composants qui constituent les pièces finales. Il varie en fonction du produit final, mais les circuits imprimés assemblés (PCBA) et les écrans sont présents dans la plupart des produits électroniques. Ainsi, les écrans électroniques fournissent une interface visuelle du système électronique et le Printed circuit (board) assemblies (PCA ou PCBA) sont des cartes de circuits imprimés sur lesquelles sont fixés les composants électroniques (Frederick and Gereffi, 2013). Le sous-ensemble assemblé final est une pièce à intégrer dans un produit final (Frederick et al., 2017).

Distribution et vente de produits finaux

Les méthodes de distribution et de vente des composants électroniques varient en fonction du type et de la valeur de la pièce. Elle peut être réalisée par l'intermédiaire de distributeurs ou directement vendue aux fabricants de produits électroniques. Les produits personnalisés sont vendus directement à des acheteurs spécifiques, tandis que les produits standard passent par des distributeurs (Frederick et al., 2017).

Les produits finaux sont destinés à une gamme croissante de marchés finaux, allant des ordinateurs et de l'électronique grand public aux appareils électroménagers, aux voitures, aux équipements et dispositifs médicaux, aux équipements industriels et aux produits de l'aérospatiale et de la défense. Les trois principaux marchés finaux sont '3C' - ordinateurs, électronique grand public, communications et réseaux, ou téléphones (Frederick et al., 2017).

2.2.4 Les acteurs de l'industrie électronique

L'écosystème de l'industrie électronique est composé de milliers d'entreprises de dizaines de pays différents qui contribuent quotidiennement à l'industrie (Cattaneo et al., 2010).

Nous avons identifié deux modèles de catégorisation des acteurs dans cette industrie.

2.2.4.1 Premier modèle

Dans son étude sur la chaîne de valeur mondiale de l'industrie électronique, (Sturgeon and Kawakami, 2010) ont distingué trois principaux acteurs: les entreprises leaders, les leaders de plateforme et les fabricants sous contrat (Jones et al., 2019). Ceci en prenant en compte l'existence de dizaines d'autres entités comme : les fournisseurs de logiciels, les fabricants d'équipements de production, les distributeurs et les producteurs de composants et de sous-systèmes plus génériques.

Les entreprises leaders (Firm Lead)

Ce sont des entreprises qui portent les marques (De Backer and Miroudot, 2014). Elles créent et vendent des produits aux marchés finaux (Zylberberg, 2016) qui peuvent être des consommateurs individuels, d'autres entreprises ou des organismes publics (Cattaneo et al., 2010). Elles orchestrent la chaîne de valeur mondiale et les chaînes d'approvisionnement mondiales (Zylberberg, 2016) en passant des commandes aux fournisseurs (Sturgeon and Kawakami, 2010).

Ces leaders telles que Dell, Apple et Cisco, se concentrent sur leurs compétences de base, les plus rentables et à plus forte valeur ajoutée des produits finaux (Frederick et al., 2017) (Jones et al., 2019). Ainsi, elles réalisent des activités comme le développement de produits, la recherche sur les consommateurs, la stratégie de marque et le marketing (Frederick and Gereffi, 2013).

Concernant les autres activités comme les services de fabrication, de conception et d'autres fonctions commerciales non essentielles telles que la logistique inverse, (Zylberberg, 2016), elles sont externalisées vers des fournisseurs mondiaux avec les modèles d'entreprise qui varient (Frederick et al., 2017).

Le tableau N° 1 ci-dessous donne un aperçu des plus grandes entreprises leaders dans le monde et leurs marchés finaux (Zylberberg, 2016).

Tableau 1 : Les plus grandes entreprises leaders dans l'industrie électronique

Entreprise	Pays	Marchés
Samsung Electronics	Corée du Sud	Électronique grand public, Équipement de communication, Ordinateurs et dispositifs de stockage, Composants électroniques
Apple	États-Unis	Équipements de communication, ordinateurs et dispositifs de stockage
General Electric	États-Unis	Équipements industriels, Électronique médicale, Électronique grand public
Hewlett-Packard	États-Unis	Ordinateurs et dispositifs de stockage, périphériques informatiques et matériel de bureau

Les fabricants sous contrat (Contract Manufacturer)

Les fabricants sous contrat sont des entreprises qui remplissent une série de fonctions pour les entreprises leader comme l'achat de composants et de matières premières, la conception, la conception de logiciels, l'assemblage de cartes de circuits imprimés, l'assemblage de produits finis, la fourniture de services après-vente et la réparation et la remise à neuf. (Cattaneo et al., 2010; Rynhart et al., 2016; Zylberberg, 2016).

Ils opèrent plus en aval et peuvent être divisés en deux grandes catégories.

- Les fournisseurs de services de fabrication électronique (EMS) (Electronic Manufacturing Services) : ils proposent des services de production. Leurs activités comprennent l'achat de composants, l'assemblage de cartes de circuits imprimés, l'assemblage final et les tests et sont également connus sous le nom d'entreprises de

fabrication d'équipements d'origine (OEM) (Cattaneo et al., 2010; Frederick et al., 2017; Sturgeon and Kawakami, 2010).

- Les fournisseurs de concepts d'origine (ODM) (Original Design Manufacturers) : ils offrent des services de production et de conception des produits finaux, mais dans un nombre limité de catégories de produits (De Backer and Miroudot, 2014; Frederick et al., 2017; Zylberberg, 2016).

Le tableau N°2 fournit un aperçu des plus grandes entreprises sous contrat dans le monde et leur type (Zylberberg, 2016).

Tableau 2 : Les grandes entreprises sous contrat dans l'industrie électronique

Entreprise	Pays	Type
Foxconn (Hon Hai)	Taiïwan	EMS
Quanta Computer	Taiïwan	ODM
Pegatron	Taiïwan	ODM
Flextronics	États-Unis/Singapour	EMS
Compal Electronics	Taiïwan	ODM
Jabil Circuit	États-Unis	EMS

Les gérants de plateformes (Platform Leaders)

Ce sont des entreprises qui ont implanté leur technologie (Sturgeon and Kawakami, 2010) dans une série de produits les rendant indispensables à toutes les entreprises d'un secteur donné (Zylberberg, 2016). Ces entreprises peuvent être des entreprises leaders comme Apple et Microsoft ou des fabricants sous contrat comme Intel (Rynhart et al., 2016). Dans le cas de l'industrie électronique, elles sont présentes dans la fabrication des ordinateurs personnels et des téléphones mobiles (Jones et al., 2019).

Leur technologie peut être sous forme de logiciel, de matériel ou d'une combinaison des deux (Sturgeon and Kawakami., 2010). Par exemple, Qualcomm, Intel et Google offrent des processeurs et des chipsets (un ensemble de circuits intégrés) utilisés dans la plupart des

ordinateurs personnels, des tablettes et des téléphones portables. Par exemple, Microsoft, Google, SAP et Oracle développent des solutions logicielles d'entreprise, des plateformes mobiles et des systèmes d'exploitation.(Zylberberg., 2016).

Cette catégorisation est théorique, et il est possible d'observer des transitions d'acteurs d'une catégorie à une autre (Delautre., 2017).

2.2.4.2 Second modèle

Ce modèle est une autre vision théorique de l'industrie électronique apportée par (Delautre, 2017). Ce modèle explique que l'industrie est composée de quatre acteurs appartenant à deux catégories : les entreprises porteuses d'une marque (brand-name enterprises) et celles qui exécutent les contrats (contract manufacturers). Dans cette vision, les « Brand-Name » sont les entreprises leader (OBM) et les fabricants d'équipements d'origine (OEM). Quant aux « Contract manufacturers », ils se composent des EMS et des ODM.

Ainsi, les OBM tels qu'Apple et Samsung Electronics, s'occupent du développement de produits, fabrication, achat de composants, fabrication et logistique de produits finis portant le nom d'une marque. Les fabricants d'équipements d'origine ou OEM, tels qu'Intel, Microsoft, et Mediatek, s'occupent du développement de produits, fabrication, achat de matériaux et de composants de pièces de marque. Les entreprises EMS, telles que Flextronics et Foxconn, s'occupent de la fabrication, ingénierie liée à la production, achat de composants et services après-vente. Quant aux entreprises ODM, telles que Quanta Computer et Compal, elles effectuent des tâches identiques aux EMS et s'occupent également de la conception et du développement de systèmes techniques.

2.2.5 Les industries qui dépendent des métaux

Les métaux sont des éléments chimiques naturels que l'on trouve dans la croûte terrestre. Ils se distinguent des autres minéraux par leurs propriétés physiques et chimiques, telles que la haute

conductivité électrique et thermique, la malléabilité, la ductilité et la capacité à former des alliages. Ils sont utilisés en grande quantité, comme le fer, l'aluminium et le cuivre. Cependant, certains métaux sont utilisés en plus petites quantités dans des applications spécialisées, comme l'indium, le cobalt, le platine et les terres rares (Graedel et al., 2013). La figure N° 5 présente l'ensemble des métaux situés dans le tableau périodique.

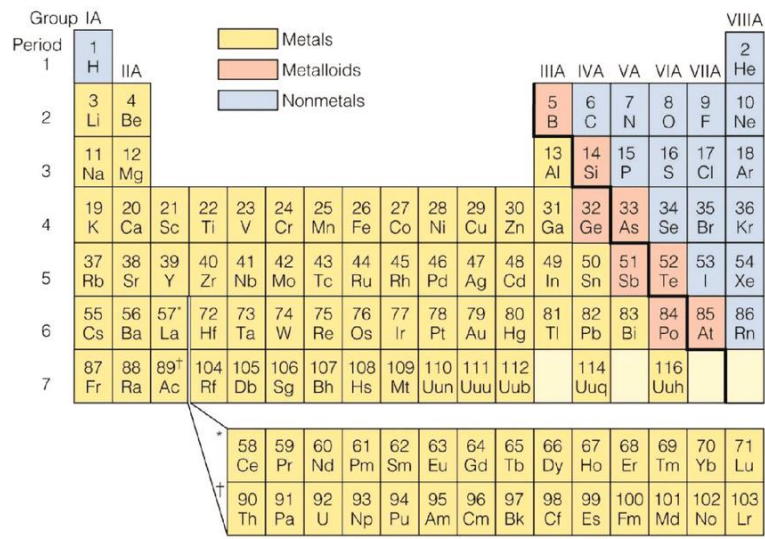


Figure 5 : Tableau périodique des éléments, indiquant les métaux, les métalloïdes et les non-métaux (Patel et al., 2020)

Les métaux constituent une ressource cruciale dans notre société moderne. Selon l'OCDE, la consommation annuelle de métaux devrait passer de 7 à 19 milliards de tonnes d'ici à 2060 (Saint-Aubin, 2019).

Dans l'industrie électronique, les métaux sont indispensables à la fabrication de produits. Ils sont utilisés pour leurs propriétés physiques et chimiques.

Prenons l'exemple du téléphone portable et de l'ordinateur portable. Dans les téléphones portables, il existe plus de 40 matériaux différents. Par exemple, la dalle tactile contient de l'indium (In), la carte électronique contient de l'argent (Ag), du cuivre (Cu), de l'étain (Sn), de l'or (Au), du platine (Pt), du palladium (Pd), du tantale (Ta) et du tungstène (W) ; l'afficheur

LCD ou OLED contient de l'indium (In) ; la batterie Li-ion contient du cobalt (Co) et du lithium (Li) ; l'antenne contient du cuivre (Cu) (Saint-Aubin, 2019). Voir figure N° 6.

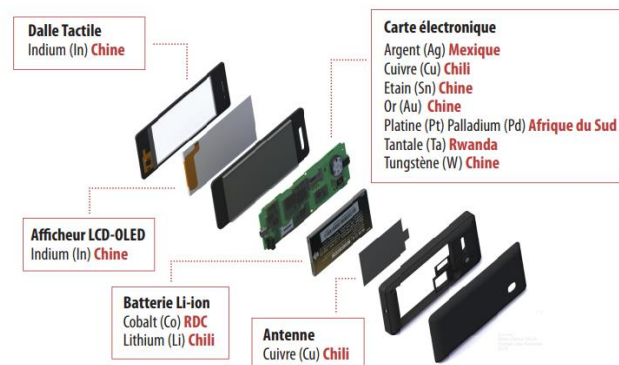


Figure 6 : Les métaux intégrés dans un téléphone portable (Saint-Aubin, 2019)

Dans le cas de l'ordinateur portable, Ce produit électronique contient 17 matériaux différents selon le rapport de (Buchert et al., 2012) tels que :

- le cobalt (Co) est utilisé dans les batteries lithium-ion ;
- le néodyme (Nd) est utilisé dans les disques durs, les haut-parleurs et les bobines acoustiques ;
- le tantale (Ta), l'argent (Ag), l'or (Au) et le palladium (Pd) sont utilisés dans la carte mère et les circuits imprimés ;
- le praséodyme (Pr) est utilisé dans les bobines acoustiques et les haut-parleurs ;
- le dysprosium (Dy) est utilisé dans les bobines acoustiques ;
- l'indium (In) est utilisé dans l'écran ;
- le platine (Pt) est utilisé dans le disque dur ;
- l'yttrium (Y), le gallium (Ga), le gadolinium (Gd), le cérium (Ce), l'euprium (Eu), le lanthane (La) et le terbium (Tb) sont utilisés dans le rétroéclairage.

En raison de la complexité et de la diversité des produits électroniques, il est difficile de définir les limites de l'industrie électronique (Oh, 2001). Ces produits sont intégrés dans d'autres industries, ce qui les rend indispensables à la fourniture de produits et services finaux.

Par exemple, l'industrie automobile utilise des composants électroniques dans les systèmes de navigation, de freinage, etc. L'industrie aérospatiale utilise des composants électroniques dans les systèmes de contrôle, de communication et de navigation des satellites. Le secteur de la santé utilise des dispositifs médicaux électroniques tels que les pacemakers et les scanners. L'industrie de l'énergie et l'industrie manufacturière utilisent des composants électroniques pour contrôler et surveiller les systèmes de production.

Ces exemples ne représentent qu'une fraction des industries qui dépendent des composants électroniques. Avec le développement technologique actuel et l'intégration des systèmes d'information, des produits électroniques comme des téléphones et des ordinateurs sont également indispensables pour l'exécution des tâches quotidiennes dans les entreprises.

De ce fait, la dépendance aux métaux ne se limite pas à l'industrie électronique. D'autres industries, telles que l'automobile, l'aérospatiale, la santé, le secteur militaire et bien d'autres, sont également fortement dépendantes des métaux.

2.2.6 Conclusion

L'industrie électronique, qui dépend des métaux, est une industrie mondiale complexe impliquant des centaines d'acteurs. De plus, elle représente un maillon indispensable dans l'écosystème industriel qui régit notre société. Par conséquent, sécuriser l'approvisionnement en métaux pour l'industrie électronique revient à sécuriser la disponibilité de plusieurs autres produits finaux indispensables à tous les aspects de notre vie.

2.3 Le concept de risque et la gestion des risques

2.3.1 Définition du risque

L'homme a inventé le concept de risque pour l'aider à comprendre et à affronter les dangers et les incertitudes de la vie (Douglas, 1990; Gretschnann and Schepers, 2016). Or, l'industrialisation a marqué un tournant dans la perception du risque par les êtres humains. En effet, avant l'industrialisation, l'idée la plus répandue sur le risque est liée à un pari fait dans l'espoir de gagner quelque chose de significatif (Graubard, 1990). Cependant, après l'industrialisation, le risque a acquis une connotation plus négative, évoquant la peur, l'incertitude, l'instabilité et le mauvais risque (Douglas, 1990; Gretschnann and Schepers, 2016). Ce changement a été renforcé par l'approche théorique de la société du risque introduite par Beck (Beck et al., 1992; Botterill and Mazur, 2004).

L'évolution du concept a conduit à différentes approches de la définition du risque. Ainsi, (Slovic, 1999) considère que le risque est un objet qui n'existe pas, mais qui est socialement construit et dont il ne peut donc y avoir de définition universelle. Cette position n'est pas isolée, puisque dans le même ordre d'idées (Tjørhom, 2010) définit le risque comme "le produit de processus sociaux, organisationnels et managériaux spécifiques par lesquels divers objets sont reconnus et décrits comme des risques". Alors que selon (Douglas, 1992) le risque est "la probabilité d'un événement combiné à l'ampleur des pertes et des gains qu'il entraînera" (Botterill et Mazur 2004).

(Gourc, 2006) propose un modèle général du risque (voir figure N°7). Il considère le risque est la « Possibilité que survienne un événement dont l'occurrence entraînerait des conséquences (positives ou négatives) sur la performance du système ». De ce fait, l'élément clé du risque est un événement. Ainsi, son apparition peut entraîner ou non des perturbations sur le système qui peuvent être bénéfiques ou nuisibles.

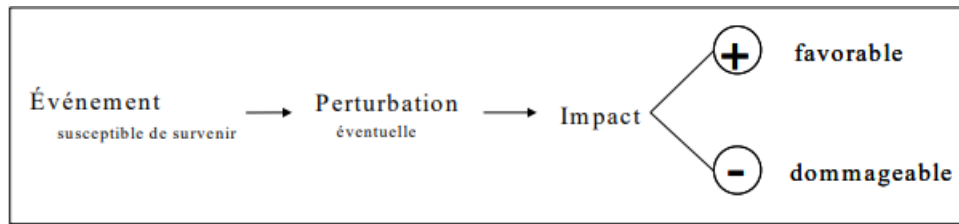


Figure 7 : modèle général du risque selon (Gourc, 2006)

Cette prise en compte des aspects négatifs et positifs d'un risque a été reprise par l'Organisation internationale de normalisation et (Aven, 2012). Ils ont cherché à établir une définition commune.

L'Organisation Internationale de Normalisation ISO a proposé de définir le risque comme « l'effet de l'incertitude sur la possibilité d'atteindre les objectifs de l'organisation ».

- Dans ce contexte, l'incertitude est définie comme un manque d'informations, de compréhension ou de connaissances concernant un événement et ses conséquences (Purdy, 2010).
- L'effet fait référence à tout écart par rapport à une attente, qui peut être positive, négative ou les deux à la fois.
- Dans le cadre d'une organisation, les objectifs peuvent être variés et couvrir divers aspects, tels que les buts financiers, de santé et de sécurité, ou environnementaux. Ils peuvent aussi appartenir à différentes catégories et concerner différents niveaux de l'organisation, qu'ils soient stratégiques, opérationnels ou tactiques.
- Enfin, un risque est généralement exprimé en termes de sources de risque.

Terje Aven, dans un effort supplémentaire pour trouver une définition consensuelle du risque, a stipulé que "le risque est égal à la combinaison bidimensionnelle des événements/conséquences (d'une activité) et des incertitudes qui y sont associées" (Aven, 2012).

Ainsi, il est admis que risque = conséquence/dommage/gravité des événements + incertitudes.

Le terme "risque" est une notion difficile à cerner, dont les significations, les mesures et les interprétations varient en fonction du domaine de recherche (Wagner et Bode 2006). Au niveau universitaire, un nombre croissant de recherches sur le risque a été menées dans différents domaines, tels que la comptabilité, la finance, l'économie, le marketing, la logistique et la psychologie (Zsidisin 2003 ; Jüttner 2005 ; Wagner et Bode 2006).

2.3.2 Définition de l'incertitude

L'incertitude est liée au manque d'informations. Ainsi, une situation est dite incertaine lorsque les informations nécessaires pour comprendre et anticiper les changements sont insuffisantes ou indisponibles (Toma et al., 2012). De ce fait, l'individu éprouve de l'incertitude lorsqu'il se trouve dans l'incapacité de prédire la future situation avec précision, car il estime qu'il ne dispose pas d'informations suffisantes (Milliken, 1987). En d'autres termes, l'incertitude est l'incapacité de dresser une liste de tous les résultats possibles liés à une décision ou à un événement (Manuj and Mentzer, 2008a).

Selon (Toma et al., 2012), l'élément clé de la distinction entre risque et incertitude est la probabilité. Pour le cas de l'incertitude, il n'existe pas suffisamment d'informations pour identifier des probabilités objectives ni de développer une estimation probabiliste (Manuj and Mentzer, 2008a).

Ainsi, la probabilité se réfère à un phénomène ou à un événement particulier qui se produit dans des conditions bien définies (Toma et al., 2012). Alors que la probabilité objective est la probabilité qu'un événement se produise sur la base d'une observation enregistrée ou un long historique de données collectées (Gaspars-Wieloch, 2019).

Les risques et les incertitudes sont omniprésents dans le monde des affaires modernes. L'un des défis majeurs pour les gestionnaires est la prévision, la sensibilisation, l'analyse, la surveillance et le contrôle des risques (Tran et al., 2018a).

L'industrialisation a entraîné un déplacement de la responsabilité du risque des forces extérieures vers les décisions et les actions des êtres humains. Cette transition implique que les événements peuvent être évités et que les êtres humains ont la capacité d'agir. Cette idée du risque se reflète dans le concept de gestion du risque tel qu'il est défini par (Ballard, 1992). Ainsi, il stipule que la gestion des risques consiste à faire en sorte que « les événements qui se produisent souvent aient de faibles conséquences, ou que les événements entraînant des conséquences graves soient rares ».

2.3.3 La gestion des risques

La gestion des risques désigne la gestion des situations non désirées (Shahbaz et al., 2017). C'est un ensemble d'activités (Proença et al., 2017) de mesures et d'approches qui visent à minimiser le risque (Gurtu and Johny, 2021) dans les meilleures conditions de coûts (Urciuoli and Crenca, 1989), donc en investissant un minimum de ressources. De plus, c'est un processus qui implique tous les membres d'une organisation (Hamir and Sum, 2021). Il vise à protéger les actifs de l'organisation contre les pertes qui pourraient l'affecter dans le cadre de ses activités (Verbano and Venturini, 2013).

La gestion des risques est impliquée dans les événements inattendus, bons ou mauvais (Verbano and Venturini, 2013). Son objectif est de maximiser la probabilité et les conséquences d'événements positifs et de minimiser la probabilité et les conséquences d'événements négatifs (Hamir and Sum, 2021). En outre, c'est une gestion qui s'applique dans divers domaines : en physique, en chimie, en biologie, en marketing, en exploitation, etc. (Shahbaz et al., 2017).

Selon la norme ISO (International Organization for Standardization), le management des risques est composé d'un ensemble d'« activités coordonnées dans le but de diriger et piloter un organisme vis-à-vis du risque » (Guillaume, 2011).

La gestion des risques a été introduite en 1931, dans le contexte de l'entreprise, par Henry Fayol comme l'une des six fonctions de l'entreprise, la qualifiant de "fonction de sécurité". Cependant, en termes de développement, la gestion des risques a fait ses débuts aux États-Unis entre 1955 et 1960. Initialement, elle s'intéressait à la réduction des coûts d'assurance en recherchant les meilleures offres de couverture d'assurance. À cette époque, la gestion des risques découlait de la gestion des assurances et portait sur les risques purs (comme le risque d'incendie) et les pertes financières associées. Dans cette même période, la gestion des risques commençait à s'implanter dans les universités et autres institutions académiques. Depuis, plusieurs définitions et approches ont vu le jour et sont destinées à plusieurs domaines fondés sur des contextes différents (Verbano and Venturini, 2011).

2.3.3.1 Plusieurs types de management des risques

Une étude approfondie de la littérature réalisée par (Verbano et Venturini, 2011) a fait émerger neuf voies de développement du management des risques avec des définitions, des méthodologies, des risques considérés, des modèles et des techniques spécifiques (voir figure N° 8). Ces voies de management des risques sont la gestion des risques stratégiques, la gestion des risques financiers, la gestion des risques entreprise, la gestion des risques d'assurance, la gestion des risques cliniques, la gestion des risques de catastrophe, la gestion des risques du projet, la gestion des risques techniques, et la gestion des risques de la chaîne d'approvisionnement.



Figure 8 : Les voies de développement du management des risques

2.3.3.2 Processus de gestion des risques

La gestion des risques suit un processus par étapes (Verbano and Venturini, 2013). Les premiers manuels publiés dans les années 1960 ont décrit le processus de gestion du risque sur la base de trois étapes : l'identification, l'évaluation et le traitement du risque (Mehr et Hedges, 1963).

Selon l'étude menée par (Hamir and Sum, 2021), le processus de gestion des risques peut être aussi simple qu'un processus en quatre étapes ou aussi complet qu'un processus en vingt-trois étapes, proposé par (Bensaada and Taghezout, 2019). Quel que soit le nombre d'étapes, il existe quatre étapes communes dans les processus de gestion des risques. Il s'agit de :

- l'identification des risques qui consiste à identifier et comprendre les sources de risque possibles (Naude and Chiweshe, 2017) ;
- l'analyse des risques qui consiste à déterminer la probabilité que l'événement se produise ainsi que la gravité des conséquences si l'événement se produit (Panigrahi,

2012). De plus, cette étape consiste à déterminer si le niveau de risque est acceptable (Ramly and Osman, 2018) ;

- le traitement des risques qui consiste à prendre des mesures pour réduire la probabilité et l'ampleur des risques (Verbano and Venturini, 2013) ;
- le suivi et l'examen, qui consiste à surveiller les risques et examiner l'efficacité du plan de traitement, des stratégies et du système de gestion mis en place pour gérer efficacement les risques (Ekwere, 2016).

La démarche proposée par la norme ISO (International Organization for Standardization) est basée sur cinq processus principaux intégrés dans une démarche continue (Guillaume, 2011).

- Le premier processus est l'établissement du contexte interne et externe du système étudié ainsi que les méthodes qui seront utilisées.
- Le deuxième processus est l'identification des risques qui consiste en la recherche, l'identification et la description des sources de risque, des zones d'impact en construisant une liste des risques.
- Le troisième processus est l'estimation des risques qui cherche à comprendre la nature d'un risque pour établir son niveau exprimé par la combinaison des causes et des conséquences.
- Le quatrième processus est l'évaluation des risques qui consiste à comparer les risques sur la base de critères définis afin de distinguer ceux qui doivent être traités et ceux qui ne le seront pas.
- Le cinquième processus est le traitement des risques qui consiste à choisir une solution pour traiter le risque afin de le modifier. Ainsi, il est possible de choisir entre éviter le risque, supprimer la source du risque, modifier les conséquences du risque, partager le risque avec d'autres parties, ou accepter le risque et le maintenir.

- Le dernier processus est le suivi et la revue du processus du risque qui consiste à revoir régulièrement ce processus et le modifier si besoin.

2.3.4 Conclusion

Le concept du risque a évolué au fil du temps, passant d'une notion d'opportunité à une vision plus négative. De même que pour l'attitude envers les risques, elle est passée d'un événement qui se trouve en dehors des mains de l'homme à des événements qui peuvent être gérés. Cette gestion peut suivre un processus structuré autour de quatre étapes l'identification, l'analyse, le traitement et le suivi des risques, bien que le nombre d'étapes puisse varier selon le domaine.

2.4 Conclusion de la partie N° 1

Cette première partie du manuscrit déconstruit le cadre du sujet de recherche en mettant la lumière sur le cadre théorique de la chaîne d'approvisionnement, l'importance et les caractéristiques des industries qui dépendent des métaux et enfin sur le concept du risque.

Ainsi, la chaîne d'approvisionnement est un système mondial et complexe qui peut être divisé en trois sous-systèmes : approvisionnement, production et distribution. De plus, elle peut être analysée à travers trois dimensions : horizontale, verticale et la position de l'entreprise vocale.

Le deuxième chapitre décrit l'industrie électronique et sa dépendance aux métaux et souligne l'importance de cette industrie pour l'écosystème industriel ainsi que pour la société dans son ensemble. Ce qui argumente l'importance de gérer les événements pouvant perturber l'approvisionnement des métaux.

Quant au dernier chapitre, il aborde le concept du risque et la possibilité de sa gestion, en se basant sur un processus structuré autour de quatre étapes clés : l'identification, l'évaluation, le traitement et le suivi des risques. Ainsi, il argumente le fait que la sécurisation de l'approvisionnement en métaux n'est pas seulement une nécessité, mais aussi une action réalisable à travers une gestion des risques bien structurée.

3 Phase Exploratoire sur la gestion des risques dans les chaînes d'approvisionnement

3.1 Introduction

En considérant notre question de recherche principale, la première étape de notre méthodologie est d'identifier les approches et les outils que propose le domaine de la gestion des risques dans les chaînes d'approvisionnement (SCRM). L'objectif est d'identifier les opportunités qui sont des éléments qui peuvent être intégrés dans la conception de la méthodologie que cette recherche vise à construire et de pallier les lacunes existantes. Cette étape est guidée par les préoccupations spécifiques à l'approvisionnement des métaux (la complexité, la perte de visibilité, et les contraintes liées aux activités minières et au processus de transformation).

Cette partie est décomposée en deux chapitres. Le premier chapitre est consacré à l'exploration du domaine du SCRM et cherchera à répondre à la sous-question de recherche :

"Quelles sont les méthodologies et les outils proposés dans le domaine du SCRM pour sécuriser l'approvisionnement des métaux, en intégrant l'ensemble des défis tels que la mondialisation, la complexité, la perte de visibilité, et les contraintes liées aux activités minières et aux processus de transformation ?"

Le second chapitre, quant à lui, se focalise sur l'examen des études publiées concernant les approches et les outils utilisés pour la gestion des risques dans les industries dépendant des métaux. Dans ce cadre, les industries sélectionnées sont l'industrie électronique, l'industrie automobile, l'industrie aéronautique et aérospatiale.

3.2 Exploration du domaine de la gestion des risques dans les chaînes d'approvisionnement

3.2.1 Introduction

La réalisation d'une revue de littérature approfondie est une étape cruciale dans le processus de recherche, car elle permet de comprendre ce qui a été réalisé précédemment et d'évaluer les forces et les faiblesses des études existantes (*Rao and Goldsby, 2009*). De ce fait, une revue de littérature est une condition à la réalisation de notre projet de recherche.

La phase initiale de cette recherche a impliqué une exploration approfondie du domaine du SCRM. Le SCRM est largement reconnu dans la communauté scientifique comme étant l'approche traditionnelle et consensuelle pour gérer les risques associés aux chaînes d'approvisionnement.

3.2.2 Méthode de recherche

La sélection des documents de recherche a été réalisée en interrogeant quatre bases de données, à savoir Science Direct, Taylor & Francis, Wiley Online et Emerald Insight, en utilisant les mots-clés suivants : 'Supply Chain Risk Management', 'SCRM process' et 'Supply chain risk'. Les articles sélectionnés sont issus de publications publiées entre 2003 et 2020. Nous avons principalement axé notre attention sur les revues de littérature, car elles fournissent une perspective globale des pratiques, des théories et des méthodes dans le domaine, tout en offrant une évaluation critique.

Ce processus de recherche a conduit à la création d'un ensemble de documents constitué de 19 revues de littérature systématiques et non systématiques axées sur la (SCRM). Le tableau N° 3 présente une synthèse du corpus sélectionné, mettant en évidence les principales contributions qui en résultent.

Tableau 3 : Synthèse des études sélectionnées et leurs principales contributions

<i>Auteurs</i>	<i>Période étudiée</i>	<i>Articles étudiés</i>	<i>Principales contributions</i>
<i>(Rao and Goldsby, 2009)</i>	1998-2008	55 articles	Catégories de risques
<i>(Vanany et al., 2009)</i>	2000-2007	82 articles	Catégories de risques Processus et stratégies SCRM
<i>(Tang and Nurmayana, 2011)</i>	1995-2009	183 articles	Catégories de risques Techniques d'atténuation
<i>(Colicchia and Strozzi, 2012)</i>	1994-2010	55 articles	Processus SCRM
<i>(Sodhi et al., 2012)</i>	1998-2010	31 articles	Définition, processus et lacunes méthodologiques
<i>(Ghadge et al., 2012)</i>	2000-2010	120 articles	Catégories de risques Atténuation des risques
<i>(Qazi et al., 2015)</i>	2000-2014	145 articles	Catégories de risques Processus SCRM Modélisation de l'interdépendance des risques de la chaîne d'approvisionnement
<i>(Ho et al., 2015a)</i>	2003-2013	224 articles	Une nouvelle définition du SCRM Catégories de risques Méthodes SCRM
<i>(Kilubi and Haasis, 2015)</i>	2000-2015	80 articles	Une nouvelle définition de la SCRM Les facilitateurs de la SCRM
<i>(Rangel et al., 2015)</i>	2002-2010	16 articles	Catégories de risques
<i>(Fan and Stevenson, 2018)</i>	2000-2016	354 articles	Une nouvelle définition du SCRM
<i>(Hudnurkar et al., 2017)</i>	2003-2015	25 articles	Catégories de risques
<i>(Prakash et al., 2017)</i>	2004-2014	343 articles	Catégories de risques
<i>(de Oliveira et al., 2017)</i>	2003-2015	27 articles	Processus SCRM harmonisé
<i>(Bak, 2018)</i>	1990-2016	114 articles	Catégories de risques
<i>(Tran et al., 2018b)</i>	2002-2017	140 articles	Une nouvelle définition de la SCRM Méthodes SCRM
<i>(De Oliveira et al., 2017)</i>	2004-2015	248 articles	Principaux chercheurs du SCRM Principaux modèles de SCRM
<i>(Son, 2018)</i>	2005-2018	133 articles	Une nouvelle définition du SCRM
<i>(Pournader et al., 2020)</i>	2001-2019	119 articles	Les thèmes de recherche émergent

L'étude de ce corpus documentaire a permis l'identification et l'analyse des différents concepts clés. Dans ce qui suit, nous aborderons les sujets suivants : l'incertitude et les risques dans la

chaîne d'approvisionnement, la gestion des risques dans la chaîne d'approvisionnement, le processus de gestion des risques de la chaîne d'approvisionnement (SCRM) et ses outils, une discussion des résultats obtenus, ainsi que les lacunes qui existent dans ce domaine de recherche.

3.2.3 Définition des concepts clés

3.2.3.1 L'incertitude dans la chaîne d'approvisionnement

L'incertitude dans la chaîne d'approvisionnement est une situation qui se manifeste au cours du processus de prise de décision (Marcos et al., 2021). Dans cette situation, le décideur manque d'informations ou de compréhension sur la chaîne d'approvisionnement et son environnement (Simangunsong et al., 2012).

Cette situation est problématique, car le décideur a besoin d'informations afin de prévoir les scénarios futurs, tels que la demande d'un produit (Marcos et al., 2021) ou tout simplement afin d'évaluer les alternatives décisionnelles. Cependant, dans une situation d'incertitude le décideur ne sait pas exactement quelle est la décision adéquate ni son impact sur le comportement de la chaîne d'approvisionnement (Simangunsong et al., 2012).

Selon (Vilko et al., 2014), il est possible de classer le niveau d'incertitude selon le niveau d'information et de la nature de l'incertitude :

- la certitude absolue : c'est un monde hypothétique dans lequel les renseignements pertinents sont connus du décideur. De ce fait, tous les risques sont connus ainsi que leurs conséquences, c'est une situation impossible ;
- la certitude probabiliste, c'est une situation où les probabilités objectives des événements ainsi que de leurs conséquences sont connues. C'est une certitude qui est considérée dans l'analyse des risques et une situation qui survient rarement ;

- l'incertitude paramétrique, c'est une situation dans laquelle la structure de l'événement futur est connue, mais que les paramètres de probabilité ne le sont pas. En d'autres termes, les risques sont identifiés, mais la probabilité et l'impact des événements sont difficiles à évaluer. De ce fait, des croyances subjectives sont appliquées au sujet des probabilités d'événements futurs et de leur impact, ainsi qu'une analyse qualitative ;
- l'incertitude structurelle, c'est une situation dans laquelle les informations sur l'état du monde sont imparfaites. En termes de risque, aucune image globale de la chaîne d'approvisionnement et des événements des risques ne peuvent être établis objectivement. De même que pour les probabilités des événements et de leur impact, qui seront difficiles à quantifier. Dans ce cas, les croyances subjectives sont appliquées ainsi qu'une analyse qualitative ;
- l'incertitude procédurale, c'est une situation où le décideur est limité par ses capacités cognitives qui peuvent être inadéquates. Ainsi que par ses capacités de calcul en raison de la complexité des événements et des chaînes d'approvisionnement. Cette situation reflète une visibilité limitée dans la chaîne d'approvisionnement en termes d'activités et de risques. Dans cette situation, seulement une fraction des événements est identifiée et évaluée subjectivement qualitativement ;
- l'incertitude radicale, c'est une situation qui reflète une imperfection totale en termes de connaissances. Dans ce monde hypothétique, la gestion des risques est impossible avec une absence de croyance subjective sur les événements.

3.2.3.2 Les risques dans la chaîne d'approvisionnement

La chaîne d'approvisionnement est un système complexe qui englobe la circulation de trois types de flux : les flux matériels, financiers et informationnels. Lorsqu'un événement imprévu

se produit et perturbe l'un de ces flux, cela entraîne un risque au sein de la chaîne d'approvisionnement (Prakash et al., 2017).

Les risques liés à la chaîne d'approvisionnement sont définis de différentes manières, ce qui peut influencer leur gestion (Heckmann, Comes, et Nickel, 2015). Le tableau N° 4 fournit un aperçu des principales définitions du risque lié à la chaîne d'approvisionnement.

Tableau 4 : Les définitions du risque lié à la chaîne d'approvisionnement

<i>Auteurs</i>	<i>Définition du risque lié à la chaîne d'approvisionnement</i>
<i>(Jüttner, Peck, et Christopher, 2003)</i>	Tous les risques liés aux flux d'informations, de matières et de produits depuis le fournisseur initial jusqu'à la livraison du produit final à l'utilisateur final". En termes simples, les risques liés à la chaîne d'approvisionnement se réfèrent à la possibilité et à l'effet d'une inadéquation entre l'offre et la demande.
<i>(Christopher et Lee, 2004)</i>	L'exposition à un événement qui provoque une perturbation affectant la gestion efficace du réseau de la chaîne d'approvisionnement.
<i>(Ho et al., 2015)</i>	La probabilité et l'impact d'événements ou de conditions inattendues au niveau macro et / ou micro qui influencent négativement une partie d'une chaîne d'approvisionnement, conduisant à des défaillances ou des irrégularités opérationnelles, tactiques ou stratégiques.
<i>(Tummala and Schoenherr, 2011)</i>	Un événement qui affecte négativement les opérations de la chaîne d'approvisionnement et ses mesures de performance souhaitées telles que les niveaux de service et de réactivité à l'échelle de la chaîne ainsi que les coûts.
<i>(Peck, 2006)</i>	Tout ce qui présente un risque (c'est-à-dire un obstacle ou un danger) pour les flux d'informations, de matériaux ou de produits depuis les fournisseurs initiaux jusqu'à la livraison du produit final à l'utilisateur final
<i>(Lavastre et al., 2012a)</i>	Un risque se manifeste par une rupture des flux entre les différents composants de la chaîne d'approvisionnement. Cette variabilité peut potentiellement affecter le flux d'informations, de matériaux et/ou de produits, et elle peut modifier l'utilisation des ressources humaines et matérielles. Les risques sont susceptibles de modifier ou d'empêcher une partie du mouvement et du flux

Les définitions du risque dans les chaînes d'approvisionnement proposent deux visions.

- La première vision considère le risque comme un événement ayant un effet négatif.

- La deuxième vision considère les deux dimensions du risque, à savoir la possibilité et l'effet négatif d'un événement.

La localisation du risque se situe dans les trois flux matériel, informationnel et financier, de telle sorte que la perturbation dans l'un des flux peut entraîner la perturbation des autres flux.

L'impact négatif peut se manifester de plusieurs manières. Il peut entraîner une modification ou une suspension de l'un des flux. Il peut également réduire les performances et l'efficacité de la gestion de la chaîne d'approvisionnement à différents niveaux : tactique, opérationnel ou stratégique.

En tenant compte de la théorie du risque, c'est la définition proposée par Ho et al. (2015), qui est retenue dans le cadre de notre étude. Cette définition intègre les deux dimensions du risque qui sont la probabilité et l'impact des événements. Ainsi, le risque est appréhendé à la fois en termes de probabilité qu'un événement se produise et de la gravité de ses conséquences sur la chaîne d'approvisionnement.

3.2.4 La gestion des risques de la chaîne d'approvisionnement (SCRM)

3.2.4.1 L'importance du SCRM

Selon la recherche menée par (Lavastre et al., 2012b), l'acronyme SCRM a été introduit pour la première fois en 2003, dans le cadre d'une étude menée par (Jüttner et al., 2003). Il représente à la fois une discipline et un domaine de recherche axé sur le contrôle et l'atténuation des effets négatifs causés par les risques au sein de la chaîne d'approvisionnement (Ho et al., 2015b) (Hudnurkar et al., 2017).

La naissance du SCRM est motivée par la nécessité d'assurer la continuité des activités malgré la présence de risques (Hudnurkar et al., 2017). Ce concept qui regroupe la gestion des risques et la gestion des incertitudes au sein d'une chaîne d'approvisionnement est perçu comme une extension de l'idéologie de la gestion des risques au sein de l'entreprise (Rao and Goldsby,

2009). De plus, il est perçu comme une démarche spécifique de gestion des risques appliquée à la chaîne d'approvisionnement (Guillaume, 2011).

Dans cette perspective, Le SCRM propose le développement d'approches, de méthodologies et d'outils spécifiques, permettant l'identification, l'évaluation, l'analyse et le traitement des risques au sein de la chaîne d'approvisionnement (Ceryno et al., 2015) (Kilubi and Haasis, 2015).

3.2.4.2 Les définitions du SCRM

Selon les travaux de (Lavastre et al., 2012a) et de (Ceryno et al., 2015), les premiers auteurs à proposer une définition précise de la SCRM ont été (Jüttner et al., 2003). Ces auteurs ont défini la SCRM comme étant « l'identification et la gestion des risques pour la chaîne d'approvisionnement, grâce à une approche coordonnée entre les membres de la chaîne d'approvisionnement, afin de réduire la vulnérabilité de la chaîne d'approvisionnement dans son ensemble ». Cette définition met l'accent sur deux aspects clés de la SCRM. Le premier est l'identification des risques qui permet de prendre conscience de l'existence des risques. Le deuxième aspect clé est l'importance de la coordination entre les différents acteurs de la chaîne d'approvisionnement pour réduire la vulnérabilité de la chaîne face aux risques identifiés.

Cependant, l'analyse documentaire réalisée par (Kilubi and Haasis, 2015), portant sur les études publiées entre 2000 et 2015 concernant la SCRM, a révélé l'absence d'une définition consensuelle dans ce domaine. Les auteurs expliquent que cette situation découle des différentes approches adoptées par les chercheurs en fonction de leurs objectifs de recherche. Par conséquent, plusieurs définitions ont émergé pour décrire le SCRM. Le tableau N° 5 fournit un aperçu des définitions.

Tableau 5 : Synthèse des définitions du SCRM

Auteurs	Définition SCRM
(Lavastre et al., 2012a)	Le SCRM est la gestion des risques qui implique à la fois des horizons stratégiques et opérationnels pour une évaluation à long terme et à court terme.
(Brindley, 2017)	« (...) la gestion des risques de la chaîne d'approvisionnement par la coordination ou la collaboration entre les partenaires de la chaîne d'approvisionnement de manière à assurer la rentabilité et la continuité. »
(Ho et al., 2015a)	Une entreprise de collaboration inter-organisationnelle utilisant des méthodes quantitatives et qualitatives de gestion des risques. Il s'agit donc d'identifier, d'évaluer, d'atténuer et de contrôler les événements ou conditions imprévus aux niveaux macro et micro qui pourraient avoir un impact négatif sur n'importe quelle partie de la chaîne d'approvisionnement.
(Fan and Stevenson, 2018)	L'identification, l'évaluation, le traitement et le suivi des risques de la chaîne d'approvisionnement, à l'aide de la mise en œuvre interne d'outils, de techniques et de stratégies, de la coordination externe et de la collaboration avec les membres de la chaîne d'approvisionnement afin de réduire la vulnérabilité et d'assurer la continuité couplée à la rentabilité, conduisant à un avantage concurrentiel.
(Hudnurkar et al., 2017)	Un effort de collaboration entre les partenaires de la chaîne d'approvisionnement visant à identifier et à gérer les risques afin de réduire la vulnérabilité de la chaîne d'approvisionnement aux risques et d'assurer sa rentabilité et sa continuité.
(Wieland and Marcus Wallenburg, 2012)	« (...) la mise en œuvre de stratégies de gestion des risques quotidiens et exceptionnels tout au long de la chaîne d'approvisionnement afin de réduire la vulnérabilité et d'assurer la continuité »

L'analyse des définitions démontre que le SCRM comprend plusieurs éléments essentiels :

- c'est un ensemble d'activités qui nécessitent la collaboration et la coordination de tous les acteurs de la chaîne d'approvisionnement ;

- ces activités incluent l'identification, l'évaluation, le traitement (atténuation) et le suivi des risques de la chaîne d'approvisionnement, en utilisant des outils et des méthodes qualitatives et quantitatives ;
- le SCRM englobe le niveau stratégique et opérationnel, avec une évaluation à long terme et à court terme. De plus, il considère des niveaux macro et micro de la chaîne d'approvisionnement ;
- son objectif principal est de réduire la vulnérabilité de la chaîne d'approvisionnement, pour assurer sa rentabilité et sa continuité.

Les activités liées au SCRM ont attiré une attention considérable au sein de notre corpus documentaire. Dans la suite de cet exposé, nous allons maintenant présenter en détail le processus SCRM.

3.2.5 Le processus de management des risques dans la chaîne d'approvisionnement

Le processus SCRM fait référence aux étapes suivies pour réduire les risques associés à la chaîne d'approvisionnement (*Vanany et al., 2009*). Il a été abordé par divers chercheurs, qui ont proposé différentes approches et modèles pour guider ce processus. Cependant, il convient de noter qu'il n'y a pas de consensus parmi les chercheurs concernant les étapes spécifiques à suivre, que ce soit en termes de nombre ou de terminologie appropriés.

Selon l'article de (*de Oliveira et al., 2017*), les premières recherches dans ce domaine ont été réalisées par (*Khan and Burnes, 2007*). Les résultats de ses travaux proposent une approche en trois étapes pour la gestion des risques. La première étape consiste à identifier les risques associés aux échecs potentiels et aux conséquences négatives. La deuxième étape concerne l'estimation des risques, où ces derniers sont décrits et quantifiés. Enfin, la troisième étape consiste à évaluer les risques en établissant un niveau d'acceptabilité, permettant ainsi une comparaison entre les risques identifiés et les bénéfices.

D'autres chercheurs ont également proposé des modèles de processus pour la gestion des risques dans la chaîne d'approvisionnement.

Dans le contexte des chaînes d'approvisionnement mondiales, (Manuj and Mentzer, 2008b) ont proposé un modèle en cinq étapes. Ce modèle comprend l'identification des risques, l'analyse et l'évaluation des risques, la sélection des risques à gérer, la mise en œuvre des stratégies de gestion, et l'atténuation des risques par le biais de mesures, telles que la planification de la continuité des activités et la mise en place de plans d'urgence.

Dans une autre proposition, (Tummala and Schoenherr, 2011) ont formulé un modèle de processus en trois phases pour la gestion des risques dans la chaîne d'approvisionnement. La première phase comprend l'identification des risques, la mesure de leurs conséquences potentielles et l'estimation du risque en évaluant la probabilité de chaque facteur de risque. La deuxième phase comprend l'évaluation des risques, la mise en place de plans d'atténuation des risques et d'urgence. Enfin, la troisième phase se concentre sur le contrôle et la surveillance des risques, en suivant les progrès de la mise en œuvre des plans d'action de réponse aux risques et en prenant des mesures correctives si nécessaire.

Dans un effort visant à proposer un modèle consensuel, (de Oliveira et al., 2017) ont développé un modèle basé sur l'analyse de 27 approches et proposent une harmonisation du processus de gestion des risques de la chaîne d'approvisionnement (SCRM). Leur proposition est basée sur la norme ISO 31000 de gestion des risques. Ce modèle (illustré dans la figure 9) vise à aligner les termes utilisés pour décrire les différentes étapes, ainsi que le nombre d'étapes établies conformément au processus de gestion des risques recommandé par la norme ISO 31000.

En comparaison avec le modèle initial de (Khan and Burnes, 2007), deux étapes supplémentaires ont été ajoutées. La première étape concerne la prise de décisions stratégiques visant à mettre en place des mesures appropriées, en tenant compte des différentes capacités

des entreprises. Cette étape permet de prendre des décisions éclairées pour gérer les risques de manière proactive. La deuxième étape concerne le suivi et les revues critiques, qui jouent un rôle essentiel dans l'amélioration continue de la gestion des risques. Cette étape implique des mises à jour régulières du processus de gestion des risques. Le but est de prendre en compte la nature dynamique de l'environnement et les besoins spécifiques des organisations (Franck, 2007).

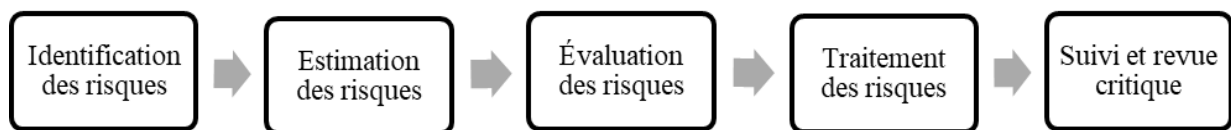


Figure 9 : Processus SCRM selon (de Oliveira et al., 2017)

Ainsi, bien qu'il n'existe pas de consensus absolu sur les étapes à suivre, il existe des éléments communs qui visent à guider les praticiens dans la gestion proactive des risques.

3.2.6 Les étapes du processus SCRM

3.2.6.1 Identification des risques

C'est la première étape du processus de SCRM (Hudnurkar et al., 2017). Elle consiste à identifier et à décrire les types de risques, les facteurs ou sources associés, ou les deux (Ho et al., 2015b). Elle implique une détermination exhaustive et structurée des risques liés à la chaîne d'approvisionnement (Tummala and Schoenherr, 2011). De plus, elle vise à localiser les risques et les dommages/conséquences potentiels dans l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement (Lavastre et al., 2012a). Cette étape nécessite une meilleure compréhension des menaces, des incertitudes et des vulnérabilités (Tran et al., 2018a).

Les sources de risque

(Ceryno et al., 2015) les "sources de risque" font référence aux variables imprévisibles à partir desquelles des perturbations peuvent survenir et affecter les résultats de la chaîne d'approvisionnement.

En se basant sur les sources de risques, les risques identifiés peuvent être (Ceryno et al., 2015):

- Les risques organisationnels comprennent les incertitudes opérationnelles, de responsabilité, de R&D, de crédit et comportementales.
- Les risques liés au réseau sont liés à l'absence de propriété, à l'effet coup de fouet, à l'inertie, aux risques d'approvisionnement et aux risques de demande.
- Les risques de l'industrie incluent les incertitudes du marché des intrants, du marché des produits et de la concurrence.
- Enfin, les risques environnementaux comprennent les incertitudes politiques, les incertitudes liées aux politiques gouvernementales, les incertitudes macroéconomiques, les incertitudes sociales et les incertitudes naturelles.

Les facteurs de risque

Les facteurs de risque se réfèrent à une variété d'événements et de situations qui entraînent des types de risques spécifiques. Dans leur étude, (Ho et al., 2015b) proposent une classification de ces facteurs de risque.

- Macro-facteurs : catastrophes naturelles, environnement politique, guerre, réglementation gouvernementale.
- Micro-facteurs : facteurs liés à la demande (évolution du marché, variabilité de la demande), facteurs liés à la fabrication (panne de machine, conflit de travail), facteurs liés à l'offre (faillite du fournisseur, qualité), facteurs liés à l'information (sécurité,

retards, manque, panne), facteurs liés au transport (mode, manque, attaque de pirate), facteurs liés à la finance (fluctuation des prix, taux de change).

Dans une autre définition, (Ceryno et al., 2015) définissent les facteurs de risque comme des tendances dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement contemporaine qui sont des réponses aux pressions concurrentielles et qui peuvent augmenter ou diminuer la vulnérabilité d'une chaîne d'approvisionnement. Ces facteurs de risque sont : la mondialisation, les variantes liées aux produits, l'externalisation (*outsourcing*), l'approvisionnement mondial (*global sourcing*), la réduction de la base des fournisseurs/concentration des fournisseurs, l'accent mis sur l'efficacité, les partenariats et autres relations étroites, la distribution centralisée, la production centralisée, la dépendance vis-à-vis des fournisseurs et la dépendance vis-à-vis des clients.

Les conséquences du risque

Les conséquences du risque sont des variables de résultats de la chaîne d'approvisionnement. Elles représentent les écarts entre les objectifs visés et les résultats réels (Jüttner et al., 2003). Ainsi, c'est la manière dont la menace se manifeste et l'ampleur de ses effets sur les ressources (Tummala and Schoenherr, 2011). Elles peuvent prendre la forme de pertes de ventes, d'augmentation des coûts, de pertes financières, de réduction ou de pertes de qualité des produits, de pertes sociales, de menaces pour la vie et la sécurité des clients, de détérioration de l'image ou de la réputation de l'entreprise, ainsi que des retards dans les livraisons aux clients (Ceryno et al., 2015).

Les catégories de risque

La typologie et la catégorisation des risques sont des outils essentiels utilisés dans la phase d'identification des risques. Ils permettent de structurer et d'organiser les risques de la chaîne d'approvisionnement (Rao and Goldsby, 2009). Ainsi, ils fournissent un groupement des

risques similaires, afin de mieux comprendre les événements et les conditions qui les engendrent. De plus, cette classification facilite le développement de stratégies d'atténuation et permet d'identifier l'entité responsable de la prise en charge du risque (Hudnurkar et al., 2017)

D'après (Jüttner et al., 2003), le terme "risque" peut se référer à une source de risque et d'incertitude, tels que les risques politiques et les risques de marché. Il peut également être utilisé pour désigner les conséquences des risques, tels que les risques opérationnels et les risques humains.

Il existe plusieurs propositions de classifications dans la littérature, mais il n'y a pas de système de classification universellement accepté (Hudnurkar et al., 2017). Cette multitude de propositions reflète la reconnaissance de la diversité des risques auxquels les chaînes d'approvisionnement font face. Ainsi, les praticiens peuvent adopter plusieurs approches de classification qui facilitent la compréhension des événements et conditions de leur chaîne d'approvisionnement et du contexte dans lequel elle évolue.

Les différentes propositions de classifications sont regroupées dans l'annexe N° 2.

L'étude la plus détaillée en termes de classification des risques est la revue de littérature réalisée par (Rangel et al., 2015), qui identifient 16 catégories différentes dans la littérature comprenant 56 types de risques. Après une analyse approfondie de la classification des risques, 14 types de risques ont été sélectionnés (voir Figure N°9). Ces types de risques sont construits à partir des similitudes conceptuelles qu'ils pouvaient présenter. Ensuite, ils ont été liés aux cinq processus de gestion de la chaîne d'approvisionnement : planifier, s'approvisionner, fabriquer, livrer et retourner et une dernière catégorie nommée « autres ». Cette revue vise à proposer une catégorisation standard pour faciliter la première étape du processus de gestion des risques de la chaîne d'approvisionnement pour les praticiens.

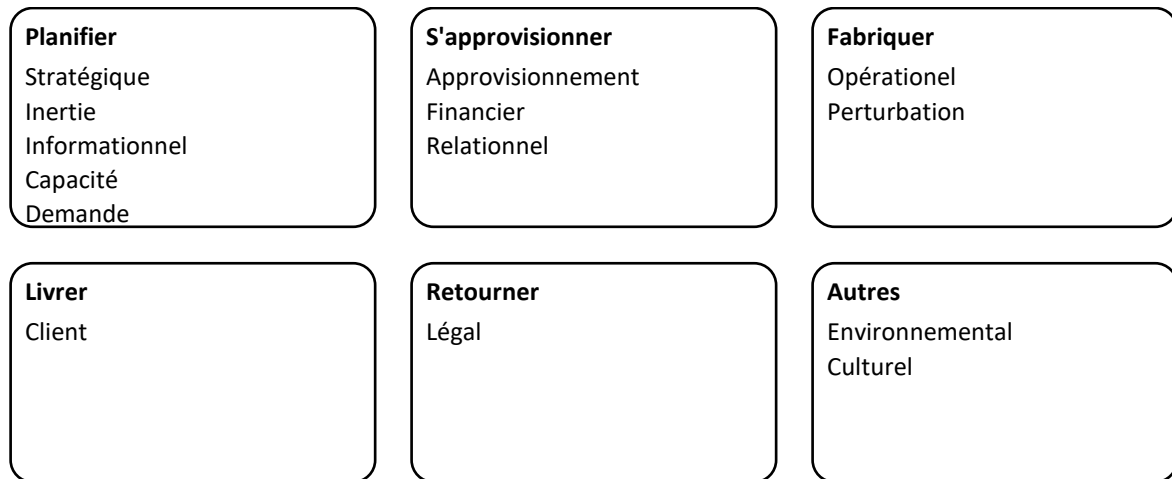


Figure 10 : Système de classification des risques de la chaîne d'approvisionnement proposé par (Rangel et al., 2015)

3.2.6.2 Estimation du risque

Cette étape consiste à déterminer l'importance du risque au sein de la chaîne d'approvisionnement (Son, 2018). Elle est réalisée en associant une probabilité qu'un événement se produise et en attribuant une importance aux conséquences de cet événement (Ho et al., 2015b). Cette étape constitue une mesure du risque, où la probabilité de risque reflète la fréquence à laquelle un événement se produit et l'impact indique l'ampleur des pertes engendrées par cet événement (Kilubi and Haasis, 2015).

Cette étape nécessite la collecte de données primaires ou secondaires, qui peuvent provenir d'avis d'experts universitaires et/ou industriels, de parties prenantes de la chaîne d'approvisionnement ou de données historiques (Tran et al., 2018a).

La définition courante du risque dans le contexte de la chaîne d'approvisionnement est associée à des conséquences et des défaillances spécifiques. Selon cette définition, le risque peut être calculé en multipliant la probabilité d'une défaillance (PE) par l'impact commercial ou la gravité de l'événement (CE). Cette approche est similaire à l'évaluation probabiliste des risques utilisée pour prédire la probabilité de défaillances dans des systèmes technologiques complexes.

Cependant, il est important de noter que cette définition du risque exclut les événements inattendus et nécessite des données historiques pour estimer les probabilités de défaillance (Hudnurkar et al., 2017).

L'évaluation et la mesure du risque peuvent être difficiles à quantifier lorsque le risque ne se matérialise jamais. Par conséquent, cela peut rendre difficile la justification des investissements dans la prévention des risques (Bak, 2018). La mesure du risque est basée sur la connaissance préalable des événements et des conséquences par exemple, des données historiques. Cependant, dans de nombreux cas, les probabilités ne sont pas de bonnes mesures de l'incertitude, car il peut être difficile d'estimer avec précision la probabilité d'occurrence d'un événement donné (Hudnurkar et al., 2017).

Les outils et approches d'évaluation du risque

Plusieurs approches sont utilisées dans la littérature pour évaluer les risques dans la chaîne d'approvisionnement (Son, 2018).

Sur les 140 articles de recherche sur l'évaluation des risques de la chaîne d'approvisionnement étudiés par (Tran et al., 2018a), 130 proposent et/ou utilisent des méthodes pour évaluer les risques dans la chaîne d'approvisionnement. Ces méthodes sont diverses et peuvent être divisées en quatre approches principales : qualitative, semi-quantitative, quantitative et mixte.

L'évaluation qualitative des risques consiste à évaluer les conséquences et la probabilité, en utilisant une échelle linguistique plutôt qu'une échelle purement numérique. Il s'agit d'une méthode d'évaluation simple et rapide qui est principalement utilisée lorsque les ressources, les données adéquates ou le temps sont limités (Tran et al., 2018a).

L'évaluation semi-quantitative des risques est une approche qui utilise des valeurs numériques relatives pour mesurer les indicateurs de risque. Elle permet d'évaluer et de hiérarchiser les risques de manière plus détaillée que les méthodes qualitatives (Tran et al., 2018a).

(Tummala and Schoenherr, 2011) ont utilisé l'évaluation semi-quantitative pour exprimer le niveau de probabilité d'occurrence et de conséquence du risque comme suit :

Tableau 6: L'évaluation semi-quantitative

Mesures	Niveaux	Description qualitative	Index
Probabilité	Souvent	Une fois par semaine	4
	Peu fréquent	Une fois par mois	3
	Rare	Une fois par an	2
	Extrêmement rare	Une fois par décennie	1
Conséquences	Catastrophique	Arrêt de l'usine pendant plus d'un mois en raison du manque de composants avec des niveaux de stock de sécurité nuls	4
	Critique	Ralentissement du processus ou arrêt de l'usine pendant une semaine en raison du manque de composants avec des niveaux de stock de sécurité	3
	Marginal	Niveau de service réduit avec épuisement des stocks de sécurité	2
	Négligeable	Niveau de service non impactés en raison de niveau de stock de sécurité suffisants	1

Cet exemple offre une seule façon de réaliser cette évaluation, car il est possible à recourir à d'autres niveaux d'échelle.

L'évaluation quantitative des risques est une approche qui vise à estimer de manière précise la probabilité d'occurrence d'un risque et d'autres indicateurs clés. Elle repose sur l'utilisation de données, de lois statistiques et de théories pour quantifier les risques (Tran et al., 2018a).

Cependant, il convient de souligner que l'évaluation quantitative des risques peut être complexe et exige souvent une expertise en statistique et en modélisation. Elle nécessite également des données de qualité et des hypothèses appropriées pour obtenir des résultats fiables.

Enfin, la méthode mixte consiste à combiner les différentes méthodologies, telles que des approches qualitatives et quantitatives, afin de bénéficier des avantages de chaque méthode et de compenser leurs limites respectives (Tran et al., 2018a).

3.2.6.3 L'évaluation des risques

Cette phase consiste à comparer le niveau de risque identifié lors de l'étape précédente avec les critères préétablis pour l'acceptabilité des risques. Selon (Hentic-Giliberto, 2016), l'acceptabilité du risque est la « possibilité hasardeuse d'encourir un mal, avec l'espoir d'obtenir un bien ».

L'un des outils utilisés pour l'évaluation des risques est la matrice des risques (voir tableau N°7). Dans cette matrice, les colonnes représentent la probabilité d'occurrence et les lignes indiquent la gravité des conséquences. Le point d'intersection définit le niveau de risque (Tummala and Schoenherr, 2011).

Tableau 7 : La matrice de criticité des risques

	Probabilité			
Gravité	Index = 1	Index = 2	Index = 3	Index = 4
Index = 1	1	2	3	4
Index = 2	2	4	6	8
Index = 3	3	6	9	12
Index = 4	4	8	12	16

La valeur attribuée à chaque risque est le produit de son indice de gravité par son indice de probabilité. Par exemple, si la gravité est notée à l'indice 2 et la probabilité à l'indice 4, la valeur du risque sera alors de $2 \times 4 = 8$.

Cette matrice permet de juger de l'acceptabilité d'un risque en se basant sur un couple de valeur (index probabilité / index gravité) pour définir le domaine du risque acceptable et non acceptable. Ensuite, ces valeurs sont classées en différentes catégories pour faciliter leur gestion. Par exemple, les risques ayant des valeurs entre 16 et 11 sont considérés comme étant critiques ; ceux entre 10 et 6 comme modérés ; et enfin, ceux ayant des valeurs entre 5 et 1 sont jugés négligeables.

Le degré d'acceptabilité du risque dépend du rapport qu'ont les décideurs vis-à-vis du degré de détérioration de la valeur qu'ils peuvent tolérer. De ce fait, plus le gestionnaire est réticent aux risques, plus le niveau de détérioration accepté est faible (Qazi and Akhtar, 2020). Ainsi, l'établissement de cette matrice peut être influencé par : les niveaux d'index de probabilité et de gravité, le groupement des valeurs du risque et de la définition du degré d'acceptabilité du risque.

3.2.6.4 L'atténuation des risques

L'étape d'atténuation des risques consiste à élaborer des contre-mesures visant à contrôler les risques. Cette étape s'appuie sur deux types d'approches. Le premier est les approches proactives, qui sont mises en œuvre avant qu'un événement ne se produise. Le deuxième est les approches, c'est-à-dire mises en place pendant et après un événement à risque (Tran et al., 2018a). Ces approches proactives et réactives constituent des stratégies visant à réduire les incertitudes et à minimiser les conséquences (Jüttner et al., 2003).

La performance de cette étape dépend fortement des trois étapes précédentes (identification, estimation et évaluation des risques) (Tran et al., 2018a). Ainsi, elles influencent directement l'efficacité des stratégies d'atténuation mises en œuvre pour assurer la résilience de la chaîne d'approvisionnement.

Plusieurs études ont contribué à la compréhension des stratégies et des techniques d'atténuation des risques dans la chaîne d'approvisionnement.

L'étude menée par (Vanany et al., 2009) identifie plusieurs stratégies notamment le transfert des risques à d'autres parties, l'acceptation des risques, l'évitement des risques et la coopération avec les partenaires de la chaîne d'approvisionnement. Quant à l'étude réalisée par (Jüttner et al., 2003) elle propose les stratégies suivantes : l'évitement des risques, le contrôle des risques, la coopération avec les partenaires de la chaîne d'approvisionnement et la flexibilité dans les

opérations. De plus, l'étude de (Ceryno et al., 2015) propose six catégories : gestion des risques financiers, évitement, contrôle, coopération, imitation et flexibilité.

Dans une étude empirique menée par (Lavastre et al., 2012a) 21 techniques ont été identifiées pour minimiser les niveaux de risque dans la chaîne d'approvisionnement. Parmi ces techniques, neuf sont considérées comme les plus importantes par les praticiens. Ces neuf techniques sont les suivantes : stock de sécurité interne, stock de sécurité externe, double sourcing ou approvisionnement multiple, établissement de scénarios d'urgence, nomination d'un responsable des risques de la chaîne d'approvisionnement, collaboration et échange d'informations, programmes d'amélioration de la qualité et des performances pour les fournisseurs et les prestataires de services, centralisation de la distribution, de la livraison et des opérations globales, positionnement de l'entreprise en tant que leader dans la gestion des risques de la chaîne d'approvisionnement.

3.2.6.5 La surveillance des risques

La surveillance et le contrôle des risques jouent un rôle crucial dans la gestion des risques de la chaîne d'approvisionnement. Il s'agit de surveiller en permanence les performances des plans de réponse aux risques, d'identifier les écarts par rapport aux objectifs fixés et de prendre des mesures correctives et préventives pour y remédier. (Hudnurkar et al., 2017). Ainsi, les situations anormales et les perturbations de la chaîne d'approvisionnement doivent être signalées et traitées.

Les systèmes de gestion de données jouent un rôle essentiel dans cette tâche, en permettant la collecte, l'analyse et l'interprétation des informations liées à la gestion des risques. De plus, il existe des logiciels commerciaux sophistiqués proposés par des fournisseurs spécialisés qui peuvent contribuer à réaliser cette étape du processus (Tummala and Schoenherr, 2011).

3.2.7 *Les outils utilisés dans le processus SCRM*

En complément de la catégorisation des risques utilisée dans l'étape identification des risques, plusieurs approches et outils contribuent au processus de gestion des risques au sein de la chaîne d'approvisionnement. Parmi ces approches et outils, on distingue les suivants.

1. La cartographie de la chaîne d'approvisionnement : cette approche permet de visualiser et de comprendre les différentes étapes et les interconnexions au sein de la chaîne d'approvisionnement, facilitant ainsi l'identification des risques (Tummala and Schoenherr, 2011) (Lavastre et al., 2012a).
2. Les fiches de contrôle : ces fiches fournissent une liste détaillée des risques et des mesures de contrôle associées, permettant de suivre et de gérer efficacement les risques identifiés. (Tummala and Schoenherr, 2011).
3. L'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) : Cette méthode systématique vise à identifier les modes de défaillance possibles, à évaluer leurs effets et leur criticité, et à proposer des mesures de prévention et de correction. (Tran et al., 2018a) (Ho et al., 2015b) (Musa, 2012) (Lavastre et al., 2012a).
4. Le brainstorming au sein des équipes d'experts de l'industrie : cette approche collaborative favorise la génération d'idées et la discussion ouverte pour identifier les risques et les stratégies de gestion associées (*Vanany et al., 2009*) (Lavastre et al., 2012a).
5. Le modèle IDEF0 (Integration Definition For Function Modeling) : ce modèle permet de représenter graphiquement les processus de la chaîne d'approvisionnement, facilitant ainsi l'identification des points critiques et des risques. (*Vanany et al., 2009*).

6. La méthode du processus de hiérarchie analytique (AHP) : cette méthode permet d'évaluer et de hiérarchiser les risques en tenant compte de plusieurs critères et en impliquant les parties prenantes (Vanany et al., 2009) (Ho et al., 2015b).
7. L'arbre de défaillance : cette méthode graphique permet d'analyser les défaillances potentielles et leurs causes au sein de la chaîne d'approvisionnement, en identifiant les liens de cause à effet (voir figure N°11) (Ho et al., 2015b) (Vanany et al., 2009) (Musa, 2012).

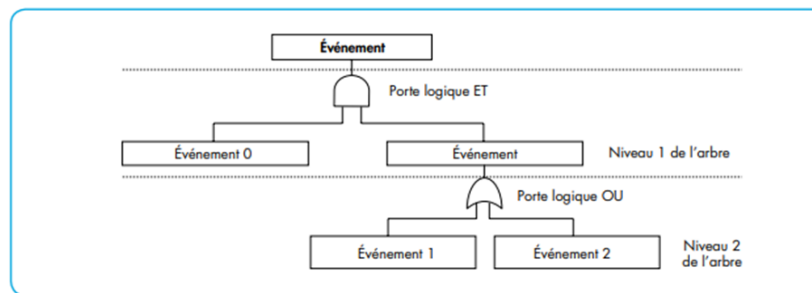


Figure 11 : Arbre de défaillances (Iddir, 2014)

8. L'arbre d'événement : Cette méthode permet de modéliser la nature et l'ampleur des conséquences d'un événement initiateur. Les branches de cet arbre sont créées en fonction de si les barrières de préventions et de protections remplissent leur fonction de sécurité (Vanany et al., 2009) (voir figure N°12).

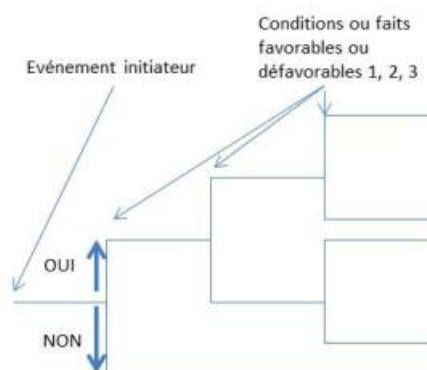


Figure 12 : Principe de l'arbre d'événement (Mortureux, 2016)

9. La carte de vulnérabilité de la chaîne d'approvisionnement : Cette approche consiste à évaluer la vulnérabilité de la chaîne d'approvisionnement face aux différents risques identifiés, afin de mettre en place des mesures de prévention et de résilience (Ho et al., 2015b).
10. La méthode d'analyse des dangers et de l'opérabilité (HAZOP) : Cette méthode permet d'identifier et d'évaluer les risques liés aux opérations et aux processus au sein de la chaîne d'approvisionnement (Tran et al., 2018a) (Ho et al., 2015b).

En complément des approches et outils spécifiquement dédiés à la gestion des risques de la chaîne d'approvisionnement, il est possible d'utiliser des outils issus du domaine du contrôle et de la gestion de la qualité comme mentionné par (Lavastre et al., 2012a) et (Musa, 2012) . Ces outils sont : l'approche de positionnement par question ("et si?"), le diagramme de Pareto, le classement ABC, diagramme d'Ishikawa et cycle PDCA, cycle de Deming et 6 Sigma .

En intégrant ces différentes approches et outils, les entreprises ont la possibilité d'accroître leur aptitude à identifier, évaluer et gérer les risques au sein de leur chaîne d'approvisionnement.

3.2.8 Les secteurs industriels

Un autre point important issu de la revue de littérature est le fait que les études SCRM sont réparties sur de nombreux secteurs industriels : l'électronique, l'aérospatiale, l'automobile, les télécommunications, les semi-conducteurs, l'industrie métallurgique. Sachant que le domaine d'application le plus populaire est l'industrie automobile suivie de l'industrie électronique (Ho et al., 2015b).

3.2.9 Discussion

La diversité des chaînes d'approvisionnement engendre des risques spécifiques à chaque domaine d'activité. Néanmoins, il existe des risques communs à plusieurs chaînes d'approvisionnement. À partir de cette observation, l'utilisation d'un outil de catégorisation des

risques est utile pour identifier les risques partagés, à condition d'adapter cet outil en fonction des particularités de chaque chaîne d'approvisionnement.

La littérature propose plusieurs classifications des risques sans qu'il y ait un système de classification universellement accepté (Hudnurkar et al., 2017). Ainsi, cette diversité de propositions témoigne de la reconnaissance de la variété des risques auxquels les chaînes d'approvisionnement font face. De ce fait, les praticiens peuvent adopter différentes approches de classification qui facilitent la compréhension des événements et des conditions propres à leur chaîne d'approvisionnement et au contexte dans lequel elles évoluent.

Le processus SCRM joue un rôle fondamental en incarnant l'aspect opérationnel de ce domaine. Ainsi, il existe des processus génériques qui assistent les praticiens en leur fournissant des étapes claires accompagnées d'un ensemble d'outils.

Bien qu'il s'agisse d'une méthodologie générale qui peut être appliquée indépendamment du contexte, sa mise en place efficace dépend des connaissances et de l'expertise des praticiens. Pour cette raison, il n'existe aucune certitude quant à la réussite de sa mise en œuvre.

Concernant les lacunes de recherche, l'étude menée par Jüttner et al. (2003b) met en évidence l'importance de développer des approches adaptées au secteur industriel. La raison concerne la variabilité des caractéristiques de chaque industrie. Par conséquent, il est primordial de concevoir des approches et des modèles de gestion des risques qui prennent en compte ces spécificités sectorielles et qui soient adaptés aux besoins et aux défis particuliers de chaque industrie.

3.2.10 Conclusion

L'étude approfondie du corpus documentaire a permis de mettre en évidence plusieurs concepts clés dans le domaine du SCRM. De ce fait, les études examinées ont abordé des sujets tels que

les risques dans la chaîne d'approvisionnement, la gestion des risques dans la chaîne d'approvisionnement et le processus et outils de SCRM.

Concernant l'identification des risques, les études ont identifié les différents types de risques auxquels les entreprises peuvent être confrontées. De plus, le processus SCRM a été présenté comme une série d'étapes comprenant l'identification, l'estimation et l'évaluation des risques, la mise en œuvre des mesures d'atténuation et le suivi et la réévaluation des risques. Ainsi, ces résultats offrent une vision globale du domaine de la recherche sur le SCRM, en mettant en évidence des lacunes.

Ainsi, sur la base de ces résultats et des lacunes identifiées, la prochaine étape de notre projet de recherche consistera à explorer les approches et méthodes du SCRM appliquées aux industries qui dépendent des métaux.

3.3 Exploration du SCRM dédiés aux industries qui dépendent des métaux

3.3.1 Introduction

Afin de répondre à notre problématique de recherche concernant la sécurisation de la chaîne d'approvisionnement des industries dépendantes des métaux, nous avons reconnu l'importance de développer des approches spécifiques adaptées à chaque secteur industriel. Pour cette raison, nous avons entrepris une deuxième étude exploratoire centrée sur les industries électronique, aéronautique, automobile et aérospatiale. L'objectif principal de cette étude était d'identifier les différentes approches de gestion des risques proposées dans la littérature et d'évaluer leur pertinence pour résoudre notre problématique spécifique.

3.3.2 Méthode de recherche

Dans cette étude, nous avons examiné attentivement les travaux de recherche existants portant sur la gestion des risques au sein des industries ciblées. Nous avons analysé les méthodes, les modèles et les cadres conceptuels utilisés pour évaluer et gérer les risques liés à la chaîne d'approvisionnement dans ces domaines spécifiques. Nous avons également étudié les études de cas et les exemples concrets relatifs à la sécurisation de la chaîne d'approvisionnement dans ces industries.

La sélection des documents de recherche a été réalisée en se basant sur le corpus documentaire précédent liés aux revues de littérature systématique et non systématique. Ainsi 19 articles ont été identifiées comme traitant la gestion des risques dans les industries ciblées.

Les différents articles qui ont proposés des contributions dans le domaine de la gestion des risques et qui sont dédiés aux industries cible sont présentés dans l'annexe N°3.

Par la suite, nous allons présenter les différentes contributions des articles sélectionnés et identifier les axes de recherche et les propositions apportées par la littérature pour la gestion des risques dans les industries ciblées.

3.3.3 Les méthodologies de gestion des risques

Les différentes études ont apporté des méthodologies de gestion des risques, mais dédiées à trois cadres d'études différents : le premier concerne l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement, le second concerne le réseau d'approvisionnement, et le troisième concerne l'analyse des risques fournisseurs.

3.3.3.1 Les méthodologies dédiées à la chaîne d'approvisionnement

Dans notre corpus documentaire, deux méthodologies dédiées à la gestion des risques dans les chaînes d'approvisionnement ont été identifiées. La première étude, réalisée par (Alitosa and Kusumah, 2019) propose une méthodologie spécifique à l'industrie automobile pour identifier, analyser et atténuer les risques. Ils se sont appuyés sur le modèle SCOR (planifier, approvisionnement, fabriquer, délivrer et retourner) pour analyser les processus, ainsi que sur le modèle "House of Risk" (HOR) pour réaliser l'étape d'estimation et d'évaluation des risques. Dans le cadre de cette étude, les étapes comprennent la cartographie des activités de la chaîne d'approvisionnement, l'identification des risques, l'analyse et l'évaluation des risques, ainsi que l'atténuation des risques.

La deuxième étude est menée par (Jansson and Norrman, 2004). Elle décrit l'organisation, les processus et les outils de gestion des risques au sein de la chaîne d'approvisionnement de l'entreprise Ericsson. Dans cette approche, l'étape initiale est la cartographie de la chaîne d'approvisionnement afin d'examiner les fournisseurs ainsi que les produits/services. De plus, elle inclut les étapes d'identification, d'évaluation des risques, d'évaluation des fournisseurs, d'atténuation des risques et de la gestion de la continuité des activités.

3.3.3.2 Méthodologies dédiées au réseau d'approvisionnement

Le réseau d'approvisionnement a également suscité l'intérêt de deux études. La première étude est menée par (Harland et al., 2003a) qui présente un processus dédié aux risques des réseaux

d'approvisionnement, comprenant six étapes. Ce processus englobe la cartographie du réseau d'approvisionnement, l'identification des risques, l'évaluation des risques, la mise en place de mesures de gestion des risques, l'élaboration d'une stratégie collaborative de gestion des risques, et enfin sa mise en œuvre avec la coordination des acteurs de la chaîne d'approvisionnement. La deuxième étude est réalisée par (K.T. et al., 2020) qui proposent une méthodologie pour évaluer les risques globaux liés à l'approvisionnement et leur interrelation dans la chaîne d'approvisionnement électronique.

3.3.3.3 Méthodologies dédiées aux fournisseurs

Plusieurs études ont pris le fournisseur comme unité d'analyse. La première étude menée par (Blackhurst et al., 2008) a proposé une méthodologie reposant sur une analyse multicritère. Cette méthodologie comprend les étapes suivantes : l'identification des catégories de risques, l'attribution des poids à chaque catégorie, l'évaluation des risques pour les pièces et les fournisseurs en utilisant une procédure de notation multicritères, l'analyse des pièces et des fournisseurs critiques, et enfin l'analyse prédictive des risques.

La deuxième étude (Kull and Talluri, 2008) a développé une méthodologie intégrant les risques d'approvisionnement pour évaluer les risques fournisseurs. De plus, ils ont utilisé le processus de hiérarchie analytique (AHP) et la programmation des objectifs (GP) comme outils de décision.

Pour cette même unité d'analyse, l'étude de (Chen and Wu, 2013) s'est concentrée sur l'évaluation des risques de défaillance des fournisseurs en proposant une méthode modifiée d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (MFMEA). De plus, ils ont utilisé le processus hiérarchique analytique (AHP) pour déterminer les poids des différents critères et sous-critères lors de la sélection des fournisseurs.

Plusieurs études ont adopté une approche plus holistique dans l'évaluation des risques fournisseurs, en tenant compte des turbulences du marché, de la technologie, de l'environnement des fournisseurs, ainsi que des caractéristiques spécifiques des fournisseurs et de leur rôle dans la structure et la stratégie de la chaîne d'approvisionnement. Par exemple, (Trkman and McCormack, 2009) ont proposé un cadre conceptuel intégrant ces différents aspects. De même, (Raj Sinha et al., 2004) ont développé une méthodologie d'évaluation des risques fournisseurs comprenant plusieurs étapes, telles que l'identification des risques, leur classification en catégories communes, l'évaluation et la priorisation des risques, la planification et la mise en œuvre de stratégies d'atténuation, ainsi que l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE), suivie d'une amélioration continue pour surveiller les changements et atténuer les risques résiduels.

Dans la même perspective, (Zhou and Xun, 2018) ont proposé une méthodologie d'évaluation des risques fournisseurs basée sur la méthode du processus analytique flou des réseaux (Fuzzy Analytic Network Process - ANP) et utilisant le logiciel MATLAB. Ils ont pris en compte des risques tels que les risques externes, la capacité, le coût, le développement, la performance et l'opportunisme lors de la sélection des fournisseurs.

Le deuxième élément qui a été largement discuté dans le présent document est le stade de l'identification des risques.

3.3.4 L'étape de l'identification des risques

De même que pour les méthodologies, l'identification des risques couvre trois cadres d'études différents : le premier concerne l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement, le second concerne le réseau d'approvisionnement, et le troisième concerne l'analyse des risques fournisseurs.

3.3.4.1 L'identification des risques liés à l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement

Dans le cadre de l'établissement d'un profil de risque pour l'industrie automobile, l'étude réalisée par (Ceryno et al., 2015) identifie divers facteurs, sources et événements liés à l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement. Leur proposition s'appuie sur l'analyse des risques concrets observés le long de différentes chaînes d'approvisionnement. Ils s'appuient sur les éléments suivants :

- les facteurs de risque identifiés dans cette étude sont l'approvisionnement mondial, la concentration des fournisseurs, l'accent sur l'efficacité, les partenariats et autres relations étroites, la distribution centralisée, la dépendance aux fournisseurs et aux clients ;
- les sources de risque englobent les risques organisationnels, les risques environnementaux, les risques liés à l'industrie et les risques liés au réseau d'approvisionnement ;
- les événements risqués recensés comprennent la crise économique, les réformes économiques, les fluctuations de la demande et l'incapacité des fournisseurs à répondre aux besoins.

Dans la même perspective, (Blos et al., 2009) utilisent une carte de vulnérabilité pour identifier les vulnérabilités financières, stratégiques, liées aux dangers et opérationnelles associées à la chaîne d'approvisionnement.

Par ailleurs, l'étude menée par (Alitosa and Kusumah, 2019) adopte le modèle SCOR, basé sur les processus (Planification, Approvisionnement, Création, Livraison et Retours) et leurs sous-processus, pour identifier les risques en collaboration avec les parties prenantes de l'entreprise. Les risques identifiés dans leur étude de cas se rapportent spécifiquement à la planification (tels qu'une demande soudaine des clients et des problèmes de maintenance de la machine entraînant

une surcharge) et à l'approvisionnement (comme les fluctuations de la capacité de production du fournisseur et la fourniture de pièces de mauvaise qualité).

La dernière étude est celle de (Sodhi and Lee, 2007), qui présente le cas de l'entreprise Samsung et identifie les risques suivants :

- les risques liés à l'approvisionnement incluent les risques politiques, les fusions et acquisitions, les catastrophes naturelles, la guerre et le terrorisme, les risques liés à la capacité, la propriété intellectuelle, l'approvisionnement unique, les retards des fournisseurs, la qualité de la production et les stocks ;
- les risques liés à la demande englobent la réputation, la technologie et la concurrence, les changements dans les préférences des clients, les risques liés aux prévisions, la possibilité d'une récession mondiale et les risques liés aux créances ;
- les risques contextuels comprennent les différences culturelles, les risques environnementaux, les coûts de mise en conformité, le respect des réglementations, les risques financiers liés aux taux de change et enfin les risques liés aux systèmes.

3.3.4.2 L'identification des risques liés aux fournisseurs

Dans le cadre de l'évaluation des risques associés aux fournisseurs, de nombreuses études ont identifié divers risques et facteurs. Ces facteurs sont regroupés en deux catégories : les facteurs internes et les facteurs externes. Les facteurs internes comprennent :

- la qualité (Chen et Wu, 2013 ; Blackhurst et al., 2008 ; Kull et Talluri, 2008),
- les coûts (Chen et Wu, 2013 ; Kull et Talluri, 2008 ; Zhou et Xun, 2018),
- la performance (productivité) (Chen et Wu, 2013),
- la livraison (Kull et Talluri, 2008),
- la flexibilité (Kull et Talluri, 2008 ; Zhou et Xun, 2018),
- la technologie (Raj Sinha et al., 2004 ; Zhou et Xun, 2018),

- les normes (Raj Sinha et al., 2004).

Les facteurs externes incluent les perturbations et les catastrophes (Blackhurst et al., 2008), les risques pays, les risques liés au climat des affaires, les risques commerciaux, les risques logistiques et les risques de corruption (Archie Lockamy III, 2017) ainsi que les risques associés à des éléments tels que la géographie, la concentration industrielle, la politique et le marché (Zhou and Xun, 2018).

3.3.4.3 L'identification des risques liés au réseau d'approvisionnement

Le réseau d'approvisionnement est l'élément qui a suscité le plus d'intérêt dans notre corpus au détriment de la partie production et de la partie demande. Ainsi, les études ont entrepris d'identifier les risques qui lui sont associés.

Selon les travaux de (Basole et al., 2016) et de (Trkman and McCormack, 2009), une classification en deux catégories a été proposée pour les risques :

- les risques endogènes qui émergent de l'intérieur du réseau d'approvisionnement et englobent les risques liés à l'approvisionnement, les risques liés à la demande, les risques opérationnels, les risques financiers, les risques de collaboration, les risques liés à l'information et les risques stratégiques, ainsi que les turbulences du marché et les turbulences technologiques ;
- les risques exogènes qui sont indépendants du contrôle du réseau d'approvisionnement, comprennent les risques politiques ou pays, les risques réglementaires, les risques de catastrophe et les risques de change. Ces événements peuvent se présenter sous la forme de risques continus ou d'événements discrets.

Une autre classification des risques est proposée par (K.T. et al., 2020), qui identifient les risques liés aux réseaux d'approvisionnement comme étant : le risque environnemental, le risque

produit, le risque fournisseur, la performance du fournisseur, le risque relationnel et les risques liés à la structure du réseau.

Les étapes d'identification, d'atténuation et du traitement des risques ont également reçu un intérêt considérable dans notre corpus documentaire. Elles sont détaillées ci-après.

3.3.5 L'étape d'atténuation des risques

Notre corpus documentaire met en lumière plusieurs stratégies visant à atténuer et à gérer les risques. Deux stratégies proactives peuvent s'appliquer au niveau du fournisseur ; ces stratégies sont les suivantes :

- la première stratégie concerne une pratique en gestion des risques qui vise à évaluer les risques associés aux fournisseurs afin de sélectionner ceux présentant le moins de risques ;
- selon une étude de (Zsidisin and Smith, 2005), une deuxième stratégie concerne l'intégration des fournisseurs dans l'étape de conception du produit.

Parallèlement, plusieurs études ont identifié des stratégies de mitigation utilisées dans ces industries. Selon (Sodhi and Lee, 2007), Samsung a choisi d'investir massivement dans la recherche et le développement, d'assurer la fabrication interne de toutes les technologies de base et de viser une visibilité mondiale. De plus, l'étude menée par (Tang et al., 2009) suggèrent des pratiques telles que l'acquisition d'unités de partenaires stratégiques, la désignation d'un responsable spécialisé en gestion de la chaîne d'approvisionnement et l'envoi de personnel sur les sites de production pour une gestion directe des fournisseurs.

Enfin, l'étude (Alitosa and Kusumah, 2019) propose plusieurs stratégies de mitigation, telles que la supervision des subordonnés, l'amélioration de la performance de production, la mise en place de procédures de contrôle des stocks, la programmation de la maintenance, la

modification des contrats fournisseurs, la mise en place d'une gestion de la qualité totale, et la réalisation d'audits des fournisseurs.

En parallèle aux méthodologies, à la catégorisation et la réduction des risques, plusieurs outils sont utilisés et proposés par notre corpus documentaire.

3.3.6 Les outils de SCRM dans les industries qui dépendent des métaux

Les outils du (SCRM) utilisés dans les industries dépendant des métaux sont répartis en plusieurs catégories, à savoir qualitative, semi-qualitative et quantitative, et sont utilisés à différentes étapes de la gestion des risques dans les chaînes d'approvisionnement.

Nous pouvons mentionner les outils suivants.

- L'analyse multicritère, qui permet de prendre en compte plusieurs critères dans l'évaluation des risques de la chaîne d'approvisionnement. (Blackhurst et al., 2008).
- Le processus de hiérarchie analytique (AHP), qui permet de hiérarchiser les différents éléments liés aux risques (Kull and Talluri, 2008) (Chen and Wu, 2013).
- La programmation des objectifs (GP), qui permet de définir et de poursuivre des objectifs spécifiques dans la gestion des risques (Kull and Talluri, 2008).
- Le modèle "House of Risk" (HOR), qui offre une approche structurée pour identifier, évaluer et gérer les risques dans la chaîne d'approvisionnement et c'est une version modifiée du FMEA (Alitosa and Kusumah, 2019).
- La méthode d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets modifiée (MFMEA), qui permet d'identifier les modes de défaillance potentiels et d'évaluer leurs impacts. (Chen and Wu, 2013).
- L'approche DEMATEL qui est une méthode qui permet de modéliser et d'évaluer les relations de cause à effet entre les différents facteurs de risque. (K.T. et al., 2020).

- L'ANP (Analytical Network Process) qui est une méthode d'évaluation qui permet de hiérarchiser et de comparer les différentes alternatives en prenant en compte les relations complexes entre les critères et les objectifs (K.T. et al., 2020).

Concernant la quantification et la priorisation des risques, les chercheurs utilisent l'approche DEMATEL (Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory) ainsi que l'ANP (Analytical Network Process). Ces deux méthodes permettent d'analyser et de prendre des décisions en prenant en compte les relations et les dépendances entre les différents facteurs de risque dans le contexte spécifique de la chaîne d'approvisionnement électronique.

- Les réseaux bayésiens sont également utilisés comme outil d'évaluation dans la gestion des risques de la chaîne d'approvisionnement. Ils permettent de modéliser et d'analyser les relations de cause à effet entre les différents facteurs de risque (Archie Lockamy III, 2017).
- L'analyse des modes de défaillance et des effets (FMEA) , qui permet d'identifier les modes de défaillance potentiels et d'évaluer leurs effets sur la chaîne d'approvisionnement (Raj Sinha et al., 2004).

Dans la catégorie de l'identification des risques, les outils suivants sont utilisés.

- L'analyse des risques réels manifestés le long de différentes chaînes d'approvisionnement, qui permet d'identifier les risques spécifiques rencontrés dans des situations réelles (Ceryno et al., 2015).
- Le modèle SCOR, qui est un instrument de gestion qui offre un cadre de référence pour décrire, évaluer, surveiller et améliorer les processus de la chaîne d'approvisionnement (Millet et al., 2009). Dans ce cadre, les processus de la chaîne d'approvisionnement sont répartis en cinq processus principaux : planification, approvisionnement, production,

livraison et retour. Sachant que chacun de ces processus comporte plusieurs sous-processus (Alitosa and Kusumah, 2019).

- La cartographie de la vulnérabilité de la chaîne d'approvisionnement, qui permet de cartographier et d'identifier les points critiques. (Blos et al., 2009)
- Le remue-méninge (brainstorming), qui favorise la génération d'idées et la recherche de solutions innovantes pour la gestion des risques. (Raj Sinha et al., 2004).

En ce qui concerne la cartographie, les outils suivants sont utilisés.

- L'analyse de réseau et visualisation de l'information, qui permet de représenter graphiquement les relations entre les différents éléments de la chaîne d'approvisionnement. (Basole and Bellamy, 2014).
- Le logiciel Gephi, qui est un outil spécifique utilisé pour l'analyse et la visualisation des réseaux. (Basole and Bellamy, 2014) (Basole et al., 2016).
- La méthode IDEF0 (Integration Definition for Function Modeling) qui est une méthode de modélisation fonctionnelle largement utilisée dans le domaine de l'ingénierie des systèmes (Raj Sinha et al., 2004).

Enfin, pour l'évaluation des fournisseurs, l'outil spécifique mentionné est l'Ericsson Supplier Relationship Management Tool (ERMET). Cet outil permet de gérer et d'évaluer les relations avec les fournisseurs dans le contexte de la chaîne d'approvisionnement (Jansson and Norrman, 2004).

3.3.7 La cartographie du réseau d'approvisionnement

En se basant sur les études menées dans le contexte des industries dépendantes des métaux, la cartographie est reconnue comme une étape essentielle du processus de gestion des risques.

Dans l'étude menée par (Harland et al., 2003a), la cartographie est considérée comme la première étape. Elle est définie comme une représentation schématique du réseau d'approvisionnement, et les données nécessaires pour cette cartographie sont laissées à la discrétion des praticiens. Une autre étude réalisée par (Jansson and Norrman, 2004) explique que l'entreprise commence par cartographier tous les composants et produits à plusieurs niveaux en amont de la chaîne d'approvisionnement. Également, ils identifient les fournisseurs et les sites critiques qui doivent être priorisés lors de l'évaluation des risques. Dans une troisième étude menée par Alitosa and Kusumah (2019), la cartographie des activités de la chaîne d'approvisionnement est abordée. Cette cartographie comprend un flux de marchandises qui doit être géré, en commençant par les fournisseurs, les entreprises, les partenaires logistiques et les clients.

En plus de cette reconnaissance en tant qu'étape du processus de gestion des risques, (Basole et al., 2016; Basole and Bellamy, 2014a) se sont penchés sur l'étude de la cartographie et de la visualisation du réseau d'approvisionnement afin d'analyser la dépendance des risques et leur diffusion potentielle dans le réseau. Ils ont utilisé des outils de simulation informatique ainsi que le logiciel Gephi pour leur recherche.

3.3.8 Discussion

L'analyse approfondie de la littérature sur l'application des approches SCRM dans les industries dépendantes des métaux a permis de formuler plusieurs observations.

Les propositions de méthodologie pour la gestion des risques d'approvisionnement sont basées sur le processus classique SCRM en ajoutant une étape préliminaire de cartographie de la chaîne d'approvisionnement. La cartographie est une représentation du réseau d'approvisionnement permettant la visualisation des acteurs, des flux et des relations au sein de la chaîne. Par conséquent, elle facilite l'identification des risques, les parties prenantes et les points critiques.

Cependant, il n'existe pas de méthodologie spécifique encadrant cette étape, laissant ainsi une flexibilité dans le choix de la représentation.

Un autre point à souligner concerne la focalisation des unités d'analyse sur le réseau d'approvisionnement et les fournisseurs. Ce faisant, les recherches accordent moins d'attention à la partie production et à la partie demande. Bien que cette focalisation puisse indiquer une lacune dans les études actuelles, elle met également en évidence l'importance d'inclure le réseau d'approvisionnement et les fournisseurs pour une gestion efficace des risques.

Concernant l'étape d'identification des risques, elle représente une étape cruciale. Ainsi, les études examinées ont permis d'identifier divers risques liés l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement, mais en mettant l'accent sur le réseau d'approvisionnement et les fournisseurs. Cependant, il n'existe pas encore de catégorisation spécifique pour ces industries. Cette lacune souligne la nécessité de développer une catégorisation des risques adaptées à ces industries, afin de mieux capturer et gérer les risques qui leur sont propres.

Les outils utilisés pour la gestion des risques d'approvisionnement incluent l'Analytic Hierarchy Process (AHP), qui est largement utilisé pour hiérarchiser les critères et les stratégies de gestion des risques, ainsi que l'analyse des modes de défaillances et leur criticité (FMEA), qui est également un outil couramment utilisé pour identifier les modes de défaillance potentiels, leurs causes et leurs conséquences. Cela permet de prioriser les actions de prévention et d'atténuation. Un autre outil est le brainstorming, qui est utilisé pour générer des idées et des solutions, tandis que le modèle SCOR permet de structurer l'identification des risques.

Des outils plus élaborés sont utilisés, tels que les réseaux bayésiens, les chaînes de Markov, l'analyse de réseau et la visualisation de l'information. Ces derniers permettent de représenter graphiquement les relations entre les différents éléments de la chaîne d'approvisionnement et de quantifier les risques associés.

L'application de ces outils nécessite l'utilisation de bases de données externes pour les approches quantitatives, ainsi qu'une collaboration avec les acteurs de l'industrie pour les approches qualitatives ou semi-qualitatives.

Concernant l'étape d'atténuation, elle est basée sur les stratégies du SCRM identifiées dans la première phase exploratoire. Cependant, elle est complétée par les stratégies suivantes : l'évaluation des risques liés aux fournisseurs et l'intégration précoce des fournisseurs dans le processus de conception et l'augmentation de la visibilité mondiale du réseau d'approvisionnement.

Dans l'ensemble, ces observations soulignent les éléments suivants :

- l'importance de prendre en compte la cartographie de la chaîne d'approvisionnement ;
- l'importance de considérer les facteurs de risque spécifiques liés au réseau d'approvisionnement et aux fournisseurs.

3.3.9 Conclusion

Cette deuxième étude exploratoire met en évidence l'état actuel des connaissances sur la gestion des risques d'approvisionnement dans les industries dépendantes des métaux. Elle souligne l'importance de la cartographie de la chaîne d'approvisionnement ainsi qu'un besoin d'une méthodologie de cartographie, la focalisation sur le réseau d'approvisionnement et les fournisseurs, l'utilisation d'outils du SCRM et de modélisation, ainsi que le besoin de développer des approches de catégorisation des risques spécifiques à ces industries.

3.4 Conclusion de la deuxième partie

Dans la perspective de répondre à la question de recherche principale, une exploration exclusivement dédiée au domaine du SCRM a été réalisée, composée de deux phases exploratoires.

La première phase exploratoire a permis l'identification du processus de gestion des risques dans les chaînes d'approvisionnement. Les différentes étapes de ce processus, à savoir l'identification, l'estimation, l'évaluation, le traitement et le suivi des risques, sont clairement définies comme des éléments clés pour une gestion efficace des risques dans les chaînes d'approvisionnement. Cependant, malgré l'existence de ce processus, son exécution est considérée comme générique et dépendante de l'expérience et des connaissances des praticiens. En découle la recommandation de concevoir des approches spécifiques à chaque industrie, compte tenu des contextes, des incertitudes et des défis uniques rencontrés dans la gestion des risques. Cette recommandation a conduit à une réorientation de l'étude exploratoire vers les approches de gestion des risques dédiées aux industries dépendantes des métaux.

La deuxième phase exploratoire a permis de mettre en évidence plusieurs points importants à prendre en considération pour une meilleure gestion des risques dans les industries qui dépendent des métaux. Parmi ces points, le processus SCRM est réaffirmé comme la colonne vertébrale de la gestion des risques et la cartographie est identifiée comme une étape préliminaire indispensable. De plus, les résultats soulignent que le réseau d'approvisionnement et les fournisseurs représentent le périmètre d'analyse le plus problématique.

Cependant, des lacunes ont été identifiées. Tout d'abord, l'absence méthodologie structurée de cartographie et aucune précision n'est donnée sur la collecte des données nécessaires à cette cartographie. De plus, bien que de nombreux risques aient été étudiés, il n'existe pas de proposition de catégorisation des risques spécifique aux industries dépendantes des métaux.

Enfin, l'absence de prise en compte des éléments spécifiques aux activités minières et au processus de transformation des métaux ne sont pas considéré les approches proposées.

Les résultats de cette première phase exploratoire renforcent la nécessité de développer de nouvelles approches adaptées aux industries qui dépendent des métaux. Ces approches doivent prendre en compte les lacunes identifiées concernant la cartographie, la catégorisation des risques et l'intégration des préoccupations spécifiques aux activités minières et au processus de transformation des métaux. De ce fait, une nouvelle phase exploratoire a été entreprise. Elle est axée sur le contexte de l'approvisionnement des métaux et des crises qui lui sont liées.

4 Phase exploratoire relative à l'approvisionnement en métaux

4.1 Introduction

Les résultats de la partie N° 3 ont soulevé des interrogations quant à la pertinence de l'état actuel du Supply Chain Risk Management (SCRM) pour répondre intégralement à notre question de recherche générale. De ce fait, ce projet de recherche explore une voie différente visant à combler les lacunes identifiées et à fournir des solutions plus adaptées pour relever les défis liés à la sécurisation de l'approvisionnement en métaux. L'objectif de cette phase exploratoire est donc d'identifier les éléments manquants qui intègrent les spécificités du contexte unique de l'approvisionnement en métaux.

Ainsi, cette partie se décompose en deux chapitres. Le chapitre N° 6 analysera les crises passées liées à l'approvisionnement en métaux et identifiera le concept de criticité des matériaux comme un facteur clé dans la gestion des risques. Ensuite, dans le chapitre N°7, ce concept fera l'objet d'une revue de littérature systématique afin d'identifier les éléments pertinents à la conception de notre méthodologie.

4.2 Exploration des crises liées à l'approvisionnement en métaux

4.2.1 Introduction

Dans le contexte incertain de l'approvisionnement des métaux, le cadre existant du SCRM montre des limites quant à sa capacité à traiter ce contexte complexe. Pour donner suite aux lacunes identifiées dans la partie N°3 du manuscrit, une nouvelle voie de recherche a été choisie. Cette dernière est basée sur l'étude des crises passées liées à l'approvisionnement des métaux.

L'objectif de ce chapitre est de présenter une analyse de trois crises majeures ayant marqué l'histoire de l'approvisionnement des métaux. De plus, il nous permettra d'identifier les facteurs et événements ayant contribué à l'apparition de ces crises. Ainsi, l'ensemble de cette analyse vise à compléter la conception de notre méthodologie.

4.2.2 Méthode de recherche

Les préoccupations liées à la perturbation de l'approvisionnement des ressources ne sont pas seulement théoriques, car leur concrétisation a été observée au cours des dernières décennies, avec l'apparition de crises entraînant des perturbations graves dans l'approvisionnement mondial en métaux. Ainsi, cette étape vise à examiner trois crises majeures ayant affecté l'approvisionnement des métaux au niveau mondial et ayant impacté plusieurs industries, à savoir la crise du cobalt, la crise du palladium et la crise des terres rares.

Ce choix découle du fait que les risques sont des événements susceptibles de perturber le fonctionnement normal de la chaîne d'approvisionnement, tandis que les crises sont des situations critiques résultant de la matérialisation de ces risques (Kuipers et al., 2018). En d'autres termes, la crise se produit lorsque les risques se concrétisent. Cette matérialisation des risques sous forme de crise est le résultat de deux processus : le processus d'accumulation de fragilité favorisant l'émergence de la crise, et le processus d'accumulation d'ignorance managériale qui pousse les décideurs à négliger l'existence de vulnérabilités jusqu'à ce qu'un

déséquilibre survienne (Roux-Dufort, 2015). Par conséquent, les acteurs de la chaîne d'approvisionnement peuvent être aveugles face aux risques émergents.

Ainsi, étudier la concrétisation des risques sous forme de crises permettra d'étudier le contexte de l'approvisionnement des métaux non sous forme d'incertitudes, mais sous forme d'événements réels. Cette approche apportera des pistes pour la construction d'une méthodologie adaptée aux industries qui dépendent des métaux.

4.2.3 Analyse des crises dans la chaîne d'approvisionnement en métaux : vulnérabilités et Solutions

Pour chaque crise, l'analyse portera sur les événements précédant ces crises, les événements ayant exacerbé cette crise et leurs conséquences sur le marché des métaux et les différentes industries dépendantes du métal concerné. De plus, elle mettra en évidence les actions entreprises pour empêcher leur future réapparition.

4.2.3.1 La crise du cobalt (1977-1979)

Une première crise du cobalt est survenue entre 1977 et 1979. Le cobalt est un métal utilisé dans divers secteurs industriels tels que l'aéronautique, les turbines, les aimants et les outils de coupe (Alonso et al., 2007). A l'époque de cette crise, le cobalt était principalement produit par la Zambie et le Zaïre avec 17 786 tonnes de cobalt, qui représentaient une part importante de la production mondiale qui était de 26 026 tonnes à cette époque (Kummer, 1980). En outre, les principaux gisements de cobalt se trouvaient dans la province méridionale du Shaba et son exportation se faisait principalement via le chemin de fer de Benguela, qui traversait l'Angola (Alonso et al., 2007).

Pour comprendre la crise du cobalt, il est pertinent d'examiner l'évolution des prix du cobalt au fil du temps, en utilisant les données de l'Annuaire des minéraux de cobalt de l'USGS (United States Geological Survey), comme présenté dans l'article de (Gulley, 2022). La crise du cobalt

fait référence à la période entre 1977 et 1979 où les prix du cobalt ont connu une augmentation spectaculaire de 380% (voir figure N°13) (Alonso et al., 2007).

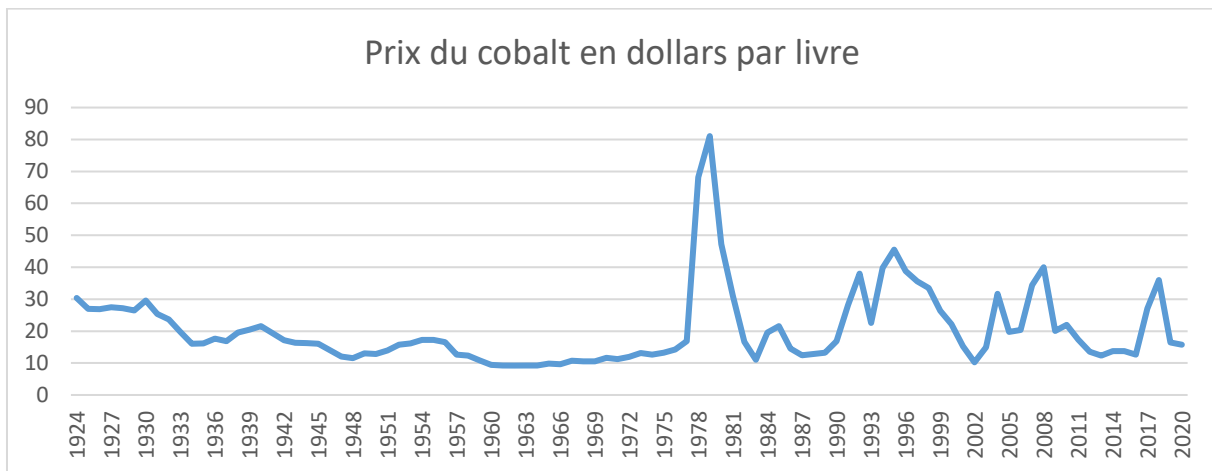


Figure 13 : Evolution du prix du cobalt (1924-2010)

La crise du cobalt peut être divisée en trois phases distinctes : les événements qui ont précédé la crise, ceux qui l'ont déclenchée et se sont produits pendant la crise, ainsi que les développements survenus après la crise.

Avant la crise

- Des insurgés angolais soutenus par des pays communistes, dont l'Union soviétique, ont pris le contrôle de certaines parties de la province de Shaba au Zaïre (Alonso et al., 2007).
- L'Union soviétique a acheté une grande partie des stocks mondiaux de cobalt juste avant le début des invasions (Gulley, 2022).

Début de la crise (mai 1978)

- Les insurgés angolais ont coupé la principale ligne électrique desservant les installations minières de cobalt pendant environ 5 jours.
- Environ 200 expatriés européens travaillant comme entrepreneurs miniers ont été tués.

Durant la crise

- Les installations de production de cobalt n'ont subi que peu de dommages (Gulley, 2022).
- Le Zaïre a réussi à produire plus de cobalt en 1978 que la moyenne annuelle des années précédentes (Alonso et al., 2007).
- Les rebelles ont été temporairement vaincus par l'armée congolaise, mais ils sont revenus en 1979 (Gulley, 2022)
- Les pays occidentaux ont intensifié leurs inquiétudes quant à la capture du marché du cobalt par l'Union soviétique (Gulley, 2022).
- La croissance économique mondiale a entraîné une augmentation de la demande de cobalt, ont entraîné un niveau record de consommation en 1978.
- Des craintes de pénuries d'approvisionnement, ainsi que les retards réels dans le transport du cobalt vers les pays occidentaux, ont entraîné une spéculation (Alonso et al., 2007; Jin, 2017).
- Les prix du cobalt ont connu une flambée en 1979, atteignant des niveaux record.

Les prix ont baissé en 1980 à mesure que les conflits s'apaisaient, que la demande chutait par rapport à son pic et qu'il devenait évident que les consommateurs avaient constitué d'importants stocks de cobalt (Gulley, 2022).

Après la crise, plusieurs développements et changements ont été observés.

- Réduction des délais d'approvisionnement en utilisant le transport aérien pour compenser les troubles politiques (Alonso et al., 2007)

- Des substituts ont été développés pour remplacer le cobalt dans certaines applications, tels que les aimants, les outils de coupe, les céramiques et les peintures. (Alonso et al., 2007) (Jin, 2017).
- Il y a eu une réduction de l'utilisation du cobalt dans la fabrication d'aimants (Alonso et al., 2007).
- Développement d'un processus de recyclage pour les superalliages de rebut, permettant une récupération accrue du cobalt (Alonso et al., 2007).
- Augmentation de la capacité de production primaire de cobalt en Zambie et en Australie, réduisant ainsi l'importance de l'exploitation minière du cobalt au Zaïre (Alonso et al., 2007).

La "crise du cobalt" est le résultat d'une convergence de plusieurs facteurs, tels que l'instabilité politique, les conflits armés, la croissance économique mondiale, la demande croissante de cobalt, le stockage massif du cobalt et la spéculation sur le marché. Ces éléments ont contribué à la durée et à l'ampleur de la crise entraînant des répercussions significatives sur la disponibilité et le prix du cobalt.

L'instabilité politique et les conflits ont perturbé la production et les flux d'approvisionnement en cobalt, tandis que la croissance économique mondiale et la demande croissante ont exercé une pression supplémentaire sur les ressources de cobalt. La spéculation sur le marché et le stockage massif de cobalt ont amplifié les fluctuations des prix.

Pour faire face à cette crise, des mesures ont été mises en place pour atténuer ses effets. Ces actions visent à diversifier les sources d'approvisionnement en cobalt et à développer des substituts, afin de réduire la dépendance à ce métal.

4.2.3.2 La crise du palladium

Le palladium est un métal rare utilisé dans l'industrie automobile pour la fabrication de pots catalytiques. En l'an 2000, ce métal a connu une crise de l'offre. A cette époque, la Russie était le principal pays exportateur de palladium, représentant environ 46 % de l'offre mondiale.

La crise du palladium dans l'année 2000 a eu un impact significatif sur le marché, sous forme d'augmentation du prix du palladium (Hocquard and Samama, 2012) (voir figure N°14).

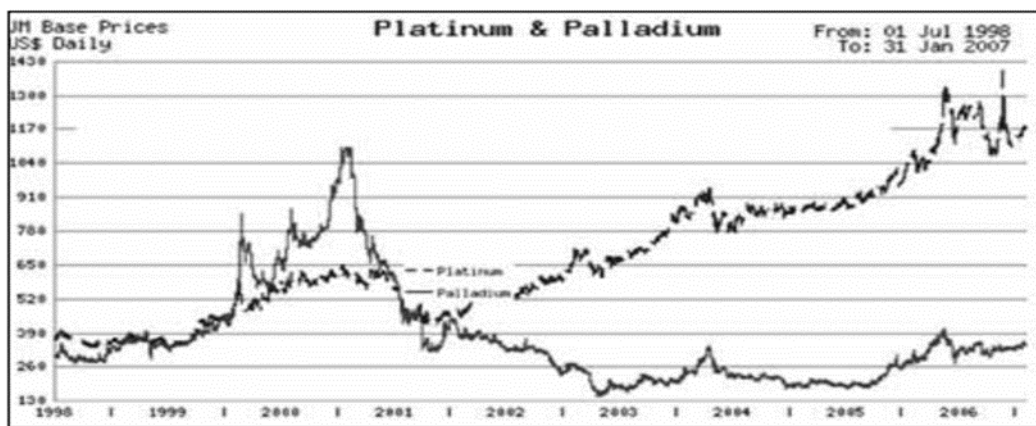


Figure 14 : Evolution du prix du palladium et platinium (1998-2006)

Voici l'organisation des événements avant, pendant et après la crise selon (Poulizac, 2013).

Avant la crise

- Les prix du palladium ont historiquement été inférieurs à ceux du platine.
- Les fabricants de voitures ont progressivement modifié la conception des convertisseurs catalytiques afin d'utiliser le palladium à la place du platine.
- En 1997, les fabricants de voitures ont accepté des normes d'émissions plus strictes, ce qui a entraîné une augmentation significative de l'utilisation de palladium dans leurs produits.

Pendant la crise

- La Russie, principal exportateur de palladium, a décidé de geler ses exportations jusqu'au début du printemps, créant ainsi une pénurie sur le marché.
- Les constructeurs automobiles, ont augmenté leur demande de palladium pour atténuer le risque de perturbation future et ont accumulé des stocks de métal.
- La spéculation a également contribué à augmenter la pression sur le marché et les prix ont augmenté.

Après la crise

- Lorsque la perturbation de l'approvisionnement attendue ne s'est pas produite et que la demande s'est détournée du palladium, le prix du palladium a chuté brusquement.
- Les fabricants qui détenaient de grands stocks inutilisés de palladium ont subi d'importantes pertes.
- Certains fabricants ont modifié leur conception pour réduire leur dépendance au palladium.
- Le gouvernement russe a autorisé des contrats à long terme avec les constructeurs automobiles pour apaiser la panique sur le marché et a levé les quotas sur les exportations primaires.
- De nouvelles sources d'approvisionnement sont apparues, contribuant à réduire la concentration du marché comme le développement des mines nord-américaines pour réduire la concentration du marché.

La crise du palladium est le résultat de la combinaison de plusieurs facteurs. Premièrement, une augmentation de la demande de palladium due aux modifications dans la conception des

convertisseurs catalytiques. Deuxièmement, les réductions des exportations russes accompagnées d'un manque d'informations sur les quotas décidés par le gouvernement russe, ont augmenté la volatilité du marché. Troisièmement, la spéculation, car les investisseurs ont profité de cette situation pour spéculer sur la hausse des prix du palladium. Enfin, le stockage massif du palladium par les fabricant comme stratégie pour sécuriser leur approvisionnement a eu un impact négatif, car la crise s'est atténuée et que la demande a diminué. Ceci a engendré des pertes financières catastrophiques.

À la suite de cette crise, plusieurs actions ont été entreprises. Ils concernent l'augmentation de la disponibilité de la ressource, la substitution visant à diminuer la dépendance au palladium, ainsi que l'établissement de contrats à long terme entre le pays producteur (la Russie) et les industriels.

4.2.3.3 La crise des terres rares

Les terres rares sont un groupe de 17 éléments métalliques présents dans le tableau périodique, comprenant du scandium, de l'yttrium et de quinze lanthanides. Ces terres rares possèdent des propriétés optiques, électriques et magnétiques qui les rend important dans plusieurs industries de haute technologie. Ainsi, elles sont utilisées dans la fabrication de semi-conducteurs, d'aimants et de matériaux luminescents et dans d'autres applications (Jin, 2017).

Depuis 1995, la Chine dominait la production mondiale de terres rares avec une part de marché allant de 85 % à 95 % de la production mondiale. Cependant, les terres rares ne sont pas réellement rares en termes de disponibilité géologique, car il existe des gisements dans de nombreux pays, dans le milieu marin et sur la Lune (Jin, 2017).

La crise des terres rares fait référence à la période entre 2010 et 2011 quand la Chine a réduit ses exportations de terres rares vers le Japon, à la suite d'un conflit géopolitique. Cette décision a entraîné la perturbation de l'approvisionnement mondial en terres rares, accompagné d'une

augmentation des prix et suscité une prise de conscience de la vulnérabilité de plusieurs pays et leurs industries vis-à-vis de l'approvisionnement en métaux rares (Jin, 2017).

Afin d'identifier les facteurs ayant conduit à cette crise, nous présenterons ci-après le déroulement chronologique des événements, avant, pendant et après la crise (Boudia, 2019) (Jin, 2017).

Avant la crise

1. En 2005, la Chine annonce son intention d'instaurer des quotas d'exportation pour les terres rares (Boudia, 2019).
2. Avant cette annonce, la production mondiale de terres rares était en augmentation constante, atteignant un pic entre 142 000 et 159 000 tonnes en 2010, dont la Chine fournissait entre 85 % et 90 % (Boudia, 2019).
3. En 2009, la Chine réduit ses exportations de terres rares de manière significative, mettant en place des quotas et des taxes d'exportation (Boudia, 2019).

Pendant la crise

- En septembre 2010, une crise diplomatique entre la Chine et le Japon éclate dans le cadre du conflit territorial des îles Senkaku. Le Japon affirme que la Chine a suspendu toutes ses livraisons de terres rares en représailles, ce qui entraîne une augmentation des achats mondiaux et une flambée des prix. (Boudia, 2019). Sachant qu'en 2010, environ 90 % de l'approvisionnement en terres rares du Japon provenait de Chine. (Jin, 2017)
- Entre septembre 2010 et août 2011, les prix des terres rares augmentent doublant en moyenne et atteignant des hausses de plus de 1 000 % pour certains métaux (Boudia, 2019).

Après la crise

- Le Japon crée un fonds pour soutenir ses industries dépendantes de terres rares. De plus, il a financé la recherche de nouveaux gisements et a développé des procédés d'extraction et de recyclage (Boudia, 2019).
- La Commission européenne et le Département de l'Énergie des États-Unis ont ajouté les terres rares à leur liste des matériaux critiques en 2010.
- L'Union européenne établit une stratégie pour les matériaux critiques et la France met en place un plan d'action pour les métaux stratégiques (Boudia, 2019).
- Les États-Unis augmentent les efforts de recherche, multiplient les contacts diplomatiques pour trouver de nouvelles sources d'approvisionnement et développent des politiques de recyclage et de substitution des terres rares (Boudia, 2019).
- Cet événement a accéléré la recherche sur la criticité (Jin, 2017) et des budgets sont alloués à la recherche et au développement des matériaux critiques, et des actions de coordination sont mises en place pour faciliter les actions des différentes agences gouvernementales (Boudia, 2019).
- En 2012, les États-Unis ont déposé une plainte à l'Organisation mondiale du commerce contre les restrictions à l'exportation de la Chine sur les terres rares, avec le soutien de 18 autres pays (Jin, 2017) (Boudia, 2019).

Cette crise est la conséquence directe des décisions prises par le producteur dominant du marché (la Chine) pour restreindre les exportations de ces métaux. Toutefois, le moment clé de cette crise est la suspension des livraisons des terres rares vers le Japon en 2010. C'est le moment qui a entraîné la flambée des prix et sonné l'alerte auprès des autres pays les incitant à prendre des décisions pour protéger leur industrie. Outre des décisions à long terme comme la recherche

et le développement de substitution et de recyclage ainsi que la recherche de nouveaux gisements, une mesure phare a été adoptée par plusieurs pays qui est de considérer les terres rares comme des matières critiques et de stimuler la recherche sur la criticité des terres rares (Jin, 2017).

4.2.3.4 Discussion

Les métaux tels que le cobalt, le palladium et les terres rares jouent un rôle essentiel dans plusieurs industries. Par conséquent, la perturbation majeure de leur approvisionnement mondial, qualifiée de « crise » a capté l'attention des médias et des gouvernements en raison de leur impact significatif sur de nombreux secteurs économiques. Ces crises sont la conséquence de l'interaction de plusieurs facteurs qui peuvent être technologiques, géopolitiques ou économiques.

L'analyse des crises dans la chaîne d'approvisionnement des métaux a permis de mieux comprendre les vulnérabilités du réseau d'approvisionnement et les défis auxquels sont confrontées les industries dépendantes de ces ressources ainsi que les entreprises qui sont les principaux acheteurs.

Au cours des décennies précédentes, l'approche adoptée pour faire face à ces crises consistait à gérer les crises au cas par cas et à réagir au moment de la crise. De plus, des mesures étaient prises pour atténuer et prévenir les futures crises similaires en se focalisant sur la matière première concernée.

La crise des terres rares marque un tournant dans l'approche de la problématique de l'approvisionnement en matières premières. Plutôt que de se focaliser uniquement sur la gestion des crises une fois qu'elles surviennent, les gouvernements ont pris conscience de l'importance d'une approche proactive. Cette nouvelle approche prend notamment la forme d'études sur la criticité des matériaux.

Dans ce qui suit, nous allons présenter l'émergence de la criticité des matières premières, ainsi que les initiatives gouvernementales qui ont contribué à encadrer et à légitimer l'évaluation de la criticité des matières comme outil décisionnel gouvernemental. Par la suite, nous présenterons une argumentation positionnant la criticité des matières premières comme le maillon manquant et nécessaire pour atteindre notre objectif de recherche.

4.2.3.5 Evaluation de la criticité des matières premières : une nouvelle approche proactive face aux crises

L'étude des crises dans la chaîne d'approvisionnement en métaux a relevé un point important, à savoir les initiatives gouvernementales sur l'étude de la criticité des matières. Ce point est évoqué dans la crise des terres rares, lors de laquelle la Commission européenne en Europe et le Département de l'Énergie aux États-Unis ont pris des mesures pour accélérer les recherches concernant les matériaux critiques.

Dans cette section, nous examinons l'émergence des études de criticité des matières premières et décrivons les méthodologies d'évaluation de cette criticité qui découlent des initiatives gouvernementales américaine et européenne.

4.2.3.5.1 L'émergence des études de criticité des matières premières

Selon les informations provenant du site français du BRGM, MinéralInfo, l'émergence des études de criticité des matières premières remonte au milieu des années 2000. En 2007, les États-Unis ont initié des études sur les matières premières minérales critiques pour leur économie. Parmi ces études figurent les rapport du département de l'état (US Department of State, 2012) et du conseil de recherche national (National Research Council, 2008a).

En 2008, la Commission européenne a adopté la "[Raw Material Initiative](#)" dans le but de définir une stratégie pour assurer l'accès de l'union européenne aux matières premières. La première liste de matières premières critiques a été publiée en 2010, puis mise à jour en 2014, 2017 et

2020. Parallèlement, d'autres pays ont également réalisé des études de criticité des matières premières comme le Royaume-Uni (BGS) (Morley and Eatherley, 2008) et l'Allemagne (BGR, Fraunhofer Institute) (Erdmann et al., 2011).

Ces études de criticité ont pour objectif de déterminer les matières premières minérales essentielles pour l'économie, mais sujettes à des tensions géopolitiques ou liées à des capacités de production limitées (Fizaine and Galiègue, 2021). Elles ont été initiées suite aux préoccupations croissantes concernant la dépendance à l'égard de l'approvisionnement étranger pour accéder à certaines ressources.

Le graphique présenté dans l'article intitulé "Substances critiques et stratégiques" publié sur le site français de BRGM, MinéralInfo, met en évidence l'évolution chronologique de la prise de conscience de la criticité des matières premières, en corrélation avec l'évolution des prix des métaux de base tels que l'aluminium, le cuivre, le nickel, le plomb, le zinc et les minerais de fer provenant de la Banque mondiale par rapport aux années (voir figure N° 15). Il démontre que cette prise de conscience s'est renforcée au milieu des années 2000, en même temps que l'augmentation des prix et la croissance économique rapide de la Chine, ainsi que la mise en place de quotas d'exportation chinois pour les terres rares.

L'analyse de ces tendances, en prenant en compte une perspective française, a également révélé que les préoccupations concernant l'approvisionnement en métaux n'ont pas été constantes. Par exemple, en 1975, la France a lancé le plan cuivre et a établi un inventaire minier national. Cependant, entre 1990 et 2002, les inquiétudes concernant l'approvisionnement en métaux ont été reléguées au second plan. Pendant cette période, la France a eu confiance dans le marché mondialisé pour assurer l'approvisionnement en matières premières et a pris des décisions de fermeture de mines métalliques sur son territoire. Cependant, avec l'accélération de la croissance économique de la Chine, les préoccupations se sont accentuées, ce qui a conduit à

des actions proactives sous la forme d'études sur la criticité des matières initiées par plusieurs gouvernements.

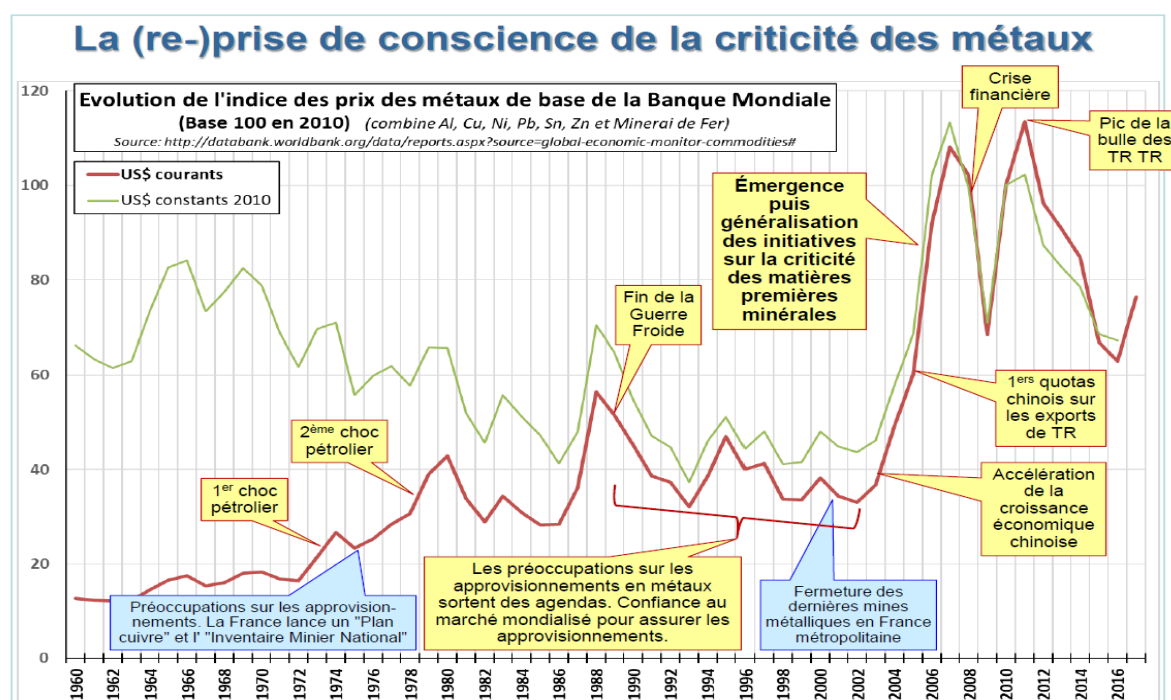


Figure 15 : la (re-)prise de conscience de la criticité des métaux : *Substances critiques et stratégiques* |source : *MineralInfo*

L'émergence de la criticité des matières premières est le fruit de la prise de conscience croissante de la dépendance des économies modernes vis-à-vis de certaines ressources. Les études de criticité des matières ont été initiées avant la crise des terres rares, mais c'est cette dernière qui a renforcé leur légitimité.

Dans la suite de notre recherche, nous examinerons en détail ces initiatives pour mieux comprendre leur impact sur la gestion proactive des risques d'approvisionnement en métaux.

4.2.3.6 Les initiatives gouvernementales liées à la criticité des matières premières

Cette section examine les initiatives gouvernementales liées à la criticité des matières. Elle présente deux études spécifiques, l'une réalisée aux États-Unis et l'autre par la Commission européenne.

4.2.3.6.1 La criticité des matières premières : l'initiative américaine

Cette initiative est détaillée dans un rapport de 300 pages intitulé "Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy" (National Research Council, 2008b), publié par le département de l'énergie des États-Unis. Ce rapport est le fruit de la collaboration entre des experts de divers domaines tels que la géologie, l'économie, la métallurgie, les statistiques, les politiques et le recyclage, issus du milieu universitaire, de l'industrie, du secteur fédéral et de Ressources naturelles Canada.

Ce rapport propose un cadre d'évaluation de la criticité des minéraux non combustibles en examinant leur importance dans la société américaine, ainsi que les contraintes géologiques, technologiques, économiques et politiques qui influencent leur disponibilité.

4.2.3.6.1.1 Définition des matières critiques

Le terme "critique" a été utilisé pour la première fois dans le langage juridique aux États-Unis dans la loi sur l'entreposage des matériaux stratégiques et critiques de 1939. À cette époque, les matériaux stratégiques et critiques étaient définis comme ceux nécessaires pour répondre aux besoins militaires, industriels et civils essentiels des États-Unis en cas d'urgence nationale, et qui ne sont pas disponibles en quantité suffisante sur le territoire national. Aucune distinction spécifique entre "stratégique" et "critique" n'a été alors faite.

Par la suite, une distinction a été établie en suggérant que les matériaux utilisés à des fins militaires sont considérés comme stratégiques, tandis que ceux pour lesquels une menace d'approvisionnement étranger pourrait nuire à l'économie nationale sont considérés comme critiques (Evans, 1993, cité dans DeYoung et al., 2006). Selon ces définitions, un matériau critique peut être stratégique ou non, tandis qu'un minéral stratégique sera toujours considéré comme critique.

Ainsi, une matière critique c'est une matière essentielle et exposée à des restrictions d'approvisionnement.

4.2.3.6.1.2 *Le cadre d'évaluation de la criticité*

Les experts de cette étude (National Research Council, 2008b), ont développé une matrice à deux dimensions regroupant plusieurs indicateurs pour évaluer la criticité des matériaux (voir figure N°16). Cette matrice comporte un axe vertical qui représente l'importance dans l'utilisation et l'impact d'une restriction de l'approvisionnement, tandis que l'axe horizontal représente la disponibilité et reflète le risque d'approvisionnement. Les minéraux sont positionnés sur la matrice en fonction de l'évaluation de ces deux dimensions. Le degré de criticité augmente en se déplaçant du coin inférieur gauche au coin supérieur droit de la matrice.

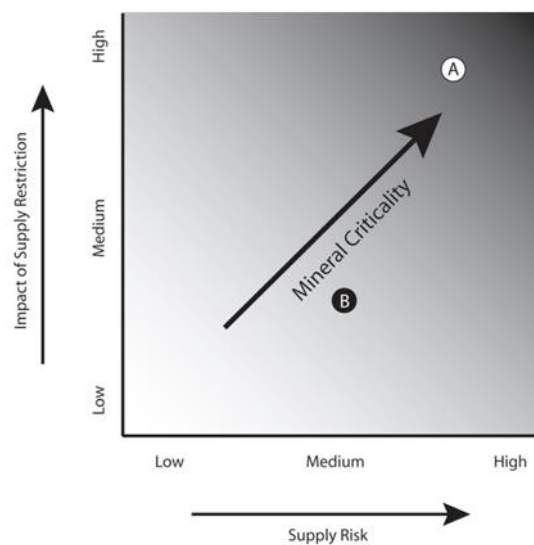


Figure 16 : matrice de criticité des matières premières (National Research Council, 2008b)

L'évaluation utilisée pour la matrice repose sur une échelle semi-qualitative, allant de 1 (faible) à 4 (élevée). Le placement réel d'un minéral sur les deux axes représente le jugement du comité plutôt que le résultat d'une méthode d'analyse quantitative.

Lors de l'application de cette méthodologie, il est important de prendre en compte trois périodes d'ajustement : court terme, moyen terme et long terme. Le temps est une considération importante dans les deux dimensions de la criticité.

A- Axe horizontal : la disponibilité et la fiabilité de l'approvisionnement

La perturbation de l'approvisionnement en minéraux peut prendre différentes formes, soit une indisponibilité physique du minéral, soit une augmentation des prix. Le positionnement d'un minéral sur l'axe horizontal dépend principalement de la dimension temporelle. Il faut déterminer si la préoccupation porte sur la disponibilité à long terme qui reflète des périodes d'une décennie ou plus, ou sur la probabilité de perturbations à court terme qui reflète une durée de semaines, de mois ou de quelques années.

Sur cet axe horizontal, c'est la restriction de la disponibilité et les défaillances de l'approvisionnement qui sont étudiées.

- La disponibilité : une préoccupation à long terme

La disponibilité des minéraux est une préoccupation à long terme pour la société. La matière peut être obtenue à partir de deux sources principales : l'extraction et le traitement minier (source primaire) ou la récupération de matériaux (source secondaire).

Le comité a identifié cinq facteurs déterminants pour évaluer la disponibilité des minéraux de source primaire : la géologie, la technologie, l'environnement et le social, la politique, et l'économie.

- La dimension géologique se concentre sur l'existence de la ressource minérale, en examinant les zones géologiquement favorables, les concentrations, les qualités, les volumes et la géométrie des gisements.

- La dimension technique évalue la capacité à extraire et à traiter la ressource minérale, en tenant compte de l'état de la technologie et des connaissances nécessaires pour ces opérations.
- La dimension environnementale et sociale analyse la possibilité de produire la ressource de manière acceptable sur les plans environnemental et social. Cela inclut la préservation des espèces en voie de disparition, la qualité de l'eau et de l'air, ainsi que l'acceptation de la communauté envers le développement des ressources. Cette dimension est également connue sous le terme de "licence sociale d'exploitation".
- La dimension politique examine l'influence des politiques et des actions gouvernementales sur la disponibilité des minéraux. Cela concerne la législation, les règles et les réglementations qui affectent l'investissement dans l'exploration minière et le développement des mines, ainsi que les risques et les conséquences liés aux changements de ces politiques.
- La dimension économique se concentre sur la capacité à produire la ressource à un coût acceptable pour les utilisateurs. Cela implique d'évaluer le coût de la découverte du gisement, de l'extraction, du traitement, de la concentration et de la purification des minéraux par rapport à leur valeur marchande. La disponibilité d'une main-d'œuvre qualifiée est également un facteur crucial dans la disponibilité économique.

Ces cinq facteurs permettent de distinguer entre une ressource non découverte, une ressource identifiée et une réserve. Ainsi, pour qu'une ressource soit considérée comme une réserve, elle doit présenter une disponibilité géologique, technique, politique, environnementale, sociale et économique.

- **La fiabilité de l'approvisionnement : une préoccupation à court et moyen terme**

La fiabilité de l'approvisionnement en minéraux est une préoccupation à court et moyen terme, englobant une période allant de quelques mois à 10 ans. Plusieurs facteurs ont été identifiés pour évaluer le risque d'approvisionnement :

- Augmentation significative et imprévue de la demande : Si la demande augmente de manière importante et inattendue, et si la production est déjà proche de sa capacité maximale, cela peut entraîner une indisponibilité physique du minéral ou une augmentation significative des prix.
- Marchés relativement étroits ou petits : Les petits marchés peuvent rencontrer des difficultés pour augmenter rapidement leur production en cas d'augmentation significative de la demande.
- Concentration de la production : Si la production est concentrée dans un petit nombre de mines, de pays producteurs ou d'entreprises, l'approvisionnement peut être sujet à des restrictions en cas de problèmes techniques, de décisions politiques ou de comportements opportunistes des entreprises ayant un pouvoir de marché. L'indice de Herfindahl-Hirschman (HHI) est utilisé pour mesurer la concentration sur un marché donné. Plus la concentration sur un marché est élevée, plus le nombre d'indice est élevé. Le département de la Justice des États-Unis considère que les marchés dont les indices se situent entre 1000 et 1800 sont modérément concentrés et ceux dont les indices sont supérieurs à 1800 sont concentrés.
- Approvisionnement basé sur des sous-produits : Les minéraux dont l'approvisionnement dépend principalement de la production de sous-produits peuvent être plus vulnérables ou risqués, car la disponibilité du sous-produit est largement déterminée par la disponibilité du produit principal.

- Absence de récupération significative de matériaux à partir de vieux déchets : Les marchés qui ne récupèrent pas de manière significative des matériaux à partir de vieux déchets peuvent être plus exposés au risque d'approvisionnement que les autres.

D'autres facteurs, tels que le ratio réserves-production et le ratio de la base des réserves par rapport à la production, ainsi que la dépendance aux importations, sont également considérés, bien que leur importance relative soit moindre et doivent être interprétés avec précaution.

B- L'axe vertical : Importance dans l'utilisation ou impact d'une restriction d'approvisionnement

Le raisonnement appliqué dans l'évaluation de cet axe est le suivant : plus le coût ou l'impact d'une restriction dans l'approvisionnement d'un minéral est élevé, plus le minéral est considéré comme important. Le comité a identifié la substitution comme le concept clé pour positionner le minéral sur l'axe vertical. La facilité de substitution détermine le degré d'importance d'un minéral dans son utilisation. Le concept de substituabilité revêt à la fois une signification technique et économique. Un substitut technique doit offrir des performances similaires ou équivalentes au minéral qu'il remplace. Toutefois, pour être considéré comme un substitut économique, le minéral de substitution doit offrir des performances similaires ou équivalentes à des coûts similaires ou inférieurs.

C- Source d'informations

Le comité considère que le Service géologique des États-Unis (USGS) est la source d'informations la plus complète en matière de minéraux, tant au niveau national qu'international. L'équipe des informations minérales de l'USGS collecte, analyse et diffuse des informations sur l'approvisionnement en minéraux essentiels à l'économie et à la sécurité nationale du pays.

Parallèlement, le comité a identifié d'autres sources d'informations telles que les thèses universitaires, les publications commerciales et universitaires, ainsi que les services géologiques gouvernementaux nationaux et internationaux. Ces sources peuvent contenir des données pour compléter l'analyse des minéraux critiques.

Le comité considère que l'USGS est une source d'informations complète aux États-Unis. Il souligne également que les bases de données sur les minéraux disponibles pour la prise de décision sont limitées. Des améliorations sont nécessaires pour renforcer la collecte et la diffusion d'informations sur les minéraux.

4.2.3.6.2 La criticité des matières premières : l'initiative de la commission européenne

La commission européenne est à l'origine d'une étude de la criticité des matières premières dédiée au continent européen. Publiée en 2010 sous forme d'un rapport intitulé "Commission européenne, Matières premières critiques pour l'UE, Rapport du Groupe de travail ad hoc sur la définition des matières premières critiques, 2010, vol. 39" (Commission, 2010). Cette étude est le fruit de la collaboration d'un groupe d'experts issus des ministères nationaux, des services géologiques, des industries extractives et aval, ainsi que d'autres parties prenantes.

L'une des motivations derrière cette étude est la situation de l'Europe liée à la production minière et ses besoins croissants pour soutenir la croissance économique. En d'autres termes, l'Europe fait face à des niveaux d'extraction minérale relativement faibles et dépend fortement des importations. Par conséquent, assurer un approvisionnement sûr en matières premières est essentiel pour soutenir ses industries (Bedder, 2015).

L'objectif de cette étude de criticité est de définir le rôle des matières premières pour l'Union européenne, de hiérarchiser les besoins et d'élaborer des stratégies pour garantir un accès fiable à ces matières premières. Elle vise également à identifier les actions à entreprendre, telles que

le lancement de nouvelles activités minières et de recyclage, l'élaboration de législations et l'orientation de la recherche et de l'innovation (Schrijvers et al., 2020).

Le résultat de cette étude se présente sous la forme d'une liste de matières premières critiques. Pour ce faire, l'étude a pris en compte une période de dix ans dans son analyse (Mancini et al., 2013).

4.2.3.6.2.1 Définition des matières critiques

Dans cette étude une matière est définie comme critique lorsque les risques de pénurie d'approvisionnement et leurs impacts sur l'économie sont plus élevés que pour la plupart des autres matières premières.

4.2.3.6.2.2 Le cadre d'évaluation de la criticité

Le groupe d'experts propose une méthodologie quantitative qui repose sur trois dimensions principales : a) l'importance économique, b) le risque d'approvisionnement et c) le risque environnemental lié aux pays.

A- L'importance économique

Évaluer l'importance économique implique une étude de l'utilisation de cette matière première dans différents secteurs économiques. Pour ce faire, les experts examinent comment elle est utilisée dans les processus de production et comment elle contribue à la création de valeur ajoutée dans les secteurs. Ceci permettra de mesurer son impact économique sur les secteurs.

En plus de cette analyse sectorielle, la méthodologie prend en compte la répartition de chaque utilisation de la matière première dans l'ensemble de l'économie de l'UE. Cela signifie qu'ils considèrent la part de chaque secteur économique utilisant cette matière première dans l'économie globale de l'UE. Ceci permettra de déterminer l'importance de cette matière première pour l'ensemble de l'économie de l'Union européenne.

En réalisant ces deux évaluations, il est possible de comprendre le rôle essentiel de cette matière première dans l'économie de l'UE.

B- Le risque d'approvisionnement

L'étude a pris en considération plusieurs facteurs qui peuvent influencer l'approvisionnement en matières premières :

- Le niveau de concentration de la production mondiale de matières premières : l'étude a utilisé l'indice de Herfindahl-Hirschman (HHI) sur deux ensembles de pays producteurs : les fournisseurs mondiaux et les pays d'où l'UE se procure les matières premières.
- La stabilité politique et économique des pays producteurs : l'étude utilise l'indicateur de gouvernance mondiale de la Banque mondiale. Cet indicateur prend en compte d'autres facteurs de la gouvernance : voix et responsabilité, stabilité politique et absence de violence/terrorisme, efficacité du gouvernement, qualité de la réglementation, état de droit et lutte contre la corruption (Mancini et al., 2013).
- HHI modifier : c'est un indicateur qui mesure la combinaison de l'instabilité politique et du niveau de concentration des pays producteurs.
- Le potentiel de substitution des matières premières : ce facteur est évalué en se basant sur un indice de substituabilité, estimé grâce à l'opinion des experts (Mancini et al., 2013). Quatre valeurs sont attribuées : 0 (substitution possible sans coût supplémentaire), 0,3 (substitution possible à un coût relativement faible), 0,7 (substitution possible à un coût élevé) et 1 (substitution impossible ou très difficile).
- Le taux de recyclage : le taux de recyclage est pris en compte car les matières premières recyclées constituent une source d'approvisionnement supplémentaire. Plus une matière

est recyclée dans l'UE, moins le risque d'approvisionnement est élevé (Mancini et al., 2013).

L'agrégation de ces facteurs a été réalisée à l'aide d'une formule qui combine la substituabilité, le taux de recyclage et l'indice de concentration Herfindahl-Hirschman (HHI) pour la production minière mondiale et HHI modifier (HHIWGI).

C- Le risque environnemental des pays

Cette dimension évalue la possibilité que les pays producteurs prennent des mesures de protection de l'environnement qui pourraient restreindre l'approvisionnement des matières premières.

Pour évaluer ce risque, l'Indice de Performance Environnementale (EPI) du pays producteur est utilisé, en prenant en compte les chiffres de production comme pondération. (Mancini et al., 2013). Ensuite, le risque environnemental des pays (EMi) est calculé en prenant en compte l'indice de performance environnementale (EPI) de chaque pays et la concentration des risques par pays, la substituabilité et le taux de recyclage.

D- La matrice de criticité

L'étude a utilisé une matrice de criticité pour évaluer les résultats obtenus (voir figure N° 17). Cette matrice se concentre principalement sur l'importance économique et les risques d'approvisionnement des matériaux. En fixant des seuils d'acceptabilité pour ces deux dimensions, elle permet de définir une zone de criticité. Ceci permet d'identifier les matériaux critiques et non critiques. Dans une étape secondaire, le risque environnemental associé aux pays est évalué séparément, et les résultats obtenus complètent la liste des matériaux critiques.

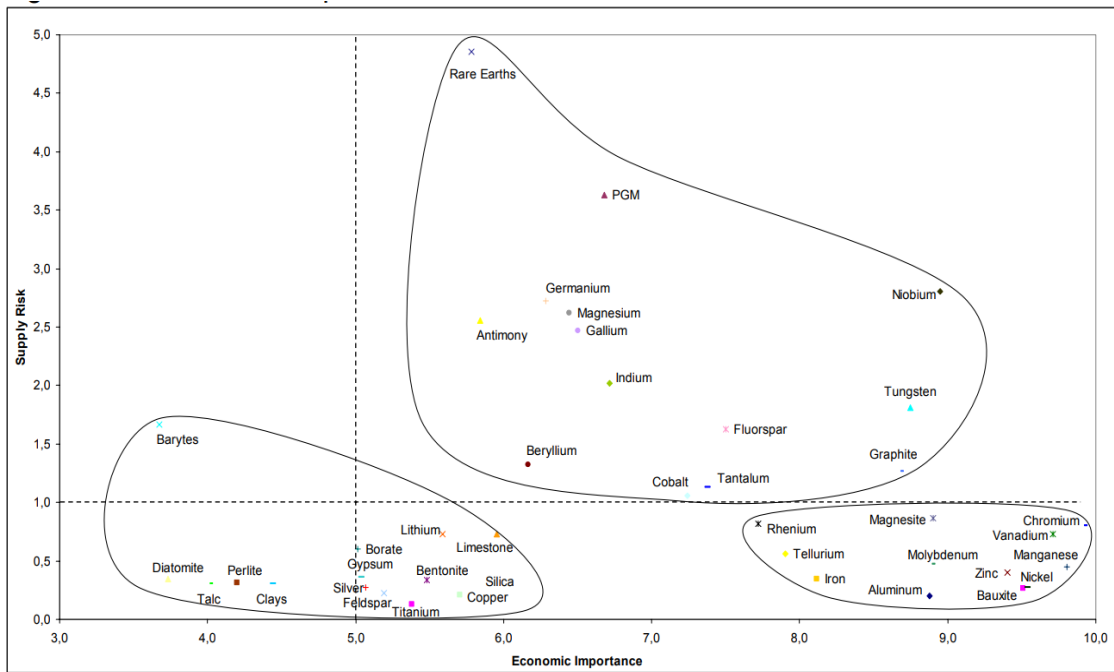


Figure 17 : matrice de criticité de la Commission européenne

La matrice principale est composée de deux axes : l'axe X reflète l'importance du matériau pour l'économie de l'UE, tandis que l'axe Y reflète les risques d'approvisionnement identifiés. Si un matériau est produit dans peu de pays marqués par une instabilité politique et économique, avec un faible taux de recyclage et une faible substituabilité, cela entraînera un risque d'approvisionnement très élevé pour ce matériau et sera plus critique.

E- Les données utilisées dans l'étude de la Commission européenne

Les sources de données utilisées comprennent des données officielles de l'UE, des données publiques provenant des autorités des États membres et des organisations internationales, telles que l'United States Geological Survey (USGS). En dernier recours, des avis d'experts ont été considérés. Pour renforcer cette approche quantitative, une évaluation qualitative a également été entreprise pour décrire les divers problèmes liés à l'accès aux matières premières pour l'UE.

4.2.3.6.3 Conclusion

L'initiative américaine a créé un cadre pour l'évaluation de la criticité des matières, en prenant en compte les préoccupations environnementales, géopolitiques, économiques et techniques liées à l'approvisionnement des métaux. Cette dernière a été suivie par l'initiative de la Commission européenne qui s'en est inspirée pour établir un cadre spécifique pour l'évaluation de la criticité des matières.

Les deux initiatives sont le résultat d'une collaboration d'experts et avaient pour objectif principal d'assurer un approvisionnement fiable en minéraux pour soutenir les industries des pays concernés. Ceci en établissant une liste de matières critiques et ensuite en établissant des stratégies gouvernementales et des recommandations afin de réduire cette criticité. Cependant, l'application de cette méthodologie est confrontée à des défis tels que l'obtention de données fiables, ce qui nécessite un financement adéquat et une bonne coordination entre les différentes agences responsables de la collecte de données, afin de mieux orienter et cibler les efforts pour assurer un approvisionnement fiable.

En s'appuyant sur les résultats de l'analyse des crises liées à l'approvisionnement des métaux et des initiatives gouvernementales, nous allons démontrer dans la partie suivante la pertinence de la criticité en tant que concept clé pour la conception de notre méthodologie.

4.2.3.7 L'importance de la criticité en tant que concept-clé pour la gestion des risques d'approvisionnement

Les préoccupations concernant les risques de l'approvisionnement des métaux ne sont pas simplement théoriques, car ces risques se sont matérialisés et plusieurs crises ont émergé avec des conséquences réelles. Cependant, ces inquiétudes se sont accrues avec la croissance économique de la Chine et sa domination sur le marché des terres rares.

Avant les années 2000, la gestion des crises d'approvisionnement se faisait au cas par cas et de manière réactive, c'est-à-dire que les gouvernements réagissaient aux crises pour en limiter l'impact et établissaient des plans pour prévenir de futures crises similaires en se focalisant sur la matière première concernée. Cependant, au milieu des années 2000, le regard porté sur les problématiques d'approvisionnement a changé. De nombreux gouvernements ont compris qu'une approche proactive globale était nécessaire incluant l'étude de l'ensemble des métaux et minéraux pour prévenir de nouvelles crises. Par conséquent, ce changement de perspective a conduit à la mise en place d'initiatives sous forme d'études sur la criticité des matières. Ces études bénéficient d'un soutien politique et financier, et sont menées par des experts.

Les deux études majeures sur ce sujet ont posé les fondations du concept de la criticité des matières. De plus, leurs résultats et recommandations ont eu un impact significatif sur l'orientation des décisions politiques, notamment concernant le financement de la recherche et du développement, l'identification des besoins en exploration et exploitation minière, et les changements réglementaires.

En mettant l'accent sur la criticité des matières premières, les gouvernements et les acteurs concernés cherchent à anticiper les risques d'approvisionnement, à identifier les matières essentielles pour l'économie et la société, et à élaborer des stratégies proactives pour garantir un approvisionnement stable et durable en ces ressources. Cette approche proactive est essentielle pour faire face aux défis actuels et futurs liés à la demande croissante de matières premières. Ces études ont renforcé la légitimité de la criticité des matières premières en tant que sujet majeur dans la sécurisation de l'approvisionnement industriel.

La question qui se pose est celle de la relation entre le concept de la criticité et l'objectif de notre recherche qui est d'apporter une méthodologie sécurisant l'approvisionnement dans les industries qui dépendent des métaux.

D'abord, il est important de souligner que l'émergence de la criticité est une initiative gouvernementale ou régionale comme dans le cas de la Commission européenne. De ce fait, elle dispose de ressources financières et surtout intellectuelles, dont les experts. Ainsi, il faut considérer l'apport conceptuel de ces initiatives. Il se traduit par une définition et des indicateurs pouvant capturer les préoccupations liées à la mondialisation et aux activités minières. De ce fait, ces initiatives ont pu capturer et traduire ces préoccupations en différents facteurs.

- L'identification des matières premières critiques aide les gouvernements à concentrer leurs efforts sur les matières premières les plus importantes pour leur pays.
- C'est une étude qui tient compte du contexte unique de l'approvisionnement des métaux et permet de mieux comprendre les facteurs qui peuvent influencer l'approvisionnement des métaux. C'est une approche multidisciplinaire qui permet d'obtenir une image sur les facteurs tels que la disponibilité géologique, la concentration de la production mondiale, la stabilité politique des pays producteurs, le potentiel de substitution, les taux de recyclage, etc.
- Ces études permettent l'élaboration et la planification de gestion des risques matière à long terme comme des investissements dans la recherche et le développement au niveau du recyclage et de la substitution.

De ce fait, le concept de la criticité des matières apporte une nouvelle approche pour l'identification et la gestion des risques liés à l'approvisionnement des métaux. Cette approche constitue le maillon manquant pour améliorer la gestion des risques.

Il est important de rappeler que notre méthodologie s'adresse aux industries qui dépendent des métaux et plus précisément aux entreprises qui font partie de ces industries. Ainsi, l'intégration de l'évaluation de la criticité des matières telle qu'elle est conçue par les initiatives

gouvernementales dans une méthodologie de gestion des risques des chaînes d'approvisionnement n'est pas satisfaisante. Par conséquent, l'évaluation de la criticité des matières premières doit être adaptée pour s'imbriquer parfaitement dans une méthodologie globale de gestion des risques adaptée aux entreprises d'un secteur donné.

Cette observation est justifiée et corroborée par la communauté des chercheurs qui s'est intéressée au concept de la criticité des matières. Cette communauté a contribué à enrichir les méthodologies et les critères pour l'évaluation de la criticité des matières, en tenant compte de divers contextes, tels que différents pays, secteurs industriels, types de produits et entreprises.

4.3 Revue de littérature systématique sur les matières critiques et le concept de criticité

4.3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude de la revue de littérature systématique sur la criticité des matières, un domaine de recherche émergent (Achzet and Helbig, 2013; Jin et al., 2016). Au cours de la dernière décennie, ce domaine de recherche complexe (Lloyd et al., 2012) et multidisciplinaire (Helbig et al., 2016b) a connu un développement constant suite aux contributions issues de plusieurs disciplines. Chaque discipline a apporté sa vision et ses outils spécifiques.

Dans ce chapitre, nous présenterons la méthodologie de recherche et les étapes de la revue de littérature systématique qui ont permis la collecte de 191 articles scientifiques traitant du sujet de la criticité des matières. Ensuite, nous aborderons une analyse descriptive de notre corpus documentaire mettant en avant le caractère multidisciplinaire de la recherche sur la criticité des matières. Par la suite, nous procéderons à une analyse thématique qui mettra en évidence les différentes contributions des articles sélectionnés, fournissant ainsi un aperçu des tendances émergentes dans le domaine de la criticité des matières. Enfin, nous discuterons de nos résultats pour mettre en avant les points forts et les lacunes.

4.3.2 Méthodologie de recherche : revue de littérature systématique

La revue de littérature systématique (RLS) est une méthode de recherche (Thomé et al., 2016; Tikito and Souissi, 2019) reproductible, scientifique et transparente (Cooper et al., 2018). Dans cette étude, nous avons appliqué le processus (RLS) basé sur les trois étapes suivantes : 1) exploration initiale de l'art ; 2) première codification et intégration d'articles supplémentaires ; 3) codification finale et analyse (voir figure N° 18).

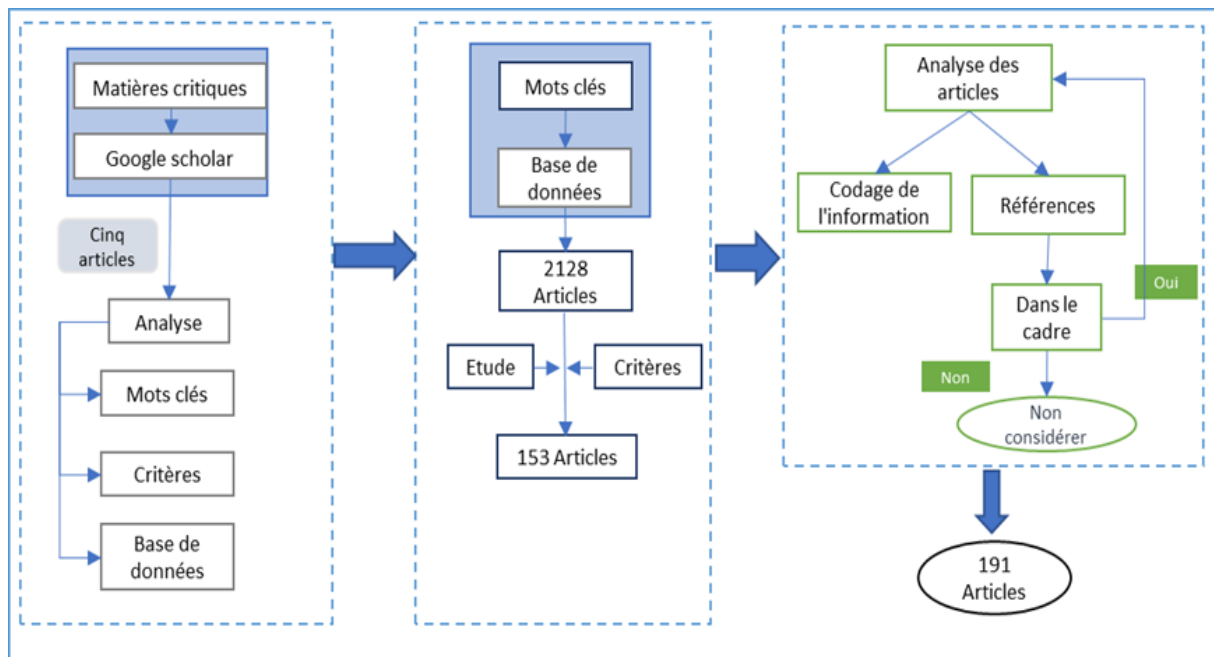


Figure 18 : Processus de revue de littérature systématique

Étape 1 : Exploration préliminaire de l'état de l'art

Cette recherche a été initiée par l'utilisation du mot-clé « matériaux critiques » dans le moteur de recherche « Google Scholar ». Nous avons ensuite identifié et analysé cinq revues de littérature (Erdmann, Behrendt et Feil, 2011 ; Achzet et Helbig, 2013 ; Bedder, 2015 ; Dewulf et al., 2016 ; Jin, Kim et Guillaume, 2016). Ces articles représentent une source holistique d'informations qui ont aidé à identifier d'autres termes faisant référence aux matériaux critiques. L'utilisation de Google Scholar était une étape nécessaire pour identifier les bases de données scientifiques qui ont publié sur ce sujet.

Cette étape a abouti à la sélection de cinq mots-clés (matières premières critiques, matériaux critiques, métaux critiques, ressources critiques, produits de base critiques) et huit bases de données (Web of Science, Wiley Online, Springer, MDPI Taylor & Francis, A.C.S., IOP Science). De plus, pour améliorer le cadrage de l'étude, cette analyse a guidé la définition des critères d'inclusion présentés ci-dessous :

- Étant donné que plusieurs domaines utilisent le terme "matériaux critiques", nous avons limité le champ d'étude aux domaines de la gestion de la chaîne d'approvisionnement, l'écologie industrielle, l'environnement, l'économie, la géopolitique, la durabilité, la géologie et la gestion des risques.
- Le corpus documentaire est limité aux articles en anglais, évalués par des pairs et publiés dans des revues internationales.

Étape 2 : Première codification et intégration de nouveaux articles

L'application des cinq mots-clés dans les huit bases de données a généré 2128 articles. Après l'application des critères d'inclusion et de suppression des doublons, la nouvelle base de documents comprenait 153 articles. À ce stade, nous avons commencé la codification des documents tout en intégrant de nouvelles références provenant des bibliographies des articles. Cette étape a permis d'établir notre corpus final de 191 articles scientifiques.

Étape 3 : Codification finale et analyse

L'analyse des données extraites des articles retenus a suivi deux approches. La première est une analyse descriptive visant à saisir les tendances de publication, les revues et la répartition géographique du corpus documentaire ainsi qu'à révéler les profils des communautés de recherche en fonction de l'affiliation du premier auteur. La seconde est une analyse thématique mettant en évidence les contributions des articles pour déceler les principaux thèmes de recherche, les avancées scientifiques et les lacunes.

Dans la section suivante, les résultats de l'analyse descriptive de ce corpus documentaire seront exposés.

4.3.3 Analyse descriptive : profils et tendances dans la recherche sur la criticité des matières

Cette analyse descriptive vise à relever les tendances de publications, les revues et la répartition géographique du corpus documentaire ainsi que les profils des communautés de recherche en fonction de l'affiliation du premier auteur.

4.3.3.1 Évolution temporelle de la littérature

La distribution temporelle des articles par année de publication entre 1980 et 2021 est présentée dans la figure N°19. Le nombre d'articles suit une tendance continuellement croissante, démontrant un intérêt croissant pour ce domaine de recherche et son potentiel pour de futures recherches. Cette augmentation peut être divisée en deux périodes distinctes : la première de 1980 à 2014, qui montre une augmentation limitée du nombre de publications par an ; la seconde de 2015 jusqu'à 2021, qui révèle une augmentation significative des publications avec un doublement du nombre d'articles publiés.

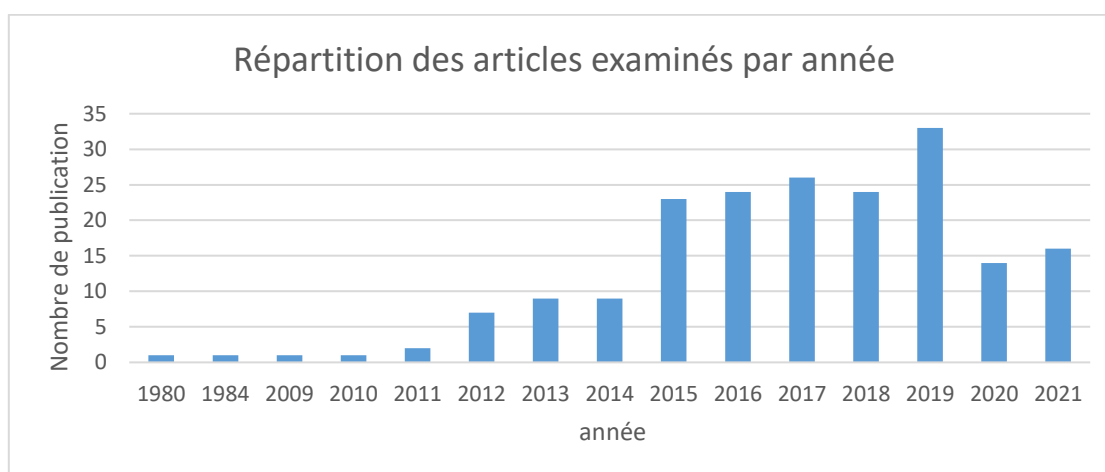


Figure 19 : Répartition des articles examinés par année

4.3.3.2 Répartition des articles par revue scientifique

Les articles examinés ont été publiés dans 69 revues scientifiques différentes (voir figure 20), principalement axées sur les domaines des sciences de l'environnement, de la technologie, de

l'écologie, des ressources et de la production. Le journal "Resource Policy" présente le taux de publication le plus élevé avec 28 articles, suivi de près par "Resources, Conservation and Recycling" avec 19 articles. De plus, 57 revues couvrant diverses disciplines telles que la gestion de l'innovation, les sciences physiques, les mathématiques et l'ingénierie, la géographie, l'économie, la géologie et le génie énergétique ont publié entre un et trois articles, mettant ainsi en évidence le caractère multidisciplinaire de ce domaine de recherche.

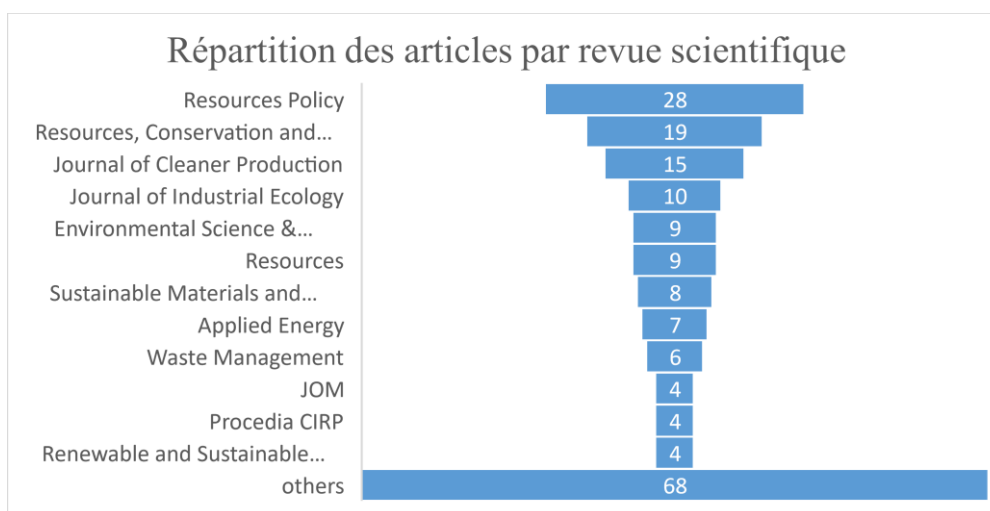


Figure 20 : Répartition des articles par revue scientifique

4.3.3.3 Auteurs et communautés de recherche

L'étude de la communauté de chercheurs s'est basée sur les informations relatives aux premiers auteurs. L'analyse de l'affiliation des premiers auteurs a révélé qu'E.T. Graedel est l'auteur le plus productif dans ce domaine, avec 18 articles publiés au tant que premier auteur ou contributeur. En deuxième position, Philip Nuss a publié 12 articles, suivi de près par Nassar Nedal T avec onze articles.

Concernant le profil des communautés intéressées par ce domaine, nous avons identifié le laboratoire et l'organisation d'affiliation du premier auteur. En conséquence, nous avons identifié cinq catégories d'acteurs (voir figure N° 21) : les universitaires, qui contribuent représentent 69,5 % ; les instituts de recherche privés et publics avec une contribution de 19 % ;

les consultants privés, avec une contribution de 6,8 %, et les acteurs industriels et les équipes d'experts de la Commission européenne sont également représentés avec des contributions mineures.

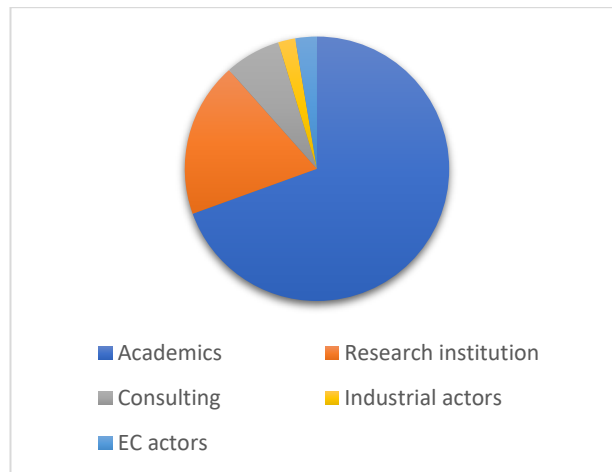


Figure 21 : Profil des communautés intéressées par ce domaine.

En termes de domaines de recherche des auteurs, ces derniers ont été classés en fonction de leurs institutions d'appartenance. Pour simplifier la cartographie des domaines de recherche institutionnels, ils ont été divisés en trois principales catégories (voir Figure 22) : un groupe d'institutions multidisciplinaires qui intègre des chercheurs de plusieurs disciplines telles que la politique, économique, ingénierie, philosophie (29 %), les sciences sociales et humaines (5 %), et les sciences et technologies (66 %).

La majorité des institutions multidisciplinaires identifiées (Centre de Recherches et d'Etudes Interdisciplinaires sur le Développement Durable - CREIDD, Centre pour la Recherche en Environnement et Soutenabilité - CENSE, Golisano Institute for Sustainability, Rochester Institute of Technology, Resource Lab, Institute for Sustainable Futures, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Sustainability Research Institute, Institute of Ethics and Transdisciplinary Sustainability Research - IETSR, Oeko-Institut e.V. - Institute for Applied Ecology, Research Institute of Science for Safety and Sustainability, Chaire d'Ingénierie Durable de l'Université

Technique de Berlin) ont pour objectif de soutenir et d'aider les gouvernements et les industries à relever le défi de la transition énergétique et se concentrent sur les enjeux de durabilité.

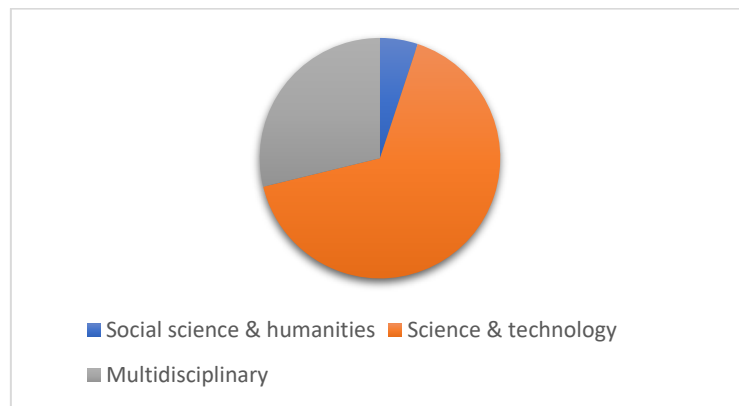


Figure 22 : Répartition des domaines de recherche des institutions des auteurs

4.3.3.4 Répartition géographique des auteurs : un aperçu mondial

L'analyse de la répartition géographique des auteurs désigne les États-Unis et les pays européens comme les principaux contributeurs dans ce domaine de recherche. Selon l'affiliation du premier auteur, l'Europe se positionne en première avec 57 % des articles publiés, suivie des États-Unis avec 21 %. Plus spécifiquement, l'Allemagne représente 19 % des publications européennes, tandis que la France et les Pays-Bas contribuent chacun à hauteur de 6 % (voir figure N° 23).

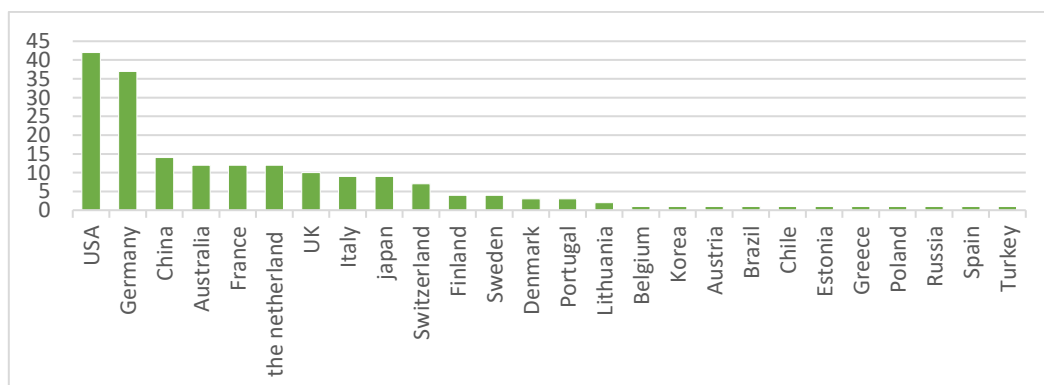


Figure 23 : Nombre d'articles publiés par pays

Dans la section suivante, nous exposerons l'approche adoptée pour l'analyse thématique de ce corpus documentaire, ainsi que les résultats qui en ont découlé.

4.3.4 Analyse thématique : cartographie et analyse des sujets

Cette section organise les principales contributions et les sujets de recherche présents dans notre corpus documentaire. Premièrement, nous présentons le processus de construction d'une cartographie des catégories de sujets de recherche. Par la suite, nous présentons le cadre conceptuel, le cadre méthodologique et enfin les stratégies de réduction de la criticité.

4.3.4.1 Classification des sujets de recherche sur les matières critiques

Afin de mettre en évidence les principaux sujets de recherche étudiés dans les documents collectés, nous avons développé un cadre de classification. Ce dernier est basé sur plusieurs éléments dont l'auteur, l'année de publication, la portée de l'analyse, l'unité d'analyse (système étudié) et les principales contributions de chaque article.

Nous avons identifié les sujets de recherche et la contribution de chaque article à partir des objectifs de l'étude, des discussions et des conclusions. Ensuite, nous avons identifié les similarités pour regrouper les contributions sous forme de catégories. De plus, l'unité d'analyse (système) a permis de déterminer à qui ces études sont destinées et quel système était concerné.

Par exemple, l'article réalisé par (Habib, 2019) propose une approche pour évaluer le potentiel de circularité de différents produits contenant du NdFeB au Danemark. Cet article a été classé dans les catégories de recherche sur la mitigation de la criticité, car il met l'accent sur une approche d'économie circulaire, considérée comme une stratégie clé pour réduire la criticité des ressources.

Un deuxième exemple est celui de (Schellens et Gisladdottir, 2018), qui a proposé une définition du concept de "Ressource Naturelle Critique" alignée sur la théorie du risque. Cet article est

classé dans la catégorie des "aspects conceptuels", une sous-catégorie des sujets de recherche secondaires, car il aborde un aspect conceptuel des matériaux critiques. Voir tableau N°8.

Tableau 8 : Éléments sélectionnés pour le cadre de classification de l'étude

Année	Auteur	Titre	1ère catégorie	2ème catégorie	Système	Contribution
2019	(Habib, 2019)	A product classification approach to optimize the circularity of critical resources – the case of NdFeB magnets	Réduction de la criticité	Économie circulaire	Neodymium iron boron	Déterminer le potentiel de circularité en utilisant le cas des aimants permanents à base de néodyme-fer-bore (NdFeB)
2018	(Schellens and Gisladdottir, 2018)	Critical Natural Resources: Challenging the Current Discourse and Proposal for a Holistic Definition	Aspect conceptuel	Définition	/	Analyse de 23 définitions du concept de "Ressource Naturelle Critique" et proposition d'une nouvelle définition de la criticité en accord avec la théorie du risque.

L'analyse des 191 articles a permis de classer les sujets de recherche sous trois catégories principales (évaluation de la criticité, "approches et éléments de soutien", atténuation de la criticité, et sujets de recherche mineurs (aspects conceptuels et acteurs influents) (voir figure N° 24).

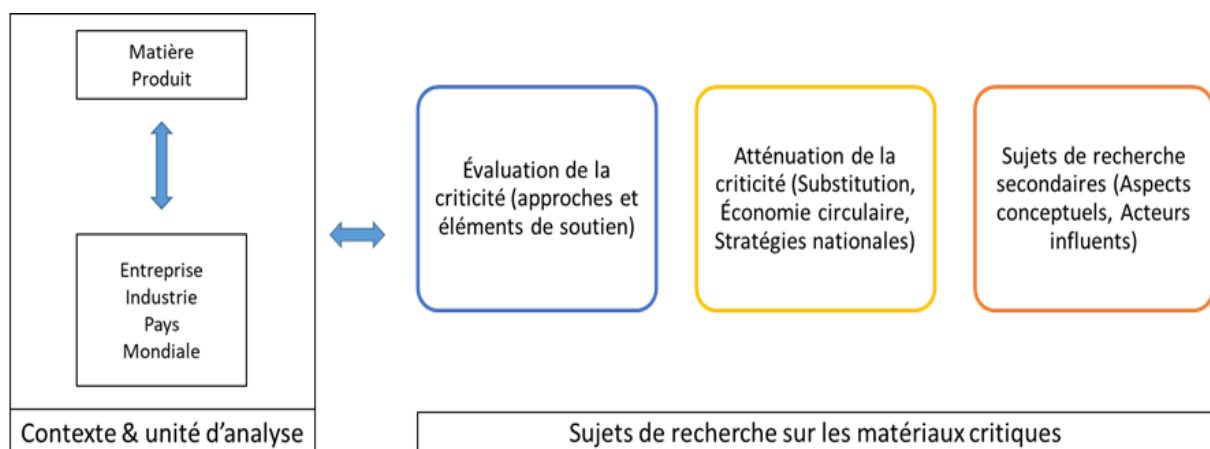


Figure 24 : Cartographie des sujets de recherche sur les matériaux critiques

4.3.4.2 Analyse des sujets de recherche sur les matières critiques

Dans cette partie, nous allons présenter l'analyse des différentes thématiques de recherche dans le domaine de la criticité des matières premières. Nous commencerons par une explication du cadre conceptuel, Ensuite, l'examen des approches proposées pour évaluer la criticité. Nous nous pencherons ensuite sur les stratégies visant à réduire la criticité, et enfin, nous discuterons des parties prenantes, c'est-à-dire des acteurs exerçant une influence dans le domaine. Il convient de préciser que l'ordre de présentation de ces thématiques n'indique pas leur niveau d'importance ; il a été choisi pour une présentation logique du domaine de la criticité des matières premières.

4.3.4.2.1 Cadre conceptuel de la criticité

Cette sous-catégorie fait partie de la catégorie de sujet recherche mineurs. Le terme « mineur » ne signifie pas que le sujet n'est pas important, mais plutôt que les contributions sont peu nombreuses. Nous avons rassemblé cinq articles dont la principale contribution est liée aux connaissances et aux théories ayant une relation avec le sujet de recherche. Cette catégorie englobe deux articles qui se sont focalisés sur l'élaboration de la définition de la criticité des matières en utilisant une méthode de recherche basée sur la revue de littérature (Peck et al., 2015; Schellens and Gisladdottir, 2018). De plus, elle intègre une seule étude qui se concentre sur l'évolution de la perception de la criticité des matériaux dans le contexte moderne. Cette étude (Sykes et al., 2016a) explique que l'émergence des métaux critiques a été influencée par les avancées technologiques, la mondialisation, l'augmentation de la demande, les conditions économiques changeantes, les préoccupations géopolitiques et les considérations environnementales. Enfin, elle intègre deux études (M. Frenzel et al., 2017; Glöser et al., 2015) qui mettent en relation la criticité des matières et la théorie du risque.

4.3.4.2.1.1 Définition des matières critiques

La plupart des études de notre corpus de littérature utilise une définition des matériaux critiques pour introduire cet objet de recherche. La définition la plus fréquente considère qu'un risque élevé de perturbation de l'approvisionnement et une haute importance économique caractérisent les matériaux critiques. Cependant, divers auteurs affirment qu'il n'y a pas de convergence et pas de définition largement acceptée (Bustamante et al., 2014; Diemer et al., 2018; M. Frenzel et al., 2017).

L'analyse des articles a mis en évidence deux positions concernant la possible création d'une définition pour le concept de criticité.

Une position contre une définition commune

Cette position considère que l'utilisateur ne peut établir une définition pertinente qu'en fonction de ses besoins (Schellens and Gisladdottir, 2018) et de la portée considérée (Jin et al., 2016). En conséquence, nous avons trouvé plusieurs définitions pour la criticité des matériaux. Par exemple, l'étude de (Peck et al., 2015) dédiée au concepteur de produits « Product Designer», extrait 28 définitions issues d'une revue de littérature dans le but de faciliter le rôle des acteurs dans les phénomènes de criticité. De même, la définition des matériaux critiques proposée par (Miehe et al., 2016) . Elle est destinée à l'entreprise et est formulée comme "le risque de dommages à une certaine unité d'analyse en raison de l'utilisation de certaines ressources".

Une position en faveur d'une définition unique

Pour soutenir cette position, (Schellens and Gisladdottir, 2018) ont proposé une définition unique des matériaux critiques pour réduire les incohérences et fournir une base pour une communication claire. Ils considèrent également qu'il est essentiel de définir un concept avant d'appliquer des évaluations et des méthodologies. En conséquence, (Schellens and Gisladdottir, 2018) ont proposé une définition holistique basée sur la théorie du risque : « la criticité est un

état relatif et dynamique d'une ressource naturelle : (a) d'une importance décisive, classée selon une hiérarchie des besoins humains, concernant la question ou le groupe d'intérêt spécifié, et (b) accompagnée d'incertitude ou de menace ».

Malgré cette opposition, une base conceptuelle consensuelle émerge de la littérature sur les attributs de criticité liés aux matières premières (Graedel and Reck, 2016). Les auteurs supposent que la criticité est une question de degrés (Sievers and Tercero, 2012), dépendant de l'horizon temporel, des objectifs et de la portée des matériaux et qu'elle présente un caractère dynamique (Erdmann and Graedel, 2011; Lloyd et al., 2012; Sievers and Tercero, 2012).

4.3.4.2.1.2 Théorie du risque et criticité des matières premières

L'alignement entre la théorie du risque et l'évaluation de la criticité des matières premières repose principalement sur deux éléments : la probabilité d'occurrence d'un événement (qui représente le risque d'approvisionnement dans le contexte de la criticité) et la conséquence de cet événement (qui correspond à la vulnérabilité dans le contexte de la criticité). Voici comment ces éléments s'appliquent (M. Frenzel et al., 2017; Glöser et al., 2015).

- Probabilité d'occurrence / Risque d'approvisionnement : Dans la théorie du risque, la probabilité d'occurrence se réfère à la fréquence à laquelle un événement négatif est susceptible de se produire. En ce qui concerne la criticité des matières premières, cela équivaut au risque d'approvisionnement. Cela peut être déterminé par l'évaluation de facteurs tels que la concentration géographique de la production de matières premières, les restrictions politiques, les conflits, la disponibilité des réserves, les obstacles techniques à l'extraction, et la substitution possible de la matière première.
- Conséquence de l'événement / Vulnérabilité : La conséquence d'un événement se réfère à l'impact que cet événement aurait s'il se produisait. Dans le contexte de la criticité des matières premières, cela correspond à la vulnérabilité, c'est-à-dire la mesure dans

laquelle l'industrie ou l'économie serait affectée par une perturbation de l'approvisionnement. Cette vulnérabilité peut être évaluée en examinant des facteurs tels que l'importance de la matière première dans l'industrie spécifique, l'importance économique de cette industrie, le degré de dépendance envers la matière première, et la capacité à substituer la matière première.

L'importance de la conformité avec la théorie du risque est mise en évidence lorsque l'on calcule un score global de criticité. Si l'on ne respecte pas les exigences formelles définies par cette théorie, le résultat pourrait conduire à une mauvaise interprétation du niveau de criticité des matières premières, affectant ainsi l'ordre de priorité des ressources.

4.3.4.2.1.3 Discussion

Cette sous-catégorie de sujets de recherche mineurs ne doit pas être sous-estimée, car elle regroupe des articles qui apportent des contributions significatives aux connaissances et aux théories liées à la criticité. Le fait que le nombre de contributions soit relativement faible ne signifie pas que le sujet n'est pas important, mais plutôt qu'il s'agit d'un domaine émergent avec un fort potentiel de développement.

Le cadre conceptuel de la criticité est un domaine de recherche prometteur qui mérite une attention particulière malgré le faible nombre de contributions. Les divergences quant à la définition des matériaux critiques doivent être considérées comme une richesse plutôt qu'un obstacle, tandis que l'alignement avec la théorie du risque offre une base solide pour évaluer et gérer la criticité des matériaux premiers. Il reste encore des opportunités pour développer davantage ce domaine et approfondir notre compréhension des enjeux liés à la criticité des ressources.

4.3.4.2.2 *Evaluation de la criticité*

Cette catégorie regroupe tous les articles étudiant l'évaluation de la criticité. Cette catégorie est subdivisée en deux sous-catégories. La première est la sous-catégorie "approches", qui contient 43 études proposant des approches pour évaluer la criticité des matériaux.

La seconde est la sous-catégorie « éléments de soutien » qui inclut 67 études liées à un ou plusieurs composants des approches d'évaluation de la criticité. Ces éléments sont les deux grandes dimensions de criticité le risque d'approvisionnement et la vulnérabilité, ainsi que l'étude des facteurs de disponibilité, le facteur sous-produit, la future demande.

4.3.4.2.2.1 *Approches pour l'évaluation de la criticité*

(Kiemel et al., 2021) définissent l'évaluation de la criticité comme des "évaluations multicritères visant à décrire les risques associés à l'utilisation de matériaux spécifiques par l'évaluation d'indicateurs prédéfinis". De même, selon (Achzet and Helbig, 2013), "le but des méthodes d'évaluation de la criticité est d'analyser les facteurs déterminants qui rendent une matière première critique d'un point de vue économique, écologique, social, voire éthique".

Notre analyse documentaire révèle 43 études proposant ou utilisant des approches pour l'évaluation de la criticité. Chacune de ces approches se distingue par le système étudié, leur vision de la criticité et l'objectif de leurs études.

Historiquement, la première étude qui évoque la criticité des matériaux est apparue en 1974 (Jin et al., 2016; Sievers and Tercero, 2012). Cependant, la première étude sur les matériaux critiques et qui établit une liste de matériaux critiques a été proposée en 2008 par le Conseil National de Recherche aux États-Unis.

Cependant, selon notre revue systématique de la littérature et le cadre de la matrice de criticité, (Duclos et al., 2010) a été la première étude publiée dans une revue scientifique. Leur approche, dédiée à l'entreprise General Electric, est basée sur deux dimensions (risque

d'approvisionnement et de prix, impact sur l'entreprise). Le détail est présenté dans le tableau N° 9 et la figure N° 25.

Tableau 9 : Evaluation de la criticité des matières dédiée à GE

MP	Impact sur l'entreprise	MP	Risque d'approvisionnement et de prix	La criticité des MP	Stratégies de réductions de la criticité
70 MP	<p>Pourcentage de l'approvisionnement mondial par GE</p> <p>Impact sur le chiffre d'affaires de GE</p> <p>Capacité de substitution de GE</p> <p>Capacité à répercuter les augmentations de coûts</p>	Sept MP	<p>Abondance dans la croûte terrestre</p> <p>Risque d'approvisionnement et géopolitique</p> <p>Risque de co-production</p> <p>Risque de demande</p> <p>Volatilité historique des prix</p> <p>Substituabilité sur le marché</p>	<p>Le diagramme de criticité est construit en traçant "l'impact d'une restriction d'élément sur G.E." par rapport au "risque d'approvisionnement et de prix."</p> <p>Les résultats sont confidentiels, à l'exception du rhénium qui est le plus critique.</p>	<p>Réduction de la demande :</p> <p>Recycler les déchets de fabrication et récupérer du rhénium à partir des aubes de turbine usagées.</p> <p>S'engager dans la recherche pour réduire la quantité de rhénium nécessaire, en développant des alliages qui ont réduit la quantité requise de 3% à 1,5%.</p>

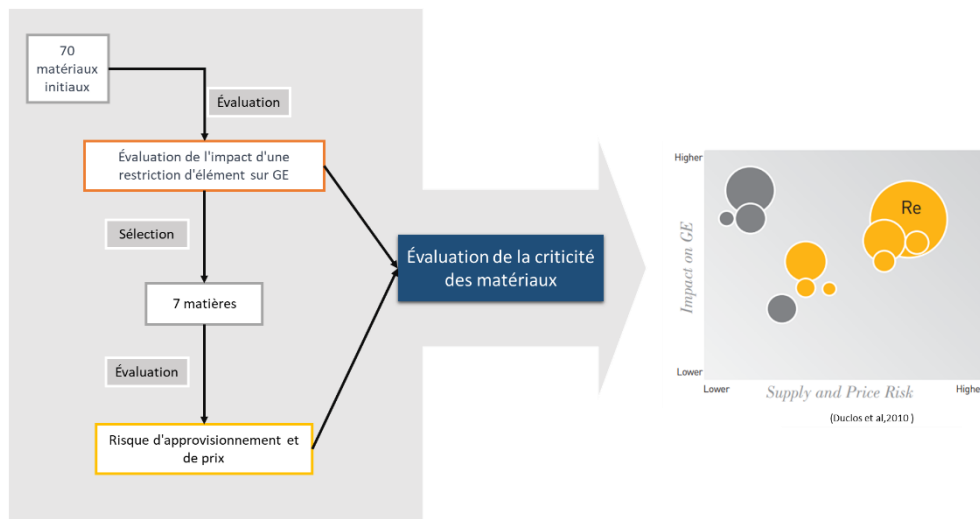


Figure 25 : Processus d'évaluation de la criticité des matières GE.

L'étude du corpus documentaire a relevé que l'approche la plus utilisée est celle proposée par l'équipe de l'Université Yale en 2012 (Graedel et al., 2012). Cette approche, qui a été appliquée

dans 13 études distinctes, évalue la criticité des matériaux en fonction de trois dimensions : le risque d'approvisionnement, la vulnérabilité aux restrictions d'approvisionnement, et les implications environnementales. Elle a été appliquée selon la méthodologie originale par (Ciacci et al., 2016; Graedel et al., 2015a; Harper et al., 2015b, 2015a; Nassar et al., 2012, 2015a; Nuss et al., 2014; Panousi et al., 2016), et une comme source d'inspiration par (Ioannidou et al., 2017, 2019b; Knašytė et al., 2012; Miyamoto et al., 2019a; Sonderegger et al., 2015).

Cette étude exerce une grande influence dans l'évaluation de la criticité des matières. Elle est présentée comme une extension de la première méthodologie introduite par l'initiative des États-Unis, adaptée à trois niveaux de systèmes : mondiale, national et entreprise.

Les dimensions et les facteurs utilisés dans cette méthodologie sont présentés dans le tableau N°10

Tableau 10 : Caractéristique de la métrologie de la criticité des matières proposée par (Graedel et al., 2012)

Dimension	Horizon temporelle et portée	Facteur	Indicateur
Risque d'approvisionnement	À moyen et long terme) Mondiale, pays entreprise	Facteurs géologiques, technologiques et économiques (à moyen et long terme)	Temps d'épuisement qui reflète l'abondance relative du métal Fraction du métal accompagnateur qui reflète le pourcentage du métal extrait du métal hôte.
	(À moyen terme) Pays, entreprise	Facteurs sociaux et réglementaires	Politiques restrictives en matière d'exploitation minière (indice de potentiel politique, Institut Fraser). Licence sociale d'exploitation : indice de développement humain, Programme des Nations Unies pour le développement.
	(À moyen terme) Pays, entreprise	Facteurs Géopolitiques	Stabilité politique : indicateur de gouvernance mondiale pour la stabilité politique et l'absence de violence/terrorisme (Groupe de la Banque mondiale). Concentration mondiale de l'approvisionnement : Indice de Herfindahl-Hirschman (HHI).

Vulnérabilité à la restriction d'approvisionnement	(Mondiale)	Importance	Pourcentage de la population utilisant le métal
		Substituabilité par application finale	Performance des substituts (performance technique). Disponibilité des substituts (score de risque d'approvisionnement des substituts). Ratio d'impact environnemental
	(Nationale)	Importance	Importance économique nationale : consommation apparente et prix (USGS). Pourcentage de la population utilisant le métal pour des applications spécifiques
		Substituabilité par application finale	Performance des substituts (performance technique). Disponibilité des substituts (score de risque d'approvisionnement des substituts). Ratio d'impact environnemental. Ratio de dépendance aux importations nettes.
		Susceptibilité	Dépendance aux importations nettes Indice global d'innovation
	Entreprise	Importance	Pourcentage du chiffre d'affaires impacté Capacité à répercuter les augmentations de coûts Importance pour la stratégie d'entreprise
		Substituabilité	Performance des substituts (performance technique). Disponibilité des substituts. Ratio d'impact environnemental. Ratio de prix
Capacité d'innovation de l'entreprise		Innovation d'entreprise.	
Implications environnementales	Tous les niveaux		Implications potentielles sur la santé humaine et les écosystèmes (ReCiPe eco-invent)

La présentation du résultat de la criticité est sous forme d'espace de criticité présenté dans la figure N° 26.

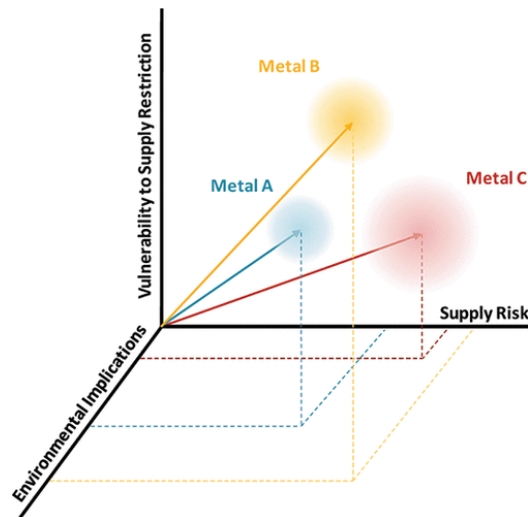


Figure 26 : Espace de criticité (Graedel et al., 2012)

En parallèle, en 2012, (Giurco et al., 2012) a proposé une approche pour évaluer la criticité basée sur trois dimensions : disponibilité, dépendance, alternatives . Cette étude qualitative est spécifiquement adaptée au contexte national de l’Australie.

En 2013, (Nieto et al., 2013) ont publié un article qui étudie l'importance des matériaux ainsi que cinq facteurs clés de risque d'approvisionnement (KSRLF) : diversité des producteurs, facteurs de risque des ressources, demandes issues d'autres applications, environnement commercial international et réglementations environnementales.

En 2014, (Goe and Gaustad, 2014) ont évalué la criticité en prenant en compte trois types de risques : le risque d'approvisionnement, le risque environnemental et le risque économique.

- Le risque d'approvisionnement est évalué en considérant l'inefficacité institutionnelle à travers deux indicateurs : la dépendance nette aux importations et l'indice de Herfindahl-Hirschman des producteurs de matières premières et de minerais.
- La pénurie physique est également prise en compte en se basant sur deux indicateurs : le taux de recyclage et le rapport entre la production et les réserves.

- Le risque environnemental est évalué en analysant deux aspects : la toxicité pour l'homme et l'intensité énergétique, à l'aide de deux indicateurs : l'énergie incorporée principale et les économies d'énergie.
- Le risque économique est abordé sous deux aspects : le risque spécifique au matériau, évalué par l'analyse des prix des matières premières, et le risque au niveau macroéconomique, évalué par deux indicateurs : la consommation domestique et la valeur économique par secteur.

En 2014, une approche théorique d'appuyant sur la théorie du risque a été proposée pour structurer les évaluations de la criticité. De ce fait, l'évaluation de la criticité était comprise comme la combinaison du risque d'approvisionnement et de l'impact des conséquences de ce risque (Roelich et al., 2014).

En 2015, (Hatayama and Tahara, 2015) ont proposé une approche pour évaluer la criticité basée sur cinq catégories de risque : le risque d'approvisionnement, le risque de prix, le risque de demande, la restriction du recyclage et le risque potentiel. Cette étude visait à évaluer la criticité des métaux au Japon en prenant en compte ces facteurs, élaborés en 2009 par l'Organisation japonaise pour le développement des nouvelles technologies énergétiques et industrielles (NEDO).

En 2018, (Knobloch et al., 2018) ont introduit une approche de vulnérabilité pour évaluer la criticité des matériaux, s'inspirant du concept de vulnérabilité utilisé dans la recherche sur les risques sociotechniques. Cette approche comporte trois dimensions : la sensibilité, l'exposition et la capacité d'adaptation.

1. Sensibilité (spécifique au produit) : Prend en compte la demande ou la consommation de matériau par rapport à la production mondiale de matières premières.

2. Exposition (aux interruptions d'approvisionnement) : Prend en compte plusieurs facteurs tels que la dépendance des pays vis-à-vis de la production mondiale de matières premières, la concentration de la production mondiale de matières premières par entreprise, les coproduits des métaux, la demande future de produits et de technologies concurrentes ou émergentes, ainsi que l'épuisement des réserves.
3. Capacité d'adaptation (spécifique au produit) : Cette capacité repose sur la substituabilité, qui englobe la performance des substituts, les interruptions potentielles d'approvisionnement en substituts, le rapport prix des substituts par rapport au métal de référence, ainsi que le rapport environnemental des substituts par rapport au métal de référence. Elle prend également en compte la recyclabilité du matériau, y compris le taux mondial de recyclage en fin de vie.

Deux études ont présenté le processus pour construire une méthodologie adaptée pour l'évaluation de la criticité.

Le premier processus est proposé par (Jin et al., 2016) et se base sur trois étapes :

- La phase de diagnostic qui consiste à mener une étude exhaustive de tous les paramètres qui influencent la criticité.
- La phase d'évaluation de la criticité qui consiste à déterminer la criticité des matériaux à l'aide d'une méthodologie d'évaluation. Cela peut se faire de manière quantitative ou qualitative.
- La phase d'approche d'atténuation qui vise à trouver des approches d'atténuation pour résoudre les problèmes liés à la criticité ou à prévenir ces problèmes à l'avenir.

Plus récemment, en 2021, (Helbig et al., 2021b) ont présenté un guide étape par étape pour concevoir et communiquer une évaluation de la criticité. Ce guide comprend les différentes étapes suivantes.

- Définir l'objectif et la portée : quels éléments sont exposés à des risques, quel type de risque est anticipé, quels matériaux sont évalués, quel est l'objectif de l'évaluation ?
- Sélectionner et évaluer les indicateurs : quels indicateurs reflètent les risques anticipés, les données sont-elles disponibles pour les matériaux et produits étudiés, la qualité des données disponibles est-elle suffisante pour l'utilisation prévue des résultats ?
- Définir une approche d'agrégation : comment les résultats seront-ils présentés, quelle est la relation entre les indicateurs sélectionnés, définir une valeur seuil si nécessaire.
- Interpréter et communiquer les résultats : les résultats sont-ils sensibles aux choix méthodologiques, quelle est l'étendue d'incertitude des résultats, quelles sont les limitations des résultats.

Les principales approches mentionnées sont résumées dans la Figure 8 et le détail se trouve dans l'annexe N° 4.

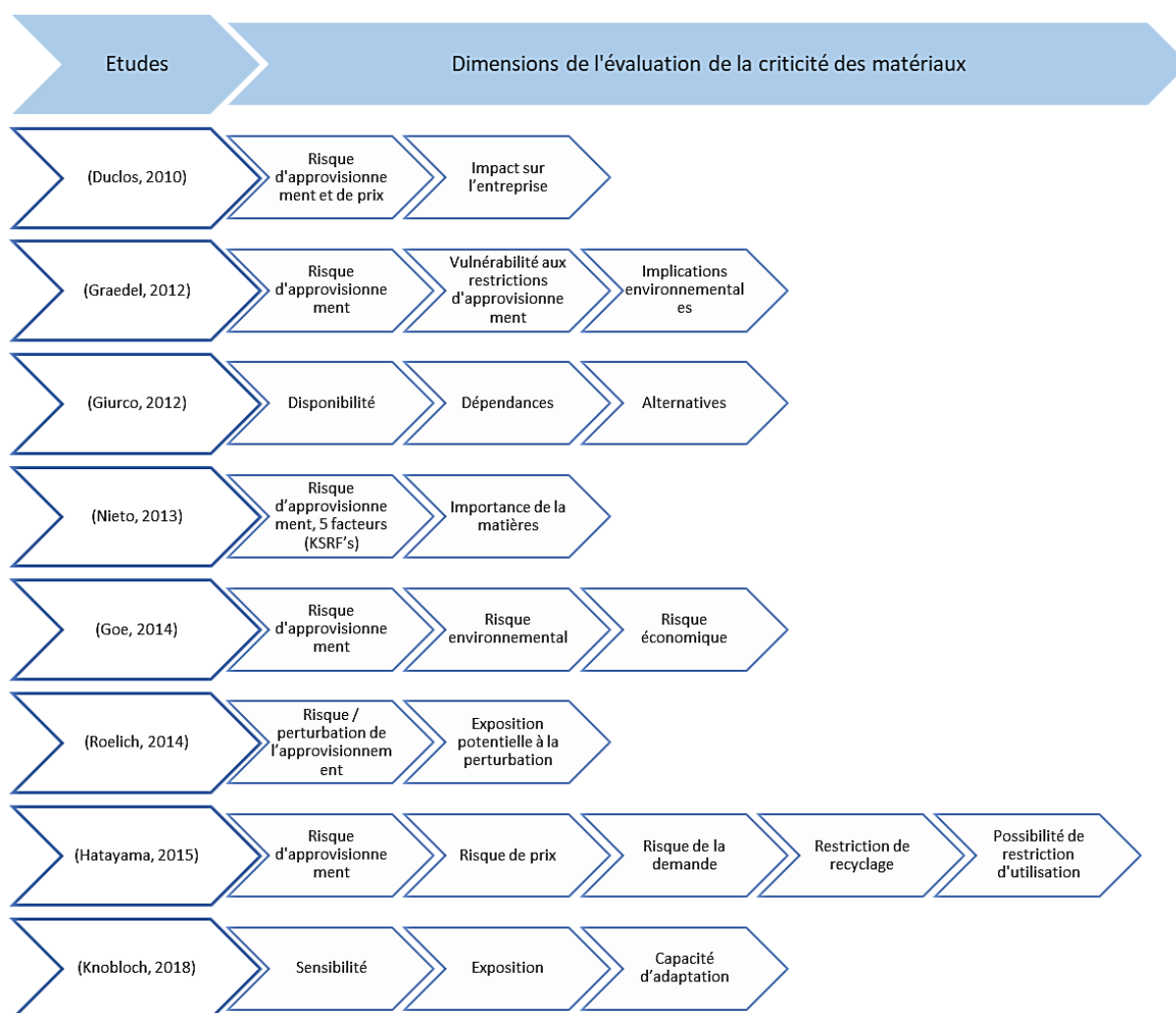


Figure 27 : Les approches de l'évaluation de la criticité des matières premières

La revue de littérature a souligné que le degré d'intérêt pour chaque portée (système) est différent : mondial avec 12 études, pays avec 31 études, entreprise avec 7 études et niveau de produit avec 5 études. La portée du pays domine largement notre corpus. En revanche, la portée de l'entreprise est minoritaire, ce qui peut être lié au fait que la littérature scientifique ne revoit pas les rapports d'entreprise et que ces études sont confidentielles (Jin, Kim et Guillaume, 2016).

Un point significatif qui se dégage de notre étude est l'intégration de dimensions et de facteurs, qui sont souvent inclus sans explication ni justification suffisante. Cependant, nous avons identifié des recherches qui ont exploré les dimensions et les facteurs, que nous avons qualifiés

d'"éléments de soutien". Ces travaux fournissent des informations complémentaires qui améliorent notre compréhension des méthodes d'évaluation de la criticité des matériaux.

4.3.4.2.2 *Analyse des dimensions et facteurs de criticité*

A- La dimension du risque d'approvisionnement

Cette dimension a suscité un intérêt particulier dans notre corpus documentaire. Les recherches ont proposé divers indicateurs que nous avons regroupés dans le tableau N°11. Une étude particulière a retenu notre attention, qui s'intéresse à l'évaluation des risques mais avec une cartographie géographique du réseau d'approvisionnement (van den Brink et al., 2020).

Tableau 11 : Les facteurs du risque d'approvisionnement

Auteur	Facteurs
(Jasiński et al., 2018a)	Risque géologique, Risque technologique, Risque économique, Risque géopolitique, Règlementation, Risque social
(Zhou et al., 2019)	Disponibilité physique, Risque de marché, Instabilité politique.
(Li et al., 2019)	Risque actuel du marché, Risque lié aux ressources, Risque géostratégique, Tendances de l'offre et de la demande.
(Althaf and Babbitt, 2021a)	Disponibilité physique - Capacité à obtenir le matériau, Facteurs de risques de demande, Facteurs de risques géopolitiques, Facteurs de risques environnementaux.
(Helbig et al., 2018a)	Risque de réduction de l'approvisionnement, Risque d'augmentation de la demande, Risque de concentration, Risque politique
(Moss et al., 2013)	Facteurs liés au marché, Facteurs politiques
(Rosenau-Tornow et al., 2009)	Offre et demande actuelles, Coûts de production, Risque géostratégique, Pouvoir du marché, Tendance de l'offre et de la demande

Pour structurer la multitude de facteurs suggérés, deux revues de la littérature ont été effectuées, l'une en 2013 (Achzet and Helbig, 2013) et l'autre en 2021 (Helbig et al., 2021a) dont les résultats sont résumés dans le tableau N°12.

Tableau 12 : Revue de littérature sur les facteurs du risque d'approvisionnement

Auteur	Résultat
(Helbig et al., 2021a)	Les indicateurs ont été regroupés en dix catégories : (A) concentration, (B) rareté, (C) instabilité politique, (D) réglementations, (E) dépendance aux sous-produits, (F) dépendance à la production primaire, (G) croissance de la demande, (H) absence d'options de substitution, (I) volatilité des prix, et (J) dépendance aux importations, avec une catégorie supplémentaire pour les autres indicateurs.
(Achzet and Helbig, 2013)	Les 20 indicateurs identifiés sont classés par pertinence selon la fréquence d'utilisation Important : le risque lié au pays, la concentration de la production par pays, l'étendue statique et la dépendance aux sous-produits. Pertinence moyenne : la concentration des entreprises minières et les estimations de la croissance de la demande, Faible : La recyclabilité, la substituabilité, la dépendance aux importations et les prix des produits de base

En outre, des études (voir tableau N° 13) ont mis l'accent sur des facteurs cruciaux de la criticité, notamment la disponibilité géologique des matériaux, leurs caractéristiques en tant que sous-produits et la concentration des sources d'approvisionnement.

Tableau 13 : Les études spécifiques à un facteur de criticité

Facteurs étudiés	Auteurs
Disponibilité	(Speirs, McGlade and Slade, 2015) (Bertrand et al., 2016; Mudd et al., 2017; Négrel et al., 2019; Northey et al., 2018; Timothy T. Werner et al., 2017) (Mateus and Martins, 2019)
Le risque minier	(Nansai et al., 2015)
Le risque sous-produit	(K. Zhang et al., 2017) (Nassar et al., 2015b) (Fu et al., 2019) (Sprecher et al., 2017) (Mudd et al., 2017) (Timothy T. Werner et al., 2017)
Les risques naturels	(Schnebele et al., 2019)
La diversité d'approvisionnement	(T. Brown, 2018)

B- La dimension de vulnérabilité

La dimension de la vulnérabilité a fait l'objet d'une étude sous forme de revue de la littérature axée sur les facteurs permettant d'évaluer cette dimension (Helbig et al., 2016b). Cette dimension vise à identifier les dommages potentiels découlant de la diminution de l'utilisation des matériaux et susceptibles d'être provoqués par les facteurs mentionnés dans la dimension du risque d'approvisionnement.

La dimension de la vulnérabilité est décrite à l'aide de plusieurs termes tels que "impact économique", "importance de l'utilisation" et "impact de la perturbation de l'approvisionnement". Cependant, son évaluation dépend de l'objectif et de la portée de l'étude.

Selon la portée de l'étude,

- Les études à portée nationale : l'évaluation de l'importance économique peut se baser sur les données économiques du pays et la valeur ajoutée de la matière première dans l'économie,
- Les études à portée technologique : l'accent sera mis sur l'évaluation de l'impact potentiel d'une indisponibilité de la matière première.
- Les études à portée entreprise, l'évaluation de l'importance stratégique de la matière première est réalisée en tenant compte de son rôle dans l'atteinte des objectifs stratégiques de l'entreprise.

Les facteurs les plus couramment utilisés dans les études pour évaluer la vulnérabilité sont la "substituabilité", la "valeur des produits affectés", la "demande future", l'"importance stratégique", la "valeur du matériau utilisé" et la "répartition de l'utilisation".

La substituabilité est un facteur commun entre la dimension de risque d'approvisionnement et la dimension de vulnérabilité. Dans l'interprétation du risque d'approvisionnement, une pénurie d'approvisionnement est moins probable si certains producteurs peuvent facilement utiliser des substituts, réduisant ainsi la demande globale pour le matériau. En tant qu'indicateur de la dimension de la vulnérabilité, les options de substitution réalisables présentent une importance réduite par rapport à une ressource sans substituts appropriés.

La future demande des matières premières a suscité un grand intérêt dans la recherche. Les contributions se sont basées sur des modélisations et des scénarios de transition écologique pour étudier l'impact économique, géologique et d'approvisionnement de la future demande. Ces

études sont essentielles lorsque nous considérons l'évaluation de la criticité des matériaux à long terme (voir tableau N°14).

Tableau 14 : Les études sur la future demande.

Facteur	Etude
La future demande	(Choi et al., 2016; Elshkaki, 2020; Galos et al., 2021; Grandell et al., 2016; Hache et al., 2019; Junne et al., 2020; Kiemel et al., 2021; Kim et al., 2015, p. 27; Ku, 2018; McLellan et al., 2016; Nguyen et al., 2018; Simoes et al., 2015; Viebahn et al., 2015; Wang et al., 2019a; Watari et al., 2018, 2019, 2020)

4.3.4.2.3 Les stratégies d'atténuation de la criticité

Cette catégorie comprend 63 études proposant ou étudiant des stratégies pour réduire la criticité des matériaux. Cette catégorie regroupe des études en sciences de l'ingénieur qui présente les avancées techniques. Ainsi que des études en sciences sociales, qui étudient les approches managériales pour réduire la criticité des matières.

4.3.4.2.3.1 La substitution

La substitution est essentielle pour surmonter un éventuel goulot d'étranglement dû aux perturbations de l'approvisionnement. De plus, elle pourrait réduire la demande de certains matériaux critiques (Pavel et al., 2016). Cette stratégie peut être mise en œuvre de quatre manières différentes (Omodara et al., 2019a):

- La substitution élément par élément, également appelée substitution directe. Il s'agit de la capacité de réduire la teneur en un élément dans une qualité spécifique de matériau en le remplaçant par un autre élément.
- La substitution technologie par élément. Ici, il s'agit explicitement de la capacité de réduire la teneur en éléments d'une qualité spécifique de matériau en utilisant une technologie de production alternative.

- La substitution qualité par qualité est la capacité d'un producteur intermédiaire d'utiliser une autre qualité de matériau d'un type spécifique d'aimant à la place d'un autre.
- La substitution au niveau du système se fait en redessinant le système tout en accomplissant la même fonction. Plusieurs articles ont réalisé l'étude des stratégies de substitution. Leur objectif principal est de passer en revue la situation actuelle de substitution des matériaux critiques selon différentes applications.

Cependant, la substitution n'est pas une stratégie facile à appliquer. Elle nécessite un travail de recherche et développement dont les résultats ne sont pas garantis. Cette stratégie peut avoir un impact sur les performances, car les substituts ne reproduisent pas toujours parfaitement les propriétés des matériaux originaux, ce qui peut conduire à une diminution des performances des produits finaux. De plus, il est possible de rencontrer des problèmes d'approvisionnement similaires, car les meilleurs substituts proviennent souvent du même groupe de métaux, tels que les métaux du groupe du platine (PGM) et les terres rares. Cela peut conduire à des problèmes d'approvisionnement similaires à ceux rencontrés avec les matériaux initiaux. En d'autres termes, la substitution ne résout pas toujours les problèmes d'approvisionnement (Ayres et Peiró 2013) (Graedel et al. 2015).

De ce fait, plutôt que de chercher à éliminer complètement l'utilisation d'un matériau, il est peut-être plus efficace de réduire la quantité de matériau utilisée. Cela peut minimiser l'impact sur les performances mais peut être une stratégie plus réalisable que la substitution complète (Omodara et al., 2019 ; Pavel et al., 2017).

4.3.4.2.3.2 Apport de l'économie circulaire

L'économie circulaire vise à créer un système en boucle fermée où les ressources sont préservées et réintroduites dans le cycle de vie après utilisation (Gaustad et al. 2018).

L'économie circulaire a été adoptée comme ligne directrice par l'Union européenne à travers un

plan d'action circulaire comme stratégie pour les ressources. La revue de littérature sur ce sujet a mis en évidence deux approches : l'approche managériale et l'approche technique.

L'approche managériale est liée à la chaîne d'approvisionnement en boucle fermée (Lapko et al. 2018) et aux approches d'écoconception (Peck et Bakker 2012). La chaîne d'approvisionnement en circuit fermé est une combinaison des chaînes d'approvisionnement classique et inversées (Agnusdei et al., 2019). Quant à l'approche de l'éco-conception, elle vise à réduire les impacts environnementaux des produits et services tout au long de leur cycle de vie (Vallet et al., 2013).

Cependant, l'approche managériale seule n'est pas suffisante pour atteindre l'objectif de réduction de la criticité, car certaines étapes de la chaîne d'approvisionnement en boucle fermée nécessitent des compétences techniques avancées. C'est pourquoi une contribution importante est également apportée par l'approche technique.

L'étape de recyclage/récupération a reçu une attention particulière, présentant différentes techniques de recyclage telles que la pyrométallurgie, la bio-hydrométallurgie et l'hydrométallurgie. Plusieurs études fournissent des informations sur le potentiel de recyclage du matériau critique en fonction des différentes applications. Cela a conduit à un aperçu de la situation du recyclage, (Rademaker et al., 2013), (Zimmermann et al., 2014), (Chancerel et al., 2015), (Van Eygen et al., 2016), (Busch et al., 2014), (Arowosola and Gaustad, 2019), (Chancerel et al., 2013). Cependant, les étapes de collecte et de remanufacturing sont également importantes, mais peuvent être problématiques. Selon (Van Eygen et al., 2016) (Omodara et al., 2019b) (Van Eygen et al. 2016) (Omodara et al. 2019), l'étape de collecte est un goulot d'étranglement dans le système de recyclage et donc de la CLSC. Cependant, ils n'ont pas été étudiées par le corpus.

(Omodara et al., 2019b) ont souligné que le recyclage commercial des terres rares est presque inexistant principalement en raison de la faible concentration de terres rares présentes dans les produits en fin de vie tels que les téléphones. Ceci rend le recyclage plus coûteux que l'extraction primaire des mines.

Les autorités publiques ont également abordé la question de l'atténuation de la criticité des matériaux, considérée comme un problème majeur pour les gouvernements, car elle crée des dépendances nationales pouvant mettre en danger l'approvisionnement en métaux critiques pour les secteurs industriels stratégiques. Différents pays ou groupes de pays ont proposé des stratégies nationales au cours des dix dernières années.

4.3.4.2.3.3 Stratégies nationales

Les efforts politiques et gouvernementaux pour atténuer la criticité sont démontrés à travers différents articles. (Barteková and Kemp, 2016) ont proposé une analyse comparative des stratégies de l'Europe, du Japon, de l'Australie et de la Chine visant à réduire la criticité des matériaux, en utilisant les terres rares comme étude de cas. Ils concluent que l'Europe se concentrait sur le dialogue politique avec les pays possédant des ressources, que le Japon et les États-Unis investissaient dans la R&D. En revanche, l'Australie et la Chine se concentraient sur l'exploitation minière et la protection de leurs ressources minérales nationales. Les solutions adoptées résultent de l'abondance des ressources dans chaque pays, de la législation et de leur expérience historique en matière de gestion des risques d'approvisionnement.

(Løvik et al., 2018) ont répertorié 91 projets de recherche liés aux matériaux critiques initiés par la Commission européenne. En ce qui concerne la stratégie des États-Unis, (He, 2018) a réalisé une analyse comparative des actions des administrations d'Obama et de Trump. L'administration d'Obama se concentrait sur la R&D dans la chaîne d'approvisionnement en amont et augmentait la collaboration avec les alliés dans la chaîne d'approvisionnement en aval. Les actions de l'administration de Trump visent à sécuriser l'ensemble de la chaîne

d'approvisionnement et à soutenir les réseaux d'approvisionnement locaux en rouvrant des mines.

4.3.4.2.4 Les acteurs et les parties prenantes qui influencent la criticité

Nous avons créé une sous-catégorie composée de (neuf articles) désignée sous le nom d'acteurs d'influence en raison de leur rôle déterminant dans la criticité des matériaux. Ces acteurs comprennent la communauté des sciences des matériaux, les concepteurs de produits, les géoscientifiques et les experts en général. Dans ce qui suit, nous détaillerons chacun de ces acteurs en soulignant de leurs rôles respectifs et de leur impact sur la criticité des matériaux.

4.3.4.2.4.1 Communauté des sciences des matériaux

La communauté des sciences des matériaux influence la conception des produits et les potentiels de substitution (Bustamante et al., 2014). De ce fait, Il est important de diffuser les connaissances sur les matériaux critiques au sein de cette communauté, car ce sont eux qui connaissent la composition des matériaux et les propriétés nécessaires (Hofmann et al., 2018). Dans cette perspective, (Ferro and Bonollo, 2019a) ont proposé une stratégie de conception visant à sélectionner des alliages qui minimisent l'usage de matériaux critiques avec le plus faible taux de recyclage en fin de vie. De plus, (Ferro and Bonollo, 2019b; Hallstedt et al., 2016; Hallstedt and Isaksson, 2017) ont introduit un processus basé sur l'indice de criticité des alliages (CIA), qui évalue la criticité globale de l'alliage par unité de masse..

4.3.4.2.4.2 Concepteurs de produits

La conception de produits est une étape importante qui peut générer des risques significatifs liés aux matériaux critiques (Peck et al., 2015). La sélection des matériaux est le point de départ de tout concepteur de produits. Ils influencent le choix, le nombre de matériaux utilisés et la capacité réutilisation, de remise à neuf et de re-manufacturation. (Graedel and Nuss, 2014) suggèrent d'utiliser la méthodologie créée par l'Université de Yale, en assumant que ce n'est qu'une proposition préliminaire pour les concepteurs de produits.

4.3.4.2.4.3 Géo-scientifiques

(Graedel and Nassar, 2015) soulignent l'importance des données géologiques pour estimer la dimension de la disponibilité. De plus, ils lient les incertitudes entourant la criticité aux données non robustes fournies par le géologue concernant l'abondance des ressources exploitables. Ils proposent de créer une organisation internationale pour collecter des données en veillant à protéger la confidentialité des propriétaires d'informations. De plus, (Négrel et al., 2019) estiment que les géo scientifiques ont un rôle significatif à jouer dans la recherche de méthodes de traitement des minerais plus respectueuses de l'environnement et de techniques de réhabilitation ((Wall et al., 2017).

4.3.4.2.4.4 Experts en général

Le jugement des experts est présent dans les différentes évaluations de la criticité dédiées à toutes les portées. La décision des experts d'évaluer la criticité des matériaux a été fortement critiquée par (Machacek, 2017). Il soutient que les choix effectués par les experts influent sur l'évaluation. En classant certains minéraux comme "critiques", les experts orientent l'attention des décideurs politiques (qui cherchent à atténuer la criticité) vers des problèmes spécifiques. Ainsi, ils peuvent participer à la redistribution des richesses publiques vers des bénéficiaires spécifiques.

4.3.5 Discussion et conclusion de la revue de littérature systématique

4.3.5.1 L'analyse descriptive

L'analyse descriptive montre une augmentation constante du nombre d'articles publiés au fil du temps. De plus, elle met en évidence la multidisciplinarité de la recherche sur la criticité des matériaux, qui est couverte par des domaines tels que l'environnement, la technologie, l'écologie, les ressources et la production, avec des approches en sciences et technologies et en sciences sociales et humaines.

Cette analyse révèle également la diversité des parties prenantes impliquées dans ce domaine, comprenant des universitaires, des instituts de recherche privés et publics, ainsi que des consultants. Enfin, la répartition géographique des auteurs met en évidence la prédominance des États-Unis et des pays européens, suggérant que ce sont les acteurs majeurs dans cette recherche, avec une forte représentation de l'Europe.

4.3.5.2 L'analyse thématique

L'analyse thématique a mis en évidence quatre différentes thématiques de recherche le cadre conceptuel, l'évaluation de la criticité, les stratégies d'atténuation et les parties prenantes influentes mais avec différents degrés d'intérêt et de contribution.

4.3.5.2.1 Le cadre conceptuel

Le cadre conceptuel de la criticité des matériaux émerge comme un domaine de recherche prometteur malgré le faible nombre de contributions. Les débats et divergences quant à la définition des matériaux critiques sont une richesse qui ouvre des perspectives pour approfondir notre compréhension des enjeux liés à la criticité des ressources. L'alignement avec la théorie du risque offre une base solide pour évaluer et gérer la criticité des matériaux premiers, ouvrant ainsi des opportunités pour de futurs développements.

4.3.5.2.2 L'évaluation de la criticité

Les approches d'évaluation de la criticité des matériaux sont en constante évolution, reflétant la complexité de cette tâche et la nécessité de prendre en compte de nombreux facteurs. Ces approches varient en fonction de leur portée, pouvant s'appliquer à une entreprise, un pays, un contexte mondial, technologique (Helbig et al., 2016b) régional (Glöser et al., 2015) et industriel.

Notre analyse a révélé que la majorité des approches se concentre sur le niveau national. Cependant, aucune approche ne peut être considérée comme complètement exhaustive.

Néanmoins, l'approche développée par l'Université de Yale se démarque par sa popularité et son influence dans le domaine de l'évaluation de la criticité.

Un point significatif qui se dégage de notre étude est l'intégration de dimensions et de facteurs, qui sont souvent inclus sans explication ni justification suffisante. Cependant, nous avons identifié des recherches qui ont exploré certains aspects ces approches, que nous avons qualifiées d'"éléments de soutien". Ces travaux fournissent des informations complémentaires qui améliorent notre compréhension des méthodes d'évaluation de la criticité des matériaux.

La dimension du risque d'approvisionnement et celle de la vulnérabilité sont la base de l'évaluation de la criticité.

La dimension du risque d'approvisionnement est complexe multidimensionnelle, Ce qui est illustré par la diversité des facteurs qui peuvent l'influencer, allant de la concentration de la production et de la rareté des ressources à l'instabilité politique et à la volatilité des prix. Cependant, la contribution de Helbig et al. (2021a) a regroupé les indicateurs en dix catégories et offre une façon pratique de structurer cette multitude de facteurs.

Concernant la dimension de la vulnérabilité, elle peut être évaluée en considérant la situation économique et technologique, mais aussi la valeur stratégique d'une matière première particulière. Notre étude a mis la lumière deux facteurs importants pour l'évaluation de cette dimension qui sont la substituabilité et la demande future.

4.3.5.2.3 Stratégies d'atténuation de la criticité

L'analyse du corpus sur l'atténuation de la criticité des matériaux a souligné deux stratégies majeures : la substitution et l'économie circulaire.

La substitution vise à remplacer un matériau critique par un autre moins critique. Cependant, cette stratégie fait face à des défis. En effet, même si un substitut adéquat est trouvé, il pourrait

présenter des problèmes similaires de disponibilité ou d'approvisionnement. Il est recommandé de réduire la quantité utilisée afin de minimiser l'impact sur les performances.

L'économie circulaire offre une approche complémentaire pour l'atténuation de la criticité. En créant un système de boucle fermée, elle vise à optimiser l'utilisation des ressources et à minimiser le gaspillage. Notre analyse révèle que le recyclage/récupération est une stratégie clé qui a reçu beaucoup d'attention, mais d'autres stratégies, tels que la collecte et le remanufacturing, malgré leur importance, sont moins étudiés et peuvent poser des problèmes.

Les résultats de ces études soulignent la difficulté d'utiliser la substitution et le recyclage comme stratégie à court terme pour faire face aux risques liés aux matériaux critiques. Par conséquent, la collecte et le stockage de volumes élevés de produits (Rademaker et al., 2013) sont les stratégies à adopter jusqu'à ce que des progrès supplémentaires en sciences soient réalisés. La difficulté de mettre en œuvre ces stratégies est visible dans les résultats de l'étude menée par (Lapko et al., 2016), qui ont constaté que les entreprises confrontées à des problèmes de criticité des matériaux ont choisi des stratégies de gestion de la chaîne d'approvisionnement et d'approvisionnement, car elles n'étaient pas en mesure de mettre en œuvre les stratégies d'atténuation proposées dans la littérature sur les matériaux critiques.

Au-delà de ces stratégies, des efforts politiques et gouvernementaux sont entrepris pour atténuer la criticité des matériaux. Chaque pays développe une stratégie adaptée à ses propres conditions et ressources.

La réduction de la criticité nécessite des efforts de recherche et développement dans les sciences de l'ingénieur et les sciences sociales, de réglementation et de coopération internationale. Selon (Peck and Bakker, 2012) and (Weiser et al., 2015) bien que les gouvernements jouent un rôle essentiel dans la réduction de la criticité des matériaux, ils doivent également laisser place aux initiatives de l'industrie pour évoluer, et un équilibre doit être trouvé.

4.3.5.2.4 Les parties prenantes qui influencent la criticité

Cette étude a également un élément important qui influence la criticité des matières qui sont les parties prenantes. Ils sont importants en tant que sources d'informations lors de l'évaluation de la criticité. Par exemple, ils identifient les matériaux qui composent un produit et fournissent des données géologiques et autres données d'expertise lors de l'évaluation des indicateurs de criticité. Ainsi, ils doivent fournir des données actualisées, unifiées et rigoureusement générées. Ainsi, il est indispensable que ces acteurs fournissent des données actualisées, harmonisées et rigoureusement générées pour garantir la fiabilité des évaluations.

Également ils jouent un deuxième rôle lors du processus de prise de décisions techniques lors des phases de conception de produits (concepteur de produits, communauté des sciences des matériaux). Dans ce cas, leur influence a un impact direct sur le niveau futur de criticité. Il est donc essentiel de développer des méthodologies qui leur permettront d'éviter l'utilisation de matériaux critiques ou d'augmenter la criticité de d'autres matériaux. Parallèlement, il est essentiel d'intégrer ce concept et l'outil d'évaluation de la criticité dans les programmes d'enseignement universitaire de ces acteurs afin de mieux appréhender les enjeux liés à la criticité des matériaux et de prendre des décisions plus éclairées et responsables dans leurs activités professionnelles.

Ce travail de classification permet de structurer et de synthétiser le champ de recherche sur la criticité des matières premières. Ainsi, les chercheurs peuvent l'utiliser pour situer leurs propres travaux et ainsi identifier comment chaque recherche contribue à l'ensemble du domaine .En outre, cette classification peut aider à identifier les lacunes de recherche en identifiant les sujets qui ont été peu étudiés et qui méritent plus d'attention , elle permet aussi de repérer les tendances émergentes Enfin, cette classification peut aider les chercheurs à trouver rapidement des informations pertinentes dans leur recherche secondaire

4.4 Conclusion de la partie N°4

Cette deuxième phase exploratoire avait pour objectif d'identifier les éléments manquants à la gestion des risques d'approvisionnement des métaux.

En choisissant d'étudier la concrétisation des risques sous forme de crises (le cobalt, le palladium et les terres rares), nous avons identifié une piste pour la construction d'une méthodologie adaptée aux industries qui dépendent des métaux. Cette piste consiste en une approche proactive initiée par le gouvernement américain suivi par commission européenne. Elle consistait à évaluer la disponibilité, la fiabilité d'approvisionnement et l'importance d'utilisation des matériaux, labellisée évaluation de la criticité des matières. Ainsi, une matière critique est celle qui est considérée à la fois essentielle dans son utilisation et susceptible de restrictions d'approvisionnement.

L'étude approfondie des deux initiatives gouvernementales a permis de déceler le potentiel de cette approche pour être le maillon manquant est nécessaire à intégrer dans la conception de notre méthodologie. Cette affirmation découle du fait que les études de criticité tiennent compte du contexte unique de l'approvisionnement des métaux et permet de mieux comprendre les facteurs qui peuvent influencer l'approvisionnement des métaux. C'est une approche multidisciplinaire qui permet d'obtenir une image sur les facteurs tels que la disponibilité géologique, la concentration de la production mondiale, la stabilité politique des pays producteurs, le potentiel de substitution, les taux de recyclage, etc. Ainsi, elle apporte une nouvelle perspective sur l'identification et la gestion des risques liés à l'approvisionnement des métaux.

Ensuite, afin de sélectionner la méthode la plus appropriée pour évaluer la criticité des matières dans le contexte spécifique des industries dépendantes des métaux et d'explorer plus en détail

l'ensemble des facteurs de la criticité des matières, nous avons réalisé une revue de littérature systématique sur le domaine des matières critiques et de la criticité des matières.

Cette revue de littérature systématique a permis la collecte de 191 articles scientifiques dont l'analyse nous a permis d'établir que le domaine de la criticité des matières est multidisciplinaire, couvert par des approches en sciences sociales et en sciences techniques.

L'analyse nous a aussi permis de structurer le domaine quatre thèmes de recherche qui sont l'évaluation de la criticité, les "approches et éléments de soutien", l'atténuation de la criticité, et les sujets de recherche mineurs (aspects conceptuels et acteurs influents).

Ce domaine reste en cours de conceptualisation, et les contributions des chercheurs se focalisent sur les méthodologies d'évaluation de la criticité et les stratégies de réduction de la criticité.

Le cadre conceptuel offre une opportunité de recherche de développement. Cependant, le point important, c'est que la plupart des études utilisent la définition proposée par la Commission européenne qui considère que les matériaux critiques sont caractérisés par un risque élevé de perturbation de l'approvisionnement et une haute importance économique, ainsi que l'alignement de l'évaluation de la criticité des matières avec la théorie du risque.

Les approches pour évaluer la criticité des matières sont diversifiées et s'adressent à différents systèmes : une entreprise, un pays, un contexte mondial, technologique. Aucune approche ne peut se présenter comme complète. Cependant, l'approche développée par l'Université de Yale qui propose trois dimensions pour évaluer la criticité (le risque d'approvisionnement, la vulnérabilité aux restrictions d'approvisionnement, et les implications environnementales) se démarque par sa popularité et son influence dans le domaine de l'évaluation de la criticité.

Deux dimensions fondamentales se dégagent de notre corpus documentaire qui sont les risques d'approvisionnement et la vulnérabilité. Plusieurs tentatives pour cadrer ces deux dimensions en terme de facteurs ont été proposées dont les plus notables sont des revues de littératures

systematique de (Helbig et al., 2021a) (Achzet and Helbig, 2013) pour la dimension risque d'approvisionnement, ainsi que l'étude de (Helbig et al., 2016b) pour la dimension de vulnérabilité.

La réduction de la criticité a représenté une grande préoccupation dans le domaine. Deux piliers de la stratégie de réduction de la criticité ont émergé, qui sont la substitution et l'économie circulaire.

En conclusion, cette partie nous a permis d'identifier de nouveaux facteurs de risque qui sont liés à la criticité des matières ainsi que leur méthode d'évaluation. De plus, elle a apporté de nouvelles stratégies de réduction de la criticité et donc de réduction des risques. Ces deux éléments peuvent être intégrés dans la conception de notre méthodologie. Concernant les lacunes identifiées dans le domaine de la criticité des matières, elles ne représentent pas un obstacle majeur pouvant nous empêcher de considérer les éléments apportés par ce domaine.

Conclusion des phases exploratoires

Les phases exploratoires ont permis d'identifier des aspects clés de la gestion des risques et des facteurs spécifiques à l'approvisionnement en métaux.

Exploration du domaine du SCRM

Cette phase a révélé l'importance de la gestion des risques dans les chaînes d'approvisionnement et la nécessité d'approches spécifiques à chaque industrie. Pour construire la méthodologie, il est nécessaire d'intégrer les différentes étapes de la gestion des risques (identification, évaluation, traitement et suivi) dans un cadre dédié aux industries qui dépendent des métaux. Cela signifie prendre en compte les contextes, les incertitudes et les défis uniques de ces industries dans l'élaboration de la méthodologie.

L'importance de la cartographie de la chaîne d'approvisionnement a été soulignée comme une étape préliminaire essentielle. Il sera également important de créer une catégorisation structurée des risques spécifiques aux industries qui dépendent des métaux et d'intégrer les spécificités du contexte des métaux.

Exploration des crises liées aux métaux et de la criticité des matières

La deuxième phase a permis de mieux comprendre les spécificités de l'approvisionnement en métaux à travers l'étude des crises. Ensuite, elle a proposé d'intégrer les facteurs de la criticité des matériaux comme la disponibilité géologique, la concentration de la production mondiale, la stabilité politique des pays producteurs, le potentiel de substitution, les taux de recyclage, etc. Ainsi que les stratégies pour réduire la criticité des matériaux, comme la substitution et l'approche de l'économie circulaire. Elle a permis de mettre en lumière les lacunes de ce domaine de recherche.

En conclusion, la construction de la méthodologie de gestion des risques de l'approvisionnement en métaux pour les industries qui en dépendent doit suivre un processus qui intègre la cartographie du réseau d'approvisionnement, le processus de management des risques dans les chaînes d'approvisionnement, les facteurs de la criticité des matériaux et les stratégies de réduction de la criticité.

5 Élaboration d'une méthodologie pour la sécurisation de l'approvisionnement des métaux

5.1 Introduction

Le réseau d'approvisionnement des métaux est un ensemble complexe d'acteurs, de ressources et de processus de production interconnectés. À chaque étape de cette chaîne, des incertitudes sont présentes, réduisant la fiabilité de l'acheminement des ressources.

La combinaison de la complexité, la visibilité limitée, l'environnement dynamique allié à l'activité minière et au processus de transformation des métaux rendent la gestion des risques difficile. Nos études exploratoires ont révélé l'importance de la méthodologie standard de gestion des risques comprenant les étapes d'identification, d'évaluation, du traitement et du suivi. Cependant, ce processus doit être adapté au contexte spécifique à l'industrie étudiée. Dans cette perspective, nous avons identifié l'analyse de la criticité des matières comme le maillon manquant.

Cependant, pour mettre en œuvre efficacement cette méthodologie standard de la gestion des risques et l'intégration de l'analyse de criticité des matières, une compréhension approfondie du réseau d'approvisionnement et sa construction complète sont essentielles. Dans le cas de l'industrie étudiée, il est indispensable de surmonter les défis posés par la complexité et le manque de visibilité afin d'assurer l'efficacité de la gestion des risques.

Dans cette partie, nous allons présenter une approche guidée par les résultats des phases exploratoires, tout en abordant les défis liés à la visibilité et à la complexité.

1. Approche pour la sélection des chaînes d'approvisionnement en vue de la gestion des risques

Dans le monde industriel actuel, les produits sont de plus en plus complexes, nécessitant un grand nombre de ressources. Chaque ressource dispose d'une chaîne d'approvisionnement spécifique, ce qui complique la gestion des risques liés à l'approvisionnement. De ce fait, les entreprises, et donc les managers doivent faire des choix pour prioriser les études d'analyse des risques.

Afin de guider ce choix, la dimension de vulnérabilité, issue du cadre de la criticité des matières, se présente comme un cadre décisionnel pertinent. Ce dernier repose sur deux paramètres : la capacité de substitution économique et technique ainsi que l'importance économique de la ressource.

- Capacité de substitution :
 - Economique - cette dimension nécessite de définir si un métal ou une ressource devient coûteux ou indisponible, est-il possible de le remplacer par un substitut moins coûteux sans diminuer la qualité et les fonctionnalités du produit final ?
 - Technique - cette dimension nécessite de définir si un substitut est économiquement viable, est-il techniquement intégrable sans entraîner des modifications majeures au produit ou au processus de fabrication ?
- Importance économique de la ressource : nécessite l'évaluation de la contribution de la ressource à la valeur du produit ou à la marge bénéficiaire. Il s'agit aussi d'estimer les coûts associés à l'indisponibilité de la ressource tels que le coût d'arrêt de la production, les pertes de ventes et les pénalités contractuelles.

Un outil pertinent pour cette évaluation est le tableau N°15 proposé par (Duclos et al., 2010) dans le contexte de l'entreprise General Electric .

Tableau 15 : Impact de la restriction d'une ressource pour GE

% de l'offre mondiale	Impact sur les revenus	Capacité de substituer	Capacité à répercuter Les coûts	Niveau
Extrêmement significatif, X%	\$Y	Très difficile — Très unique et aucun substitut prévu	Presque impossible	Très élevé
Très significatif, 0,25X% – X%	\$0,25Y – \$Y	Difficile — Aucun substitut connu ; recherche approfondie	Difficile	Elevé
Significatif, 0,05X% – 0,25X%	\$0,05Y – \$0,25Y	Modérée — Substituts possibles Connus, mais non testés	Partiellement possible	Moyen
Faible, 0,01X% – 0,05X%	\$0,01Y – \$0,05Y	Facile — Substitut connu, mais non intégré	Relativement facile	Faible
Très faible, <0,01X%	<\$0,01Y	Très facile — Substitut prêt pour la production	Automatiquement réalisé	Très faible

À la suite de cette évaluation, les entreprises disposent d'une liste des ressources qui nécessitent une identification et une gestion des risques. Ainsi, les entreprises peuvent orienter efficacement leurs efforts vers les réseaux d'approvisionnement prioritaires.

5.2 La perte de visibilité comme obstacle et vecteur pour une approche de gestion des risques

5.2.1 La visibilité et la gestion des risques

La visibilité, dans le cadre de la gestion des risques du réseau d'approvisionnement est définie comme la capacité de collecter et d'évaluer les informations (Mubarik et al., 2021). Cela contribue à une meilleure compréhension des perturbations (de Farias et al., 2022) et facilite la prise de décision pour réduire l'exposition aux risques (Sodhi and Tang, 2019) et pour atténuer les conséquences négatives des perturbations (Razak et al., 2023).

Ainsi, la visibilité est perçue comme une forme d'immunité offrant une compréhension des interactions dans le réseau et sur la diffusion du risque. Cependant, une visibilité limitée, due à une attention exclusive sur les fournisseurs directs sans prendre en compte les niveaux

inférieurs du réseau, peut provoquer des répercussions en cascade similaires à un effet domino (Basole and Bellamy, 2014a).

Concernant les industries qui dépendent des métaux, la complexité des produits et leur fabrication ont donné naissance à des réseaux d'approvisionnement géographiquement étendus et multi-niveaux, conduisant à une perte de visibilité. Cette invisibilité entrave considérablement la capacité des organisations à répondre aux perturbations (Mubarik et al., 2021).

Pour illustrer l'importance cruciale de la visibilité, prenons l'exemple de la production du 787 Dreamliner de Boeing, dont la production a subi d'importants retards. Ces retards ont été principalement dus à des problèmes de production chez un petit fournisseur, qui était en fait un fournisseur de second rang par rapport à Boeing (Basole and Bellamy, 2014a).

La visibilité est un élément essentiel d'une gestion des risques efficace. Cependant, une étude empirique réalisée par (Sodhi and Tang, 2019) indique plusieurs obstacles entravant l'obtention d'une visibilité complète. Ces obstacles sont la complexité et les coûts élevés de la collecte d'informations, limitant ainsi la vision des entreprises au-delà de leurs premiers fournisseurs. Ainsi que la réticence à divulguer des informations qui pourraient entraîner des conséquences sur la réputation et des implications juridiques pour les fournisseurs. Enfin, la visibilité peut révéler des pratiques non durables ou non éthiques qui peuvent impacter l'image du fournisseur auprès des investisseurs et des consommateurs.

5.2.2 La cartographie des flux : outil clé pour améliorer la visibilité

5.2.2.1 Caractéristiques des outils de cartographie

La cartographie est un outil pour représenter et communiquer la structure, les différentes organisations, leurs relations et flux au sein du réseau. Elle vise à représenter la réalité de manière simplifiée (Gardner and Cooper, 2003). De plus, elle facilite la discussion et la

collaboration entre les parties prenantes ayant des perspectives différentes. Cependant, toute cartographie a ses limites : elle ne peut pas tout inclure et nécessite donc de faire des choix. En conséquence, le contenu de la cartographie dépendra de l'objet d'étude et des personnes qui réalisent cette cartographie (Fabbe-Costes et al., 2020).

Selon (Fabbe-Costes et al., 2020) et (Wichmann et al., 2020) la cartographie de la chaîne d'approvisionnement est essentielle pour améliorer la visibilité et fournir une représentation globale du réseau d'approvisionnement (Barroso et al., 2011). C'est une représentation graphique, et l'aspect visuel facilite une compréhension instantanée. En traçant l'origine des matériaux et composants, une entreprise peut mieux comprendre ses partenaires d'approvisionnement, mais aussi surveiller chaque étape de la chaîne en assurant une transparence géographique. De plus, cette représentation facilite l'identification proactive des risques et aide à comprendre leur propagation (Mubarik et al., 2021). Ainsi, elle se positionne comme un outil indispensable pour accroître la visibilité, offrant une base solide pour la compréhension, l'évaluation, la prise de décision et la communication.

5.2.2.2 Les approches de la cartographie

De nombreuses études se sont intéressées à la cartographie de la chaîne d'approvisionnement, offrant une vaste diversité de cartographies, tant en termes de données capturées, de contenus représentés que des méthodes de représentation. Cette diversité dépend fortement de l'objectif de la cartographie.

Dans cette perspective, (MacCarthy et al., 2022) identifient des cartographies axées sur la planification tactique, se concentrant sur les flux internes des entités ainsi que leurs premiers fournisseurs. Par ailleurs, (Brunt, 2000) a étudié la cartographie de l'approvisionnement de l'acier, tandis que (Suarez-Barraza et al., 2016) se sont intéressés à la cartographie de deux chaînes d'approvisionnement : celle des refroidisseurs ainsi que celle de la mise en bouteille de boisson, en s'appuyant sur le "supply chain value stream mapping".

D'autre part, certaines cartographies se destinent à la prise de décisions stratégiques, visant à identifier les entités et étapes essentielles. Par exemple, l'étude de (Roy, 2011) a cartographié la chaîne d'approvisionnement de trois entreprises focales (un producteur de vin, des oléiculteurs et une agence pour l'emploi) en Nouvelle-Zélande. De même, (Fabbe-Costes et al., 2020) ont décrit la chaîne d'approvisionnement d'une société du secteur automobile.

En outre, certains travaux adoptent une perspective globale et s'intéressent aux tendances, flux et interactions à l'échelle mondiale. Par exemple, l'étude (Fernandez-Stark et al., 2011) qui a cartographié les flux mondiaux de fruits, légumes et vêtements, ou encore (Adewuyi et al., 2014) qui ont cartographié les flux du cacao et des vêtements pour évaluer la position du Nigéria dans l'économie mondiale. Nous pouvons également citer (De Marchi and Di Maria, 2019) qui ont examiné la chaîne d'approvisionnement du cuir.

Cette diversité dans la cartographie du réseau d'approvisionnement témoigne de l'absence d'approche standardisée. Cette observation, mise en lumière par (MacCarthy et al., 2022) fait écho à l'observation de (Gardner and Cooper, 2003). Ces derniers, il y a vingt ans, avaient souligné l'absence de conventions et la grande hétérogénéité des cartographies de chaîne d'approvisionnement.

5.2.2.3 Les méthodes de cartographie

(MacCarthy et al., 2022) ont réalisé une revue de littérature détaillée sur les différentes méthodes de cartographie. Cette étude identifie les informations nécessaires pour construire une carte de la chaîne d'approvisionnement. Elle présente ensuite une hiérarchie des systèmes d'approvisionnement pour faciliter l'identification de l'unité d'analyse et aborde les sources de données, des logiciels et des solutions commerciales disponibles pour soutenir la cartographie de la chaîne d'approvisionnement.

5.2.2.4 *Éléments d'informations de base pour la cartographie*

La cartographie est composée d'éléments d'information de base indispensables qui sont les suivants.

- Les nœuds : composés d'entités principales contribuant directement aux activités à valeur ajoutée et participant secondaire comme les prestataires de services logistiques tiers, des sociétés de financement et d'assurance, entre autres.
- Les liens : ces liens représentent les interactions ou connexions entre les différents acteurs de la chaîne. Ils permettent de représenter les flux de matériel, d'information ou financiers en décrivant comment la valeur est accumulée tout au long de la chaîne.
- Les éléments secondaires qui dépendent de l'objectif de la cartographie : les actifs physiques qui comprennent des machines de fabrication, des installations de stockage et de transport, les emplacements des acteurs principaux et de leurs installations, des données opérationnelles pouvant inclure des plans de production, des performances, des capacités, des objectifs, des outils et des ressources.
- L'unité d'analyse qui est déterminée par le but, la portée et la nature de l'étude et peut englober un petit segment linéaire de la chaîne ou le vaste réseau qui capture plusieurs lignes de la chaîne.
- Le niveau de détail qui est influencé par l'objectif et l'unité d'analyse, il guide la profondeur et la précision des informations à recueillir et à afficher.

5.2.2.5 *Hiérarchie des systèmes d'approvisionnement pour l'identification de l'unité d'analyse*

Afin d'avoir une vision structurée sur les différentes cartographies des réseaux d'approvisionnement, l'étude de (MacCarthy et al., 2022) a conçu un modèle sur plusieurs niveaux (voir figure N° 28). Cette structuration est un guide pour choisir l'unité d'analyse. Elle

est composée de plusieurs niveaux d'analyse, à savoir : le niveau macro, qui inclut la chaîne de valeur globale, les réseaux d'approvisionnement et les chaînes d'approvisionnement, ainsi que le niveau micro, qui est composé de la cartographie du flux de valeur (VSM) et de la cartographie des processus.

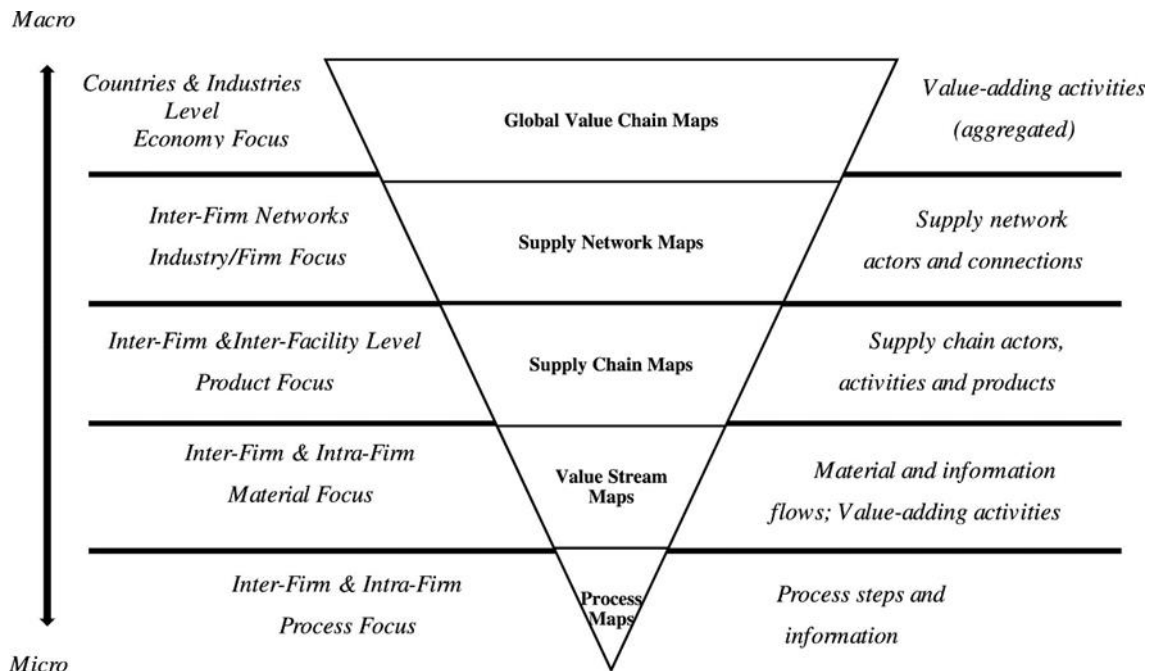


Figure 28 : Hiérarchie des cartographies des réseaux d'approvisionnement

Au niveau macro, nous retrouvons :

- la carte de la chaîne de valeur globale (GVC) qui illustre les flux de production et de commerce à l'échelle mondiale, se centrant sur les pays et les secteurs industriels pour identifier les étapes ajoutant de la valeur au niveau global. Ce niveau est pertinent pour les considérations politiques et macroéconomiques ;
- les réseaux d'approvisionnement illustrent la production de biens et de services en considérant l'ensemble du processus de la conception à la consommation. Ces réseaux peuvent être destinés à une industrie ou une entreprise, et c'est la structure générale du réseau qui est illustrée ;

- la carte de chaîne d'approvisionnement : elle représente un segment du réseau d'approvisionnement, lié à des produits ou gammes de produits spécifiques. Cette carte prend en compte les activités, les flux matériels, et les parties prenantes impliquées dans la production et la distribution.

Au niveau micro, nous retrouvons :

- la cartographie du flux de valeur (*Value Stream Mapping* ou VSM) et cartographie des processus : ce sont deux techniques largement utilisées pour représenter les flux et les processus à l'intérieur d'entreprises ou entre un acheteur et un fournisseur. La VSM s'intéresse à l'identification des activités à valeur ajoutée que la cartographie des processus détaille les séquences d'un processus spécifique.

Le choix de la structure lors de la cartographie dépendra de l'objectif de la cartographie qui dictera le niveau de détail nécessaire. Également, ce choix dépendra de la portée qui peut concerner un secteur industriel, un réseau d'entreprises, une entreprise ou un processus, du niveau de détail des données disponibles et enfin de la complexité du système tel qu'une chaîne d'approvisionnement mondiale complexe nécessiterait une approche qui prendra en compte plusieurs niveaux hiérarchiques.

5.2.2.6 Sources de données pour la cartographie

La construction de la cartographie dépend de deux types de données, les données primaires et les données secondaires.

A. Données primaires

Ces données sont obtenues directement grâce à des entretiens (Demirel et al., 2019), des observations directes (Choi and Hong, 2002), des documents d'entreprise, et de systèmes d'information de l'entreprise de type ERP (Enterprise Resource Planning). Elles offrent des informations détaillées sur les entreprises. Cependant, leur collecte est exigeante et nécessite le soutien de la haute direction et la participation du personnel de la chaîne d'approvisionnement.

Les défis de cette collecte sont similaires aux obstacles à la visibilité : la consommation importante de temps et de ressources, et la réticence des fournisseurs à divulguer certaines informations (MacCarthy et al., 2022; Miyake et al., 2010; Theodore Farris, 2010).

B. Données secondaires

Ces données sont utilisées pour les niveaux hiérarchiques supérieurs, et offrent des renseignements à l'échelle industrielle et sectorielle. Elles permettent la cartographie des activités et de leur emplacement, mais ne discernent pas les entreprises et leurs connexions

Ces données peuvent être obtenues à partir d'organismes nationaux et internationaux, de rapports industriels, et de sites web corporatifs. Des bases de données comme UN ComTrade, EuroStat et FAOStat fournissent des informations sur le commerce mondial, alors que l'OCDE et la World Input-Output Database (WIOD) mettent l'accent sur les mouvements de biens et services dans les chaînes de valeur mondiales et les relations inter-industrielles.

Pour des données spécifiques aux relations fournisseurs acheteurs, certaines plateformes payantes, telles que MergentOnline, Factset supply chain relationships, et Bloomberg, proposent des bases adaptées à divers secteurs industriels. En outre, certains prestataires, comme Sourcemap, Achille, Resilinc, et RiskMethods, se spécialisent dans la cartographie spécifique des chaînes d'approvisionnement.

Afin de cartographier la chaîne ou le réseau d'approvisionnement, il est conseillé de débiter la démarche par recueillir les données secondaires pour construire les chaînes de valeurs mondiales. Ensuite, l'entreprise a la possibilité d'affiner cette cartographie en ajoutant et supprimant des nœuds et des liens par des données primaires.

5.2.2.7 La cartographie indispensable mais difficile à réaliser

Selon l'étude de (Choi et al., 2020) les entreprises reconnaissent la nécessité et l'utilité stratégique de la cartographie. Toutefois, la mise en œuvre de cette démarche fait face à des

obstacles parfois insurmontables, rendant sa réalisation ardue. Pour argumenter cette réalité, une étude effectuée par Resilinc après l'émergence de la Covid-19 en Chine a révélé que parmi les 300 entreprises participant à cette étude, 70 % étaient encore dans la phase de collecte de données pour chercher à identifier les fournisseurs se situant dans la zone confinée. De même, à la suite des catastrophes naturelles de 2011, des responsables d'une entreprise japonaise de semi-conducteurs ont rapporté qu'une mobilisation d'une centaine de personnes durant plus d'un an a été nécessaire pour réaliser une cartographie des réseaux d'approvisionnement de l'entreprise.

5.2.3 La visibilité comme vecteur de la conception de la méthodologie

A la lumière de cette conclusion, la construction de la méthodologie pour sécuriser l'approvisionnement des métaux doit tenir compte de cette réalité qui est l'existence de partie visible et partie invisible du réseau d'approvisionnement. La figure N° 29 représente la partie visible et invisible d'une chaîne d'approvisionnement d'une ressource X destinée à l'entreprise focale X et dont le réseau d'approvisionnement est composé de quatre niveaux horizontaux et de huit niveaux verticaux.

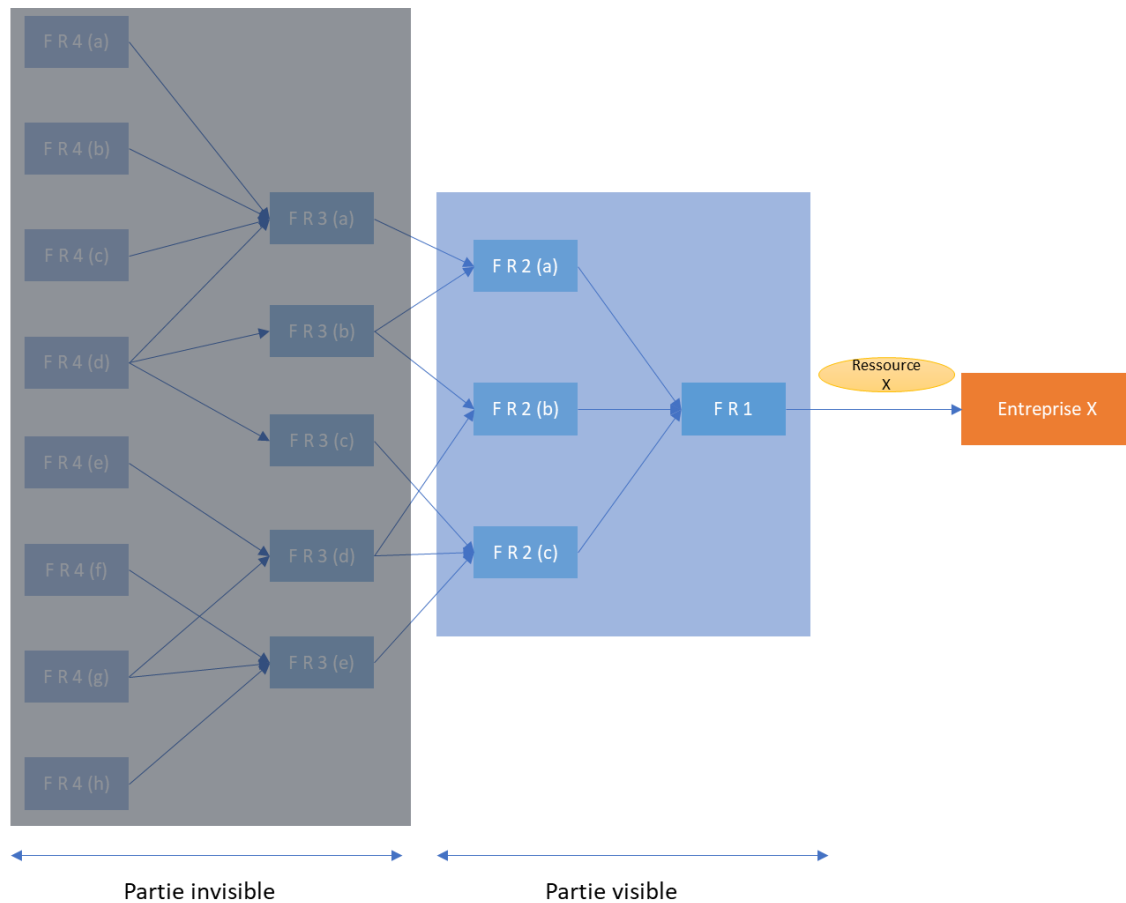


Figure 29 : Réseau d'approvisionnement - partie visible et invisible

Le premier cas concerne la gestion des risques de la partie visible du réseau d'approvisionnement. Cette partie englobe les fournisseurs de base visibles pour l'entreprise (Yan et al., 2015). Dans ce cas, toutes les informations nécessaires à la compréhension de cette portion du réseau sont accessibles. Cela inclut les données internes et externes permettant d'évaluer les risques associés aux fournisseurs et aux liens. Ainsi, les fournisseurs visibles sont ceux avec lesquels l'entreprise a établi des relations et a recueilli des données primaires, ce qui facilite l'analyse des risques.

Le deuxième cas concerne la gestion des risques liés à la partie invisible du réseau d'approvisionnement. Cette partie est plus problématique à gérer, car elle implique des défis supplémentaires liés à la collecte d'informations. L'invisibilité peut résulter de diverses raisons telles que l'indisponibilité des ressources, de contraintes de temps et de réticence des

fournisseurs à partager des données qu'ils considèrent comme sensibles. Pour surmonter ces défis, une nouvelle approche est nécessaire, et c'est ce que nous proposons dans la partie suivante du document.

5.2.4 Méthodologie pour cartographier la partie invisible de la chaîne d'approvisionnement d'une ressource X

La partie invisible signifie que les difficultés liées à la cartographie se sont concrétisées, que ce soient des contraintes liées aux ressources, au temps ou à la réticence des fournisseurs. Dans cette section, nous proposons une méthodologie axée sur l'utilisation judicieuse des données secondaires pour capturer la partie invisible du réseau d'approvisionnement.

Notre démarche s'appuie sur les conclusions de l'étude menée par (MacCarthy et al., 2022), recommandant de débiter par la collecte des données secondaires pour la cartographie. De plus, notre proposition tire son inspiration du cadre théorique avancé par le même auteur concernant la hiérarchisation des différentes cartographies. Cette démarche s'appuie également sur le cadre théorique proposé par l'étude de (Frederick, 2014) portant sur la cartographie de la chaîne de valeur globale. Ce cadre repose sur l'identification des parties prenantes publiques et privées qui ont la capacité actuelle ou potentielle de commercialiser les ressources et aussi sur l'identification de la dimension géographique en examinant les emplacements de chaque maillon de la chaîne de valeur.

5.2.4.1 Les étapes de la démarche de cartographie

- Etape 1 : Définition de l'unité d'analyse

Cette étape implique la délimitation de l'objet d'étude. Il s'agit de choisir la ressource X qui déterminera la chaîne d'approvisionnement à cartographier. Ainsi que de choisir la zone géographique à prendre en considération.

- Etape 2 : Identification des transformations physico-chimiques

Cette étape se concentre sur l'analyse du processus industriel. Il s'agit d'identifier les changements que subit la ressource X depuis sa forme initiale brute jusqu'à son état utilisable final. Cette étape nécessite l'identification précise de la nomenclature industrielle du produit à chaque étape de transformation.

- Etape 3 : Identification des industries impliquées

Cette étape vise à comprendre les secteurs industriels impliqués dans chaque étape de transformation. A la fin de cette phase, il devient possible de construire la chaîne de valeur de la production de la ressource X, comprenant les interactions entre les industries.

- Etape 4 : Identification des acteurs majeurs

Cette étape consiste à identifier les acteurs clés opérant dans chaque secteur industriel, en prenant en compte leur part du marché respective et en géolocalisant leurs sites de production. Il sera important d'identifier les relations fournisseur-acheteur entre les acteurs majeurs.

- Etape 5 : Construction du système d'approvisionnement

Cette dernière étape consiste à construire la cartographie complète du système d'approvisionnement. Elle sera composée d'un premier niveau incluant la chaîne de valeur de production et d'un deuxième niveau contenant les acteurs clés et les relations fournisseurs acheteurs. Le résultat de cette construction offre une vue sur l'ensemble des chemins possibles que la ressource X pourra entreprendre pour arriver jusqu'à l'entreprise focale.

La mise en œuvre de cette méthodologie nécessitera une étude approfondie du processus industriel qui peut être documenté en s'appuyant sur la littérature scientifique. De plus, il nécessitera d'utiliser des bases de données commerciales mondiales pour identifier les

industries ainsi que des rapports gouvernementaux qui fournissent des études sur les industries stratégiques du pays et des rapport issus de consultants mondialement connus.

Concernant l'identification des acteurs majeurs dans chaque industrie, cette étape présente des défis. Dans la situation où ni les données primaires (à cause des difficultés mentionnées auparavant) ni les bases de données gouvernementales ou privées ne sont capables de les fournir, il devient nécessaire de trouver un autre moyen. Dans ce cas, nous proposons d'utiliser les résumés publiés des études de marché à accès payant, lesquelles sont nombreuses, mais engendrent des coûts importants, entre 3000 et 7000 euros pour sur une seule industrie. Cette démarche peut être particulièrement coûteuse, étant donné que la cartographie du système d'approvisionnement implique l'interaction de nombreuses industries pour une entreprise donnée. Cependant, les résumés de ces études offrent une liste des acteurs majeurs de chaque industrie ce qui offre un point de départ pour commencer la recherche des acteurs.

Concernant les relations fournisseurs-acheteur, cette étape est également problématique. De ce fait, il est envisageable d'utiliser les rapports d'entreprise qui sont accessibles au public, au sein desquels les fournisseurs et acheteurs clés peuvent être mentionnés. De plus, les informations publiées dans les médias et autres sources de presse peuvent également être exploitées.

5.2.4.2 Qualité des données secondaires

La triangulation des données mobilisées est indispensable afin d'assurer la précision et la fiabilité des données. Cette triangulation prendra en compte l'évaluation de la qualité des données et doit s'assurer que les informations sont pertinentes, actualisées, et provenant de sources fiables.

Concernant la proposition d'identification des acteurs à partir des résumés d'études de marché. Il faut savoir que le vaste éventail d'entités offrant ce type d'étude tels que (IHS Markit, Statista, Frost & Sullivan, Gartner, IDC, ABI Research, Forrester Research), permettra de se référer à

plusieurs d'entre elles. Afin d'augmenter les possibilités de capturer une vue d'ensemble fiable de la situation.

S'agissant des articles issus des médias, la qualité de l'information peut varier considérablement. Il est recommandé de vérifier crédibilité, leur objectivité et exactitude. Il convient de s'assurer que les informations recueillies proviennent de sources fiables comme des interviews ou des déclarations de dirigeants ou de cadres d'entreprise. A titre illustratif, des médias connus tels que Bloomberg, L'usine nouvelle, the Economist, Reuters, Financial times, The wall street journal, Nikkei Asia.

5.2.5 Conclusion

Il est évident que les réseaux d'approvisionnement sont devenus très complexes. Cette complexité a un impact direct sur la visibilité. En effet, plus les réseaux d'approvisionnement sont complexes, plus chaque lien est difficile à suivre et comprendre. De ce fait, la partie invisible, difficilement identifiable, composée des fournisseurs de rangs supérieurs demeure hors de portée rendant la tâche de cartographie plus ardue. Par conséquent, la capacité d'une organisation à gérer efficacement les risques est compromise.

Notre proposition vise à pallier cette invisibilité en utilisant des données secondaires pour concevoir la cartographie. Cette approche renforce la gestion des risques en concevant la partie du système hors de portée des gestionnaires des entreprises et favorise la prise de décisions. Finalement, la prise en compte de la visibilité comme vecteur d'approche pour la gestion des risques offre une pierre à l'édifice de la conception d'une méthodologie de gestion des risques liés à l'approvisionnement des industries qui dépendent des métaux.

5.3 La complexité comme vecteur d'approche pour la gestion des risques

Afin de caractériser, de comprendre et de gérer les réseaux d'approvisionnement mondiaux d'aujourd'hui, la perspective basée sur les systèmes complexes est particulièrement utile

(Basole and Bellamy, 2014a). La lentille du réseau complexe permet de décrire les réseaux d'approvisionnement avec des propriétés structurelles et permet également d'inclure des attributs uniques à chaque entité du système (Bellamy and Basole, 2013). De plus, il existe une relation étroite entre la structure et le comportement, car les interactions entre les entités du réseau affectent la propagation des retards et des pénuries. Ainsi, une analyse de réseau complexe, permettra de mieux identifier et évaluer les facteurs qui causent les perturbations de l'approvisionnement.

5.3.1 La complexité du système réseau d'approvisionnement

La pensée systémique est un champ interdisciplinaire qui s'intéresse à l'étude des objets dans le complexité (El Falaki et al., 2021), Elle représente la capacité de voir le monde comme un système complexe (Ghadge et al., 2013).

Dans le cadre de notre étude, le réseau d'approvisionnement est considéré comme un système complexe avec une complexité structurelle et opérationnelle (Cheng et al., 2014). Ces deux complexités comprennent trois dimensions (Sharma et al., 2020) :

- La complexité horizontale qui indique la largeur de la base d'approvisionnement, car les réseaux d'approvisionnement modernes gardent généralement plusieurs fournisseurs pour le même produit afin d'atténuer les risques liés à l'approvisionnement,
- La complexité verticale associée à la profondeur de la base d'approvisionnement d'une entreprise. À mesure que la complexité des produits augmente, les entreprises focales développent des relations indirectes au-delà de leurs premiers niveaux.
- La complexité spatiale fait référence à la répartition géographique de la base d'approvisionnement et concerne principalement les activités d'externalisation de l'entreprise focale.

5.3.2 Stratégie de décomposition du système complexe

Face à cette complexité, une décomposition du réseau d'approvisionnement en sous-systèmes est essentielle pour une gestion plus efficace des risques. Cette décomposition permettra de concentrer l'identification des risques sur chaque sous-système.

Selon (Haimès, 2018), les risques dans un système complexe peuvent provenir de différentes perspectives qui se chevauchent en raison de l'interconnexion et de l'interdépendance des sous-systèmes. Ainsi, plusieurs modèles (représentations) sont nécessaires. Cependant, il est important de noter que cette segmentation ne rendra pas justice à la complexité totale, mais peut affiner notre compréhension et, par conséquent, améliorer l'identification et l'analyse des risques.

La décomposition du réseau d'approvisionnement est réalisée en utilisant une approche basée sur le scénario de fonctionnement du système comme proposée (Jiang et al., 2020), ce qui permettra d'identifier les différentes couches du système complexe. De plus, elle sera épaulée par les résultats des phases exploratoires.

Dans le cas de l'approvisionnement d'une ressource, chaque entreprise dépendante des métaux possède son propre réseau d'approvisionnement, composé de nœuds représentant les fournisseurs et de liens symbolisant les relations fournisseurs-acheteurs. Ces nœuds et liens forment la structure de la chaîne d'approvisionnement.

L'objectif de ce système est de transformer et d'acheminer la ressource nécessaire à l'entreprise focale. Voici les principales étapes de ce processus en commençant de l'extraction jusqu'à l'entreprise focale.

- Extraction du métal A : La première étape concerne l'extraction du "métal A" à partir des carrières ou des mines. Cette étape représente le nœud fournisseur de rang N. Le

métal A est ensuite acheminé vers le prochain nœud par un transporteur, ce qui représente l'arc reliant le fournisseur N au fournisseur N-1 ;

- Transformation physico-chimique : Le fournisseur N-1 procède à des transformations physico-chimiques telles que le broyage, le raffinage et le traitement chimique, offrant une ressource semi-finie du métal A ;
- Progression dans le réseau : Le métal A transformé poursuit sa progression dans le réseau d'approvisionnement en passant par d'autres nœuds et liens jusqu'à arriver à sa forme finale, prête à être utilisée par l'entreprise focale pour la fabrication du produit fini.

Il est important de noter que pendant sa progression dans le réseau, le métal A peut-être couplé avec d'autres matières premières, transformées ou non. Cela est représenté dans le schéma (voir Figure N° 30) par le couplage d'une autre branche du réseau d'approvisionnement au réseau du métal A.

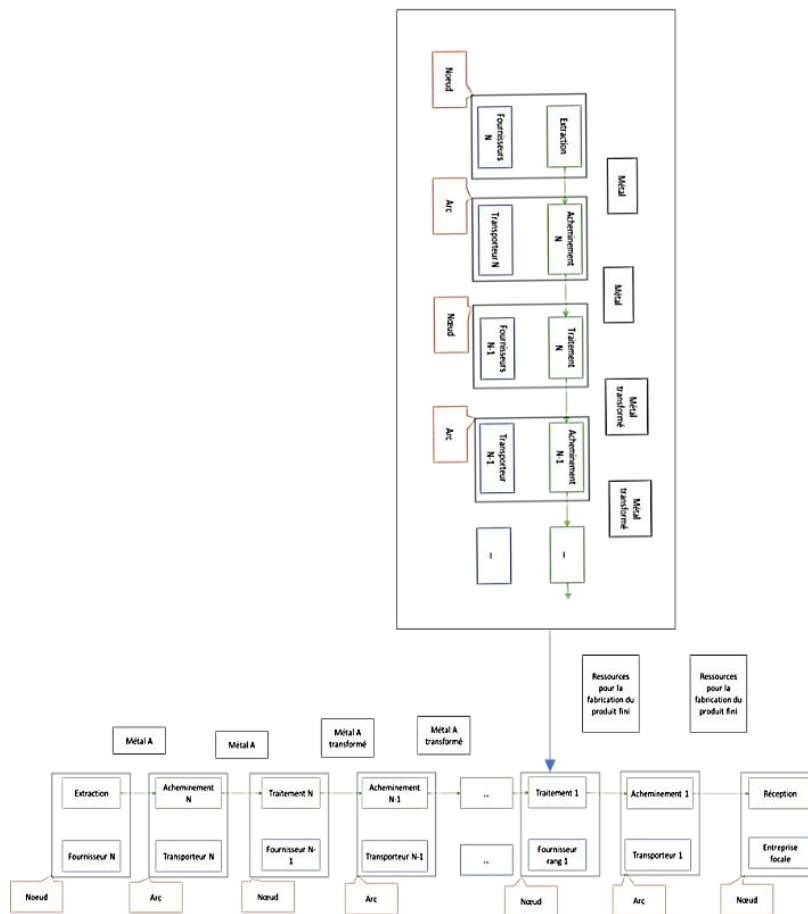


Figure 30 : Schématisation du scénario de fonctionnement du réseau d'approvisionnement

5.3.3 Décomposition du système complexe

Le réseau d'approvisionnement dans son intégralité est un ensemble d'entités et d'interconnexions dont l'objectif est de faire acheminer la matière première à l'entreprise focale. Dans ce contexte, nous proposons une décomposition en trois sous-systèmes majeurs : le système « fournisseurs », le système « structure du réseau » et le système « ressource ».

5.3.3.1 Le système fournisseur

Le réseau d'approvisionnement est organisé autour d'une entreprise focale et de ses fournisseurs. Ces derniers peuvent être directement ou indirectement associés. Cependant, ils contribuent tous à la création d'un produit final. Dans ce contexte, le système fournisseur

englobe le lieu d'activité du fournisseur, ainsi que son environnement immédiat, défini par sa situation géographique.

Sur la base des données recueillies dans les phases exploratoires et les articles identifiant les risques liés aux fournisseurs, (Ceryno et al., 2015; Chopra and Sodhi, 2004; Zhou and Xun, 2018; Zsidisin and Smith, 2005) (Hassid, 2008; K.T. et al., 2020) (Barthélemy and Courrèges, 2011), (Jansson and Norrman, 2004) (Raj Sinha et al., 2004) (Blackhurst et al., 2008) (Bouchet, 2007), (Kull and Talluri, 2008) (Chen and Wu, 2013) (Basole and Bellamy, 2014b) (Bernard and Salviac, 2009), nous avons catégorisé ces risques en trois catégories : les risques internes, les risques relationnels et les risques externes.

A- Risques internes

Cette catégorie regroupe les défis et obstacles internes d'un fournisseur qui pourraient affecter sa capacité à respecter ses engagements (Voir tableau N°16).

Tableau 16 : Risques internes du système "fournisseur"

Types de risques	Événements
Problèmes liés à la main- d'œuvre	Conflits internes tels que les grèves / Disponibilité insuffisante de main-d'œuvre
Risque financier	L'instabilité financière peut entraîner des interruptions de service, voire la faillite
Défauts dans la gestion des risques qui s'intéressent à la maturité organisationnelle et la préparation des fournisseurs en matière de gestion des risques :	Plan de prévention industriel inadéquats ou inexistant / Gestion inefficace des interruptions d'activité / Gestion inefficace de la sécurité des systèmes d'information
Défaillance du système d'information	Pannes d'infrastructure et du système d'information / Inexactitudes ou lacunes dans les informations fournies
Problèmes de qualité	Réactivité insuffisante à la Correction, Inadéquation de la Commande, Dommages et Défauts, Non-Respect des Délais de Livraison
Capacité	Limitation de capacité de production
Flexibilité	Adaptabilité face au changement du marché et flexibilité de la production Rigidité
Détérioration de la réputation	Problème éthique tels que violations des droits de l'homme ou travail des enfants. / Non-conformité réglementaire
Risques technologiques	Retard ou défauts dans l'adoption de nouvelle technologie / Procession d'une technologie exclusive

B- Risques relationnels

Ces risques concernent la dynamique des relations entre les entreprises focales et leurs fournisseurs. Tout déséquilibre dans cette relation peut perturber le bon fonctionnement de la chaîne d'approvisionnement. Ils sont regroupés dans le tableau N° 17.

Tableau 17 : Risques relationnels du système "fournisseur"

Types de risques	Évènements
Risques contractuels	Durée de contrat : incertitude découlant de la préférence pour des accords à court terme plutôt qu'à long terme, ou vice-versa / Manquement contractuel : non-respect des clauses contractuels
Défaillance de collaboration	Tensions et malentendus dus à une communication inadéquate ou à des conflits non résolus / Comportement et attitude négative
Défaillance de partage	Manque de transmission claire et efficace des informations, entravant la coordination et la prise de décision

C- Risques externes

Ce sont les risques provenant de l'environnement proche et externe du fournisseur. Ils sont regroupés dans le tableau N° 18

Tableau 18 : Risques externes du système "fournisseur"

Types de risques	Évènements
Risques naturels	Ce sont des événements naturels tels que les tremblements de terre, les inondations, les ouragans et autres catastrophes climatiques
Risques humains	Ce sont des actions humaines telles que les accidents industriels, les incendies, les pollutions, etc.
Risque pays	Instabilité et troubles politiques : risques associés à l'instabilité politique, aux changements de régime, aux troubles et aux révolutions. Risques économiques : risques liés aux conditions économiques d'un pays, incluant la croissance du PIB, le taux de chômage, l'inflation, et la volatilité des taux de change. Risques juridiques et réglementaires : risques liés aux lois et réglementations d'un pays concernant la propriété industrielle, la contrefaçon, les contrats, et les normes environnementales. Risques liés aux sanctions économiques et financières

Le point essentiel à considérer dans ce système, c'est que l'analyse des facteurs de risque énumérés peuvent être appliqués qu'aux fournisseurs de rang 1. Même si l'entreprise arrive à

obtenir des informations sur le fournisseur de rang 2, ils seront moins détaillés, et donc plus nous avançons dans les niveaux plus bas dans le réseau d'approvisionnement moins l'analyse du risque fournisseur (internes et relationnels) sera possible, pertinente et significative.

5.3.3.2 *Le système « structure du réseau »*

Le réseau d'approvisionnement n'est pas seulement un ensemble de fournisseurs, mais également constitué de liens qui connectent ces fournisseurs, assurant ainsi la circulation des ressources à travers ce réseau. Cette circulation s'étend de l'extraction jusqu'à l'arrivée à l'entreprise focale. Dans cette optique, l'architecture globale du réseau peut aussi être une source de risques. De ce fait, il est crucial d'identifier les risques qui pourraient empêcher la circulation de la ressource d'un fournisseur à un autre jusqu'à ce qu'elle atteigne l'entreprise focale. Ces risques sont regroupés dans le tableau N° 19.

Tableau 19 : Risques du système "structure du réseau"

Types de risques	Évènements
Risques réglementaires	Modifications dans les règlements d'import/export, de sécurité, et d'environnement, pouvant entraîner des arrêts ou des retards
Risques logistiques	Infrastructure d'entreposage : Insuffisance de stockage ou problèmes de sécurité Capacité maritime : Capacités insuffisante des navires ou indisponibilité des flottes. Efficacité portuaire : Engorgements, retards d'arrivée ou de départ, et infrastructures défaillantes.

5.3.3.3 *Le système ressource*

Le système ressource concerne essentiellement la matière première ou le produit semi-fini qui circule à travers le réseau d'approvisionnement. Sa disponibilité et l'accessibilité influencent le bon fonctionnement de la chaîne. En utilisant l'évaluation de la criticité des matières comme cadre théorique, il est possible d'identifier l'ensemble des risques pouvant émerger du système ressources et impacter l'ensemble du système.

Dans cette analyse il faudra utiliser la perspective globale c'est-à-dire la ressource dans un contexte mondial, et une perspective locale qui signifie la ressource au sein du système d'approvisionnement visible de l'entreprise.

L'indice statique d'épuisement (ID) : il fait référence à la limite physique et au temps restant avant que les réserves mondiales soient totalement épuisées, rendant la production irréalisable (Kim et al., 2019). Cet indice est dynamique, car de nouvelles réserves de matériaux sont découvertes. Cependant, cette mesure donne une indication sur le risque d'approvisionnement à court terme dû à la rareté géologique couplée aux demandes connues (Althaf and Babbitt, 2021b).

La dépendance au sous-produit : elle est définie comme la 'fraction de métal compagnon', qui représente la proportion de la production de certains minéraux en tant que sous-produits d'une autre production minérale. La dépendance à la production des métaux hôtes entraîne une probabilité plus élevée de perturbations de l'approvisionnement (Nassar et al., 2015b). Par exemple , le gallium, l'indium et les éléments des terres rares dépendent presque entièrement de la production d'autres minéraux (Kim et al., 2019).

La croissance de la demande : elle exprime la croissance attendue de la demande, en particulier celle provenant des technologies futures. Ce n'est pas la quantité absolue de production du matériau qui pose problème, mais plutôt la croissance relative de la demande future (Helbig et al., 2021a). Le développement rapide de la technologie affecte l'offre et la demande. Par exemple : Face à l'augmentation prévue de l'usage des véhicules électriques, la demande en métaux technologiques croîtra, incluant les PGM (Les métaux du groupe du platine) pour les piles à combustible, ainsi que le cobalt, le lithium et les terres rares pour les batteries et moteurs (Gunn, 2014).

La dépendance à la production primaire : le manque de production secondaire c'est-à-dire le recyclage, augmente le risque d'approvisionnement. Telles que les matières premières secondaires sont une source de matières premières indépendantes de la voie de production primaire, leur disponibilité rend moins probable la pénurie.

5.3.3.4 Interconnexion des systèmes fournisseurs, structure du réseau et ressource

Dans le cadre de ce système complexe, il existe des risques qui émergent de l'interconnexion des trois sous-systèmes. Ces risques sont identifiés en considérant l'ensemble du réseau d'approvisionnement, car d'après le postulat de (Guo and Haines, 2017), dans les systèmes complexes certains points communs, des interdépendances et interconnexions et d'autres relations doivent exister entre deux sous-systèmes quelconques au sein d'un système complexe.

Risque de concentration : ce facteur de risque concerne la concentration de la production par pays et par entreprises. La concentration de la production annuelle d'une matière première par pays ou par entreprise indique directement la concentration du marché et donc la possibilité d'exploitation stratégique d'une position monopolistique en période de crise ou de litige international.

La dépendance à un seul fournisseur : cela impacte la capacité de changer rapidement de fournisseur. Si l'entreprise dépend d'une seule source, elle peut être plus vulnérable aux perturbations (Chopra and Sodhi, 2004).

La multiplicité des points de transferts : il s'agit de l'implication d'un grand nombre d'acteurs ou de points de transfert (Blackhurst et al., 2008) ainsi que la manipulation excessive qui résulte des passages frontaliers et des changements des modes de transport (Chopra and Sodhi, 2004) qui peuvent amplifier les retards, augmenter les chances d'erreur et générer des problèmes de communication et de qualité.

5.4 Estimation et évaluation des risques

L'estimation des risques consiste à allouer une valeur au risque, tandis que l'évaluation des risques consistera à déterminer l'importance du risque. Elle nécessite de mesurer la probabilité d'apparition des risques ainsi que la gravité de leur impact sur le réseau d'approvisionnement. L'estimation du risque est basée sur la connaissance préalable des événements similaires. Cependant, l'estimation de la probabilité d'un événement peut s'avérer difficile, voire impossible.

Ainsi, nous distinguons deux approches pour l'estimation et l'évaluation des risques. La première repose sur l'évaluation autonome, tandis que la seconde nécessite des données externes et une investigation plus approfondie basée sur des données d'experts ou des bases de données gouvernementales.

5.4.1 Estimation et évaluation autonomes

Dans le cas où l'entreprise dispose des informations nécessaires à l'estimation et l'évaluation des risques, ce qui correspond à la partie visible de la chaîne d'approvisionnement, la tâche sera plus aisée. Les praticiens réalisant cette estimation et évaluation constitueront une équipe de travail. Ainsi, ils pourront entreprendre des évaluations semi-quantitatives basées sur des valeurs numériques relatives pour mesurer les indicateurs de risque, ce qui permettra d'évaluer et hiérarchiser les risques de manière plus détaillée que les méthodes purement qualitatives. Cette méthode nécessite la conception de tableaux décrivant des niveaux de probabilité et de gravité accompagnés d'une description qualitative pour chaque niveau.

L'étude de (Tummala and Schoenherr, 2011), présentée dans la phase exploratoire, offre un exemple de ce type de tableaux. Ainsi, les praticiens peuvent s'inspirer de cette étude et l'adapter au contexte et aux besoins de leur entreprise.

Cette façon de procéder concerne l'ensemble de la partie visible du réseau d'approvisionnement, qui par définition suppose que l'entreprise détient l'ensemble des informations sur le système fournisseur, structure du réseau, système ressource.

5.4.2 Estimation et évaluation basées sur des données externes

Cependant, certains facteurs de risque identifiés dans notre travail de recherche dépendent des données issues des experts dans le domaine économique, géologique, environnemental, géopolitique. Ainsi, grâce à notre étude exploratoire sur le cadre de l'analyse de la criticité des matières, nous avons pu identifier et créer une base de données composée d'études scientifiques et de rapports gouvernementaux offrant des informations qui peuvent être interprétées pour décrire ces facteurs et les évaluer. Dans la section suivante, nous allons exposer les méthodes de calcul et les bases de données pour différents facteurs et sources de risque.

Pour chaque facteur de risque, nous présentons la source des données et/ou la méthode de calcul, ainsi qu'une échelle d'évaluation fournie par les bases de données. De plus, nous effectuons une transformation de ces échelles en une échelle semi-qualitative, facilitant ainsi l'interprétation des résultats pour la phase de traitement des risques.

Cette échelle est composée de cinq niveaux de risque (voir tableau N° 20).

Tableau 20 : les niveaux de risque

Niveau de risque	Très haut	Haut	Moyen	Bas	Très bas
Indice	5	4	3	2	1

5.4.2.1 Le risque pays du fournisseur (système fournisseur)

L'évaluation des risques liés au pays du fournisseur peut se baser sur l'indicateur WGI qui est publié par la Banque Mondiale et qui analyse divers aspects : voix et responsabilité, stabilité politique, efficacité de la gouvernance, qualité de la réglementation, état de droit, et contrôle de la corruption. Les indicateurs sont les suivants.

- L'indicateur de stabilité politique évalue la sécurité intérieure dans un pays, en prenant en compte les conflits internes, la violence et le terrorisme.
- L'efficacité de la gouvernance évalue la mise en œuvre des politiques et la fourniture de services publics.
- La qualité de la réglementation qui évalue la qualité et l'efficacité de la réglementation gouvernementale dans des domaines tels que les marchés, la concurrence et la protection des droits de propriété.
- L'état de droit évalue le respect et l'application de la loi, l'indépendance du système judiciaire et la garantie de l'égalité devant la loi.
- Le contrôle de la corruption évalue le niveau de corruption des institutions qui va influencer le niveau de confiance des transactions.

Les valeurs varient sur une échelle de 0 à 100, les scores les plus élevés indiquent de meilleures performances.

Ci-après (voir Figure N°31) nous présentons un exemple d'évaluation de l'indicateur stabilité politique et absence de violence/terrorisme pour les pays suivants : Brésil, Chili, Chine.

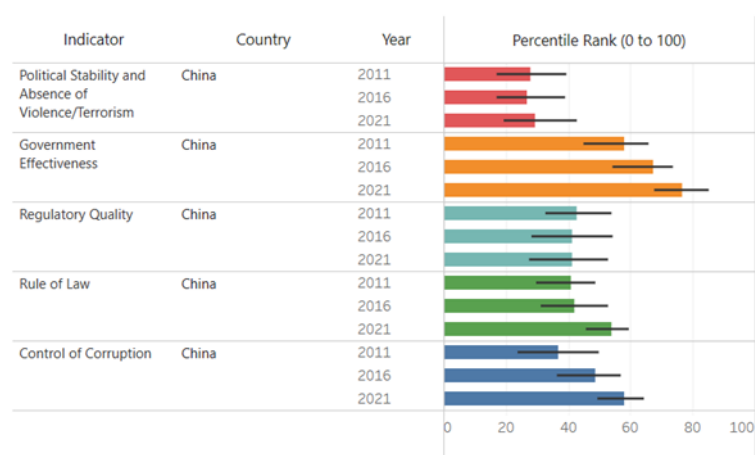


Figure 31 : Exemple d'évaluation des indicateurs de gouvernance (Worldbank, 2022)

L'échelle peut être divisée en six niveaux de performance (voir tableau N° 21) : de 'extrêmement bas' entre 0 % et 10 %, 'très bas' entre 10 % et 25 %, 'bas' entre 25 % et 50 %, 'moyen' entre 50 % et 75 %, 'haut' entre 75 % et 90 %, 'extrêmement haut' entre 90 % et 100 % (EPRS, 2016; Neff, 2018). Concernant le niveau de risque, il est inversement proportionnel, ainsi une performance très basse signifie un risque très élevé.

Tableau 21 : Evaluation des indicateurs de gouvernance

Classification	Extrêmement bas	Très bas	Bas	Moyen	Haut	Extrêmement haut
Évaluation et code couleur	0 et 10 %	10% 25%	25% 50%	50% 75%	75% 90%	90% 100%
Niveau du risque	5		4	3	2	1

5.4.2.2 Risques réglementaires (système structure du réseau)

Concernant le risque de sanctions économiques et financières, il faudra vérifier si le pays du fournisseur est soumis à des sanctions émanant soit du pays où l'entreprise acheteuse est basée soit des organisations internationales telles que les Nations Unies, qui ont une portée globale, ou l'Union Européenne, qui exerce son influence sur ses pays membres. Ces sanctions peuvent cibler des pays ou des entreprises spécifiques et peuvent prendre diverses formes. Cela inclut des restrictions sur certains secteurs économiques, comme des interdictions d'importation ou d'exportation de biens spécifiques, des limitations sur les investissements, et des restrictions sur la fourniture de certains services (DG Trésor, 2023). Par conséquent, il est essentiel d'identifier si l'une de ces sanctions pourrait affecter la capacité du fournisseur à livrer les ressources nécessaires.

Pour cette vérification, les sources d'information fiables comprennent les bases de données gouvernementales, les sites Web des Nations Unies (Nations Unies, 2023) et de l'Union européenne (European Commission, 2023). Afin d'intégrer ce risque dans l'analyse des risques,

nous considérons que l'existence d'une sanction est égale à un niveau élevé de risque et sans absence à un niveau le plus bas (voir tableau N° 22).

Tableau 22 : Evaluation des risques réglementaires

Existence d'une sanction	Oui	Non
Niveau du risque	5	0

5.4.2.3 Les risques logistiques (système structure du réseau)

L'évaluation de ce risque peut être réalisée en utilisant deux indices. Le premier est l'indice ETI (Enabling Trade Index) (Hanouz et al., 2014) qui évalue dans quelle mesure les pays ont mis en place des institutions, des politiques, des infrastructures et des services facilitant la libre circulation des marchandises à travers les frontières et vers leur destination. Cet ensemble de facteurs est organisé en quatre principales catégories (ou sous-indices) : accès au marché, administration des frontières, infrastructure et environnement opérationnel. Bien que le rapport fournisse des informations précieuses sur les conditions logistiques d'une centaine de pays, il ne délivre pas des conditions d'acceptabilité.

Le deuxième est l'Indice de Performance Logistique (LPI) (Worldbank, 2023) de la banque mondiale qui analyse la performance de la logistique des pays en se basant sur six composants : l'efficacité des douanes, la qualité de l'infrastructure, la facilité d'organisation des expéditions, la qualité des services logistiques, le suivi et traçabilité et le respect des délais.

Les résultats sont divisés en 5 niveaux de performance (voir tableau N° 23).

Tableau 23 : Evaluation des composants de l'indice de performance logistique

Niveau de performance	Mauvaise performance	Partiellement performant	Moyennement Performant	Performant	Plus performant
Valeur et code couleur	De 1,9 à 2,4	De 2,4 à 2,8	De 2,8 à 3,3	De 3,3 à 3,8	3,8 à 4,3
Niveau du risque	5	4	3	2	1

5.4.2.4 *Risque de concentration (interconnexion des trois systèmes)*

La concentration de la production par pays ou par entreprise est évaluée par l'index Herfindahl-Hirschman (HHI) dont la formule est la suivante (T. Brown, 2018) : $HHI = S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_n^2$.

Où S représente la part de marché de chaque producteur et n représente le nombre total de producteurs.

Si la valeur se situe entre 1 et 1500, le marché est caractérisé par une faible concentration (niveau de risque bas (1)). Si la valeur se situe entre 1500 et 2500, le marché est modérément concentré (niveau de risque moyen (3)). Enfin, si la valeur est supérieure à 2500, le marché est hautement concentré (niveau de risque très haut (5)) (Hache, 2020).

De même, le marché est considéré comme hautement concentré si une seule entreprise détient une part de marché supérieure à 50 % (niveau de risque très haut (5)). De plus, un marché peut également être fortement concentré lorsque plusieurs entreprises détiennent des parts appréciables du marché (Silberglitt et al., 2013).

Une autre évaluation de la concentration peut être réalisée en considérant les trois premiers producteurs, si la somme de la production des trois producteurs est supérieure à 90%, le marché est considéré comme concentré (niveau de risque très haut (5)) (Buchert et al., 2009).

La synthèse de l'estimation et de l'évaluation du risque de concentration se trouve dans le tableau N° 24.

Tableau 24 : Estimation et évaluation du risque de concentration

Evaluation	Faible	Modérée	Hautement concentré
Valeur et code couleur	1 à 1500	1500 à 2500	Plus de 2500
Description qualitative			Une entreprise détient 50 % de part de marché Trois premiers producteurs détiennent 90 % de part de marché
Niveau de risque	1	3	5

5.4.2.5 L'indice d'épuisement (système ressource)

Cet indice mesure le rapport entre les réserves mondiales d'une ressource et la production annuelle (en tonnes métriques/an) (Alonso et al., 2007) et est exprimé en 'années' jusqu'à épuisement de la ressource. La base de données utilisée est celle de l'USGS (Althaf and Babbitt, 2021b).

5.4.2.6 La dépendance au sous-produit (système ressource)

Cette dépendance est déterminée comme le rapport entre la quantité de production en tant que sous-produit et la production totale de la mine. Les données de production des sous-produits ne sont pas souvent disponibles. Cependant, il existe un ensemble d'études scientifiques qui ont réalisé l'évaluation de ce paramètre.

(Althaf and Babbitt, 2021b; Ciacci et al., 2016; Eheliyagoda et al., 2020; Fu et al., 2019; Helbig et al., 2018b; Jasiński et al., 2018b; Kolotzek et al., 2018; Miyamoto et al., 2019b; Nassar et al., 2015b; Wentker et al., 2019; Zhou et al., 2020).

Ainsi, dans le cas d'une dépendance au sous-produit, le risque est considéré comme très haut (niveau de risque = 5), sinon le risque est bas (niveau de risque = 1).

5.4.2.7 La croissance de la demande

la méthode de calcul repose sur le rapport entre la croissance de la demande additionnelle et la production actuelle (Kolotzek et al., 2018). Dans ce contexte, plusieurs études utilisent des scénarios pour estimer la future demande.

L'étude la plus utilisée dans le domaine de la criticité des matières est celle de (Marscheider-Weidemann et al., 2021), avec 156 citations. Elle évalue la croissance de la demande de onze métaux jusqu'à l'horizon 2040, comparée à la production en 2018. Cette étude considère l'utilisation des métaux dans 33 technologies émergentes ou non regroupées en plusieurs catégories « mobilité et aérospatial », « numérisation et Industrie 4.0 », « technologies de

l'énergie et décarbonisation », « recyclage et gestion de l'eau », et « réseaux d'énergie et de données ». De plus, les prévisions de la future demande en métaux sont basées sur trois scénarios pour prédire la future demande : SSP1 (Durabilité), SSP2 (Chemin du milieu) et SSP5 (Voie des combustibles fossiles). Les résultats de cette étude pour le Lithium (Li), l'Indium (In), le Platine (Pt) et le Cobalt (Co) sont illustrés dans la figure N°32.

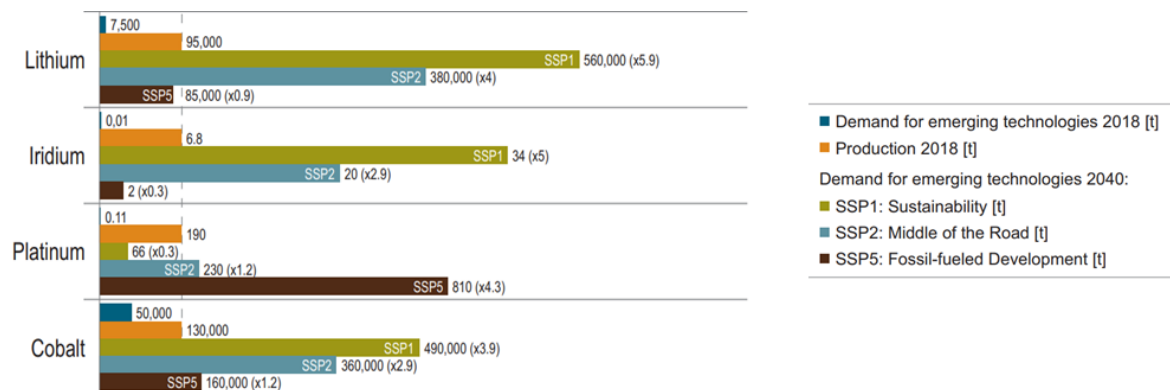


Figure 32 : Estimation de la future demande en 2040 comparée à la production de 2018

(Marscheider-Weidemann et al., 2021)

5.4.2.8 La dépendance à la production primaire (système ressource)

L'indicateur utilisé est le taux de recyclage en fin de vie qui évalue le rapport entre le flux annuel actuel de matériau recyclé et le taux annuel d'élimination de la matière première (Helbig et al., 2018a). Le rapport le plus utilisé dans les études de criticité est celui publié par le programme des nations unies pour l'environnement (UNEP) et le groupe de travail sur les flux mondiaux de métaux du panel international des ressources (Graedel et al., 2011).

5.4.2.9 Le risque naturel (système fournisseur)

Afin d'évaluer le risque naturel des pays des fournisseurs, il est possible d'utiliser le rapport WorldRiskReport qui évalue les risques naturels pour 193 pays (BE Hilft, 2022)

WorldRiskIndex (WRI) évalue le risque sous deux dimensions l'exposition et la vulnérabilité. Tel que l'exposition au risque est évaluée en utilisant cinq indicateurs qui décrivent l'exposition

des personnes aux tremblements de terre, cyclones, inondations, sécheresses et montée du niveau de la mer. Tandis que la vulnérabilité utilise des facteurs économiques, politiques, sociaux et environnementaux afin d'évaluer les capacités et les dispositions des personnes, des ménages et des sociétés à faire face à ces risques. La vulnérabilité est composée de trois dimensions : la susceptibilité, du manque de capacités d'adaptation et du manque de capacités d'adaptation.

L'évaluation est basée sur une classification de l'indicateur WRI et de ses dimensions sous cinq niveaux (voir tableau N° 25).

Tableau 25 : Evaluation de l'indicateur WRI et ses dimensions

Classification	Niveau de risque	WRI	Exposition	Vulnérabilité
Très bas	1	0 -1,84	0- 0,17	0 - 9,9
Bas	2	1,85- 3,20	0,18- 0,56	9,98 -15,87
Moyen	3	3,21- 5,87	0,57- 1,76	15,88 -24,43
Haut	4	5,88- 12,88	1,77- 7,78	24,44 -33,01
Très haut	5	12,89-100	7,79 -100	33,0- 200

5.5 Analyse des résultats

La cartographie permettra de visualiser les différents flux dans le réseau d'approvisionnement, tandis que l'estimation et l'évaluation des différents risques permettra d'identifier les risques qui doivent faire l'objet d'un traitement pour sécuriser l'approvisionnement des métaux.

Afin de capitaliser les résultats de cette évaluation des risques, nous proposons de présenter les résultats en nous basant sur les deux dimensions du réseau d'approvisionnement, une dimension horizontale qui permettra d'identifier les chemins critiques et une dimension verticale qui analysera chaque étape de l'approvisionnement.

5.5.1 Analyse horizontale du réseau d'approvisionnement

Nous définissons le chemin critique comme une séquence décrivant le parcours de l'approvisionnement de la ressource nécessaire à l'entreprise focale (voir figure N°33). Il est

caractérisé par des niveaux de risques haut (4) et très haut (5) des risques fournisseurs et des risques liés à la structure du réseau définis dans la section précédente.

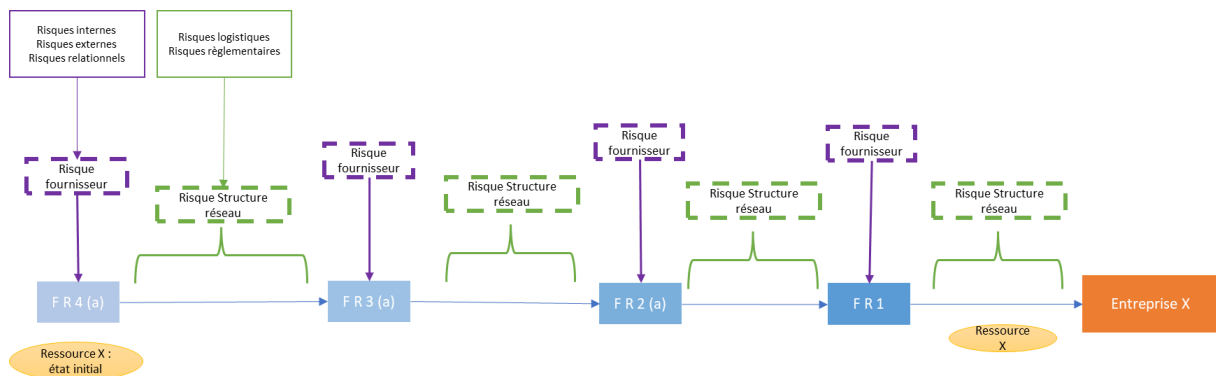


Figure 33 : Analyse horizontale du réseau d'approvisionnement

Dans le cas d'une visibilité totale du réseau d'approvisionnement, il est possible d'évaluer les chemins en se basant sur les risques fournisseurs (internes, externes et relationnels) ainsi que sur les risques de structure du réseau (les risques logistiques et les risques réglementaires).

Dans le cas de perte de visibilité du réseau d'approvisionnement, l'évaluation des chemins critiques sera basée sur les risques fournisseurs externes et les risques de structure réseau (les risques logistiques et réglementaires).

5.5.2 L'analyse verticale du réseau d'approvisionnement

Cette analyse ciblera les étapes de la chaîne de valeur de la transformation de la ressource X de son état initial qui intégrera les préoccupations liées aux activités minières jusqu'à la dernière étape de la transformation (voir Figure N° 34). Elle considère le fait que la ressource est un sous-produit ou non, les risques liés à l'interconnexion des systèmes (risque de concentration) et les risques fournisseurs définis dans la section précédente.

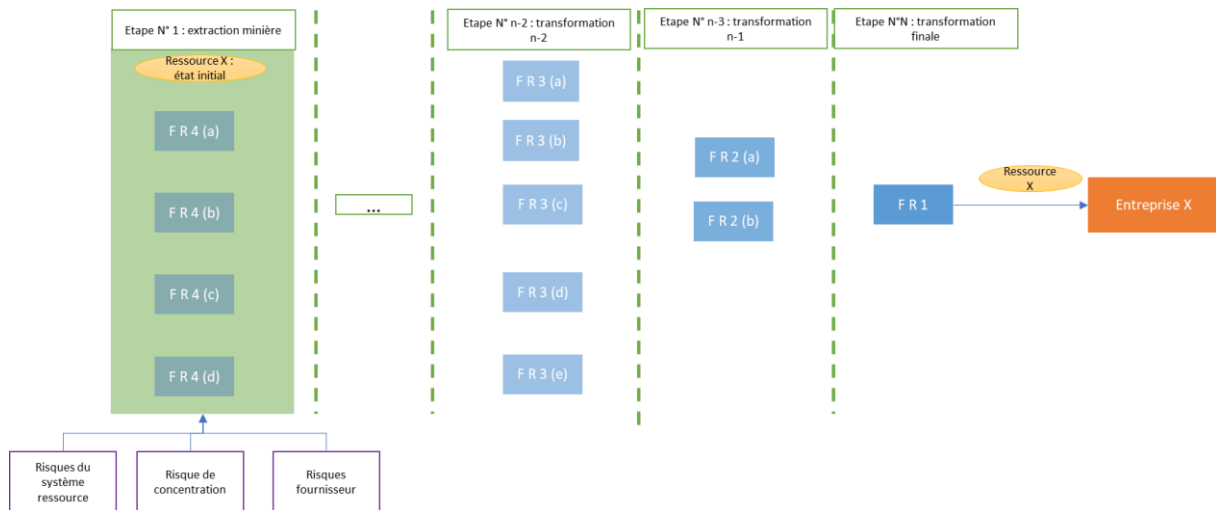


Figure 34 : Analyse verticale du réseau d'approvisionnement

5.5.3 Analyse des risques liés à la ressource

Dans cette analyse, les facteurs de risque considérés sont ceux liés à la ressource, depuis son état initial sous forme de métaux jusqu'à son état final. L'analyse apporte une vision à long terme sur les perturbations futures du réseau d'approvisionnement. Elle s'intéresse au niveau de disponibilité de la ressource en prenant en compte le temps d'épuisement, la dépendance aux sous-produits, sa dépendance aux ressources primaires et l'augmentation de la demande.

5.6 Traitement des risques

Les résultats des phases d'évaluation et d'analyse des risques devront guider la sélection des actions appropriées pour la sécurisation de l'approvisionnement des ressources (Wieland, 2013).

Dans cette démarche proactive, les actions à entreprendre sont divisées en deux catégories. La première comprend les stratégies classiques du management des risques dans les chaînes d'approvisionnement, tandis que la deuxième comprend les stratégies issues du cadre de la criticité des matières.

Les stratégies classiques du management des risques dans la chaîne d'approvisionnement incluent la création d'un stock de sécurité interne et externe, l'établissement d'un approvisionnement multiple, la nomination d'un responsable de gestion des risques de la chaîne d'approvisionnement et une équipe dédiée à l'identification, l'évaluation, l'analyse, la réduction et le suivi des risques. Enfin, s'ajoutent l'amélioration de la collaboration et de la communication avec les fournisseurs pour réduire les erreurs et augmenter la transparence dans les échanges.

Les stratégies issues du cadre de la criticité des matières comprennent deux approches. La première est la substitution qui peut être réalisée (Omodara et al., 2019a) en remplaçant une ressource par une autre ressource, ou une ressource par une autre technologie (réduire la teneur de la ressource), ou substituer le grade d'une ressource par un autre grade de la même ressource, et enfin la modification de tout le système produit. La seconde est l'économie circulaire qui incite à créer un système de boucle fermée pour la chaîne d'approvisionnement. Ceci en intégrant, la collecte, la réparation, la réutilisation et le recyclage. Par ailleurs, l'intégration des principes d'éco-conception lors de la phase de conception des produits s'insère dans la phase de recherche et développement des produits avant leur industrialisation.

Les stratégies de mitigation du risque sont axées sur des stratégies classiques éprouvées pour gérer les défis des réseaux d'approvisionnement et d'autre part sur des stratégies qui poussent les entreprises à entreprendre des modifications fondamentales de la manière dont les produits sont conçus et fabriqués.

Afin de guider le choix des stratégies à mettre en place, la cartographie, l'analyse horizontale et l'analyse verticale du réseau d'approvisionnement sont des guides indispensables.

Ainsi, la cartographie offre une vision sur l'état actuel du réseau d'approvisionnement dans lequel l'entreprise s'insère. De plus, l'application de notre méthodologie de la cartographie fournit un moyen d'identifier les chemins alternatifs.

L'analyse horizontale permet d'évaluer les risques au niveau de chaque branche du réseau d'approvisionnement et d'identifier les chemins critiques, elle permettra ainsi à l'entreprise de savoir si son approvisionnement suit un chemin critique. Si tel est le cas, le chemin le moins critique représentera l'option à rechercher lors de la reconfiguration du réseau d'approvisionnement.

L'analyse verticale permet d'évaluer les risques au niveau de chaque étape de la chaîne de valeur, ce qui se traduira par l'évaluation des risques des industries qui constituent le réseau d'approvisionnement. Cette vision verticale permettra de guider les choix de changement de technologie en se basant sur les risques liés à la ressource, les risques liés aux fournisseurs de l'industrie et aux risques de concentration du marché.

5.7 Proposition d'une méthodologie pour la gestion des risques

Dans cette partie, nous allons exposer la version finale des étapes de la méthodologie dédiée au management des risques d'approvisionnement des industries qui dépendent des métaux. Cette proposition est basée d'une part sur le processus de management des risques vu comme la colonne vertébrale de notre méthodologie, et d'autre part sur le cadre d'évaluation de la criticité des matières. Ce sont des éléments indispensables pour la prise en compte des préoccupations émergeant des activités minières. Ils permettent d'augmenter la visibilité en amont de la chaîne et de mieux appréhender la complexité du réseau d'approvisionnement (Voir Figure N° 35).

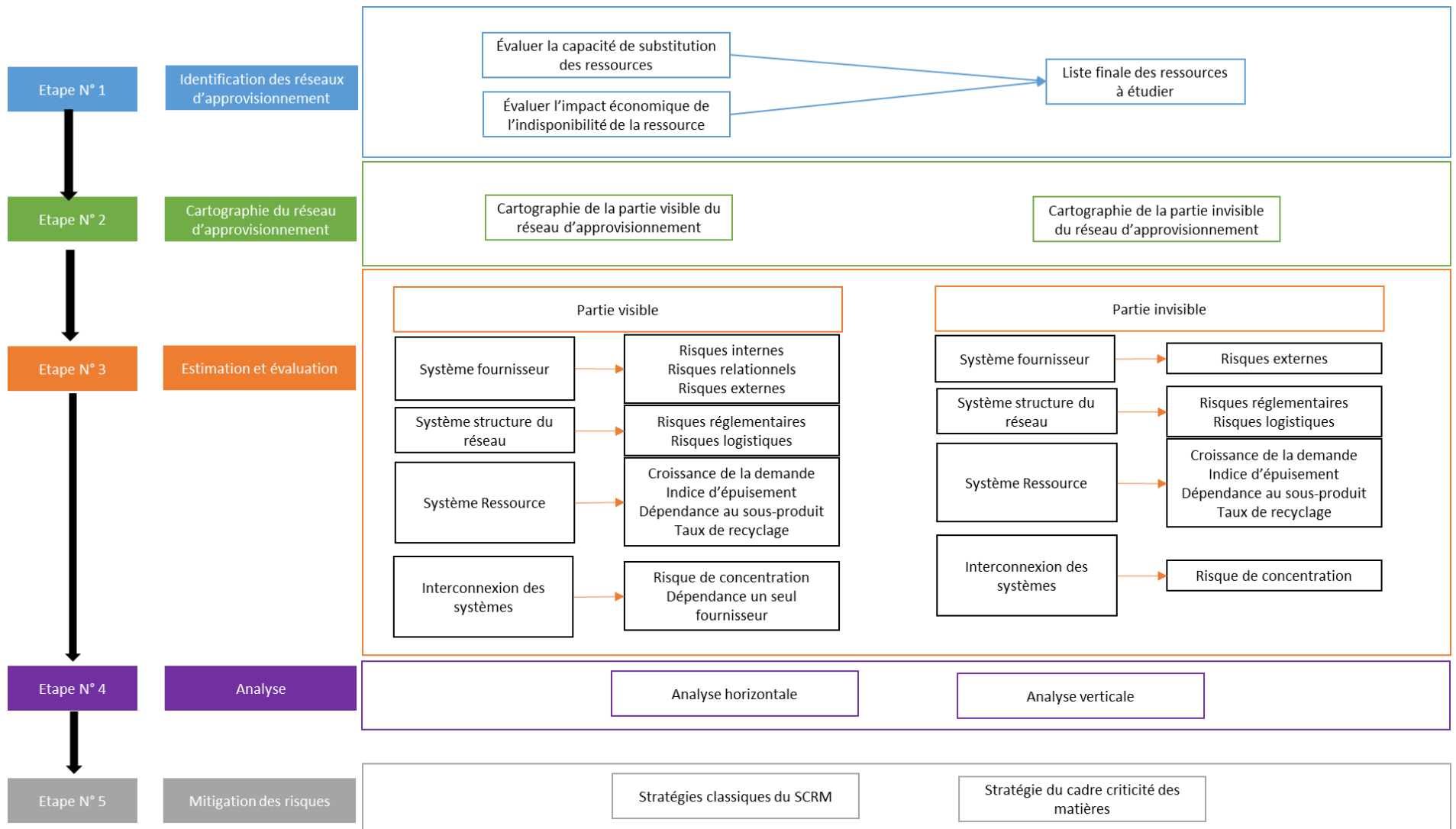


Figure 35 : Méthodologie de gestion des risques d'approvisionnement des métaux

La méthodologie est composée de 4 étapes itératives et dépendantes qui se décompose ainsi.

Première étape : Identification des réseaux d’approvisionnement qui doivent être priorisés.

Cette identification est réalisée en se basant sur l’évaluation de la capacité de substitution des ressources et sur l’impact économique sur l’entreprise en cas d’indisponibilité de la ressource.

Deuxième étape : Cartographie de la partie visible du réseau d’approvisionnement en utilisant les données primaires détenues par l’entreprise, puis cartographie de la partie invisible du réseau d’approvisionnement en utilisant la méthodologie de cartographie précédemment exposée.

Troisième étape : Estimation et évaluation des risques issus de la partie visible et de la partie invisible du réseau.

- *Estimation et évaluation des risques du réseau visible*

Pour le système fournisseur, les risques internes et relationnels seront évalués de manière autonome et en se basant sur les informations dont dispose le manager. Cependant, les risques externes du système fournisseur, les risques du système structure du réseau, les risques du système ressource et les risques de l’interconnexion des systèmes dépendront des données externes.

- *Estimation et évaluation des risques du réseau invisible*

Cette estimation et évaluation seront basées sur la cartographie de la chaîne de valeur globale et de la chaîne d’approvisionnement composée des fournisseurs majeurs. Ce cadre ne reflète pas la réalité complète, mais distingue les acteurs majeurs. Cependant, étant donné que les fournisseurs majeurs exercent une grande influence sur le marché global et donc sur les réseaux d’approvisionnement, l’estimation des risques de ce réseau est pertinente et permettra de fournir les points critiques.

Dans cette analyse, les risques internes et relationnels du fournisseur ne pourront pas être évalués.

Quatrième étape : Analyses horizontale et verticale du réseau qui permettront de capitaliser les résultats de l'estimation et de l'évaluation des risques pour fournir un guide et orienter les choix de stratégies pour la mitigation des risques.

Cinquième étape : Mitigation des risques en ayant une vision globale sur les incertitudes et les risques dont fait l'objet le réseau d'approvisionnement de la ressource. Dans cette étape, les praticiens doivent choisir des stratégies de mitigation issues du domaine du SCRM ou issues du cadre de la criticité des matières.

5.8 Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté les étapes de conception de notre méthodologie pour la gestion des risques d'approvisionnement destinée aux industries qui dépendent des métaux. Cette conception est guidée par la prise en compte des défis émergeant du contexte unique de ces chaînes d'approvisionnement. Plus précisément, elle prend en considération les défis de visibilité, de complexité et des préoccupations liées aux activités minières et aux transformations de ces métaux en ressources utilisables par les entreprises.

En cherchant à répondre à chaque défi et à l'intégrer dans la gestion des risques, nous avons conçu une méthodologie basée sur cinq étapes (identification des réseaux d'approvisionnement, cartographie des réseaux d'approvisionnement sélectionnés, estimation et évaluation des risques, analyse des risques, mitigation des risques).

Cette méthodologie admet le défi de la visibilité, tout en proposant une approche pour le surmonter en utilisation des données secondaires. De plus, elle admet la complexité et suggère de décomposer le système en trois sous-systèmes distincts. Cette démarche permet d'analyser les risques dans chaque sous-système ainsi que les risques issus de leur interconnexion.

De plus, il est évident que l'identification des risques est la tâche la plus critique et la plus difficile, car il est impossible d'identifier toutes les incertitudes. Néanmoins, notre méthodologie propose une catégorisation basée sur deux études exploratoires.

Enfin, cette méthodologie prend en compte le fait que tous les risques ne peuvent pas être quantifiables. De ce fait, elle propose de considérer le domaine de la criticité des matières comme une mine d'informations offrant des indicateurs et des études réalisées par des chercheurs de différents domaines de recherche.

Dans la partie qui suit, nous appliquerons la méthodologie proposée sur un cas d'étude portant sur les plaquettes de silicium (*Raw wafer*) afin de démontrer son applicabilité.

La méthodologie est structurée autour de cinq étapes principales : identification des réseaux d'approvisionnement, cartographie des réseaux sélectionnés, estimation et évaluation des risques, analyse des risques et enfin, leur mitigation. Elle aborde le défi de la visibilité en suggérant l'utilisation de données secondaires et traite de la complexité en recommandant la décomposition du système en trois sous-systèmes distincts. Cette division permet une analyse approfondie des risques associés à chaque sous-système, ainsi que des risques liés à de leur interconnexion.

Il est à noter que l'identification des risques représente le segment le plus critique et le plus complexe de la méthodologie. Notre approche propose une catégorisation des risques basée sur les résultats de deux phases exploratoires.

Enfin, notre méthodologie prend en compte le fait que tous les risques ne sont pas nécessairement quantifiables. À cet égard, elle suggère de recourir au domaine de la criticité des matières comme une source riche en indicateurs et en études provenant de divers champs de recherche.

6 Application de la méthodologie au cas de la fabrication des plaquettes de silicium (Raw wafers)

6.1 Introduction

La visibilité des chaînes d’approvisionnement n’est pas un acquis. De ce fait, certains segments demeurent méconnus des managers. Ces segments occultés sont indispensables au bon fonctionnement de l’ensemble du réseau et nécessitent une gestion des risques. Dans cette optique, cette dernière partie du manuscrit est consacrée à l’application de la méthodologie proposée pour sécuriser l’approvisionnement des industries dépendantes des métaux centrée sur la partie invisible de ces réseaux. Nous avons choisi comme étude de cas le réseau d’approvisionnement des plaquettes de silicium également appelé « *Raw wafers* », en considérant l’ensemble du réseau d’approvisionnement comme invisible. Ce choix s’explique par le rôle central que jouent ces *Raw wafers* dans la fabrication de nombreux produits électroniques.

L’objectif de cette partie est de tester la méthodologie sur un cas concret, et ainsi de révéler les nœuds critiques liés à l’approvisionnement de *Raw wafers*. Ainsi, nous suivrons les cinq étapes de la méthodologie présentée dans la partie précédente. Premièrement, nous justifierons le choix du terrain en expliquant l’importance des *Raw wafers* pour l’ensemble des industries dépendantes des métaux. Par la suite, nous déploierons l’approche proposée pour cartographier la partie invisible du réseau d’approvisionnement. Après avoir établi cette cartographie, nous estimerons, évaluerons et analyserons les risques liés aux systèmes (fournisseurs, structure du réseau, ressources) et détaillerons l’interconnexion des trois systèmes. Enfin, nous examinerons les stratégies à adopter pour atténuer ces risques.

6.2 Etape N° 1 : l'importance des Raw wafers

Dans la première partie du manuscrit, nous avons expliqué l'importance de l'industrie électronique et son rôle crucial en tant que catalyseur pour les autres secteurs (automobile, santé, télécommunications, énergie, etc.). Nous avons décrit en détail la chaîne de valeur globale de l'industrie électronique. Rappelons que cette chaîne de valeur est composée des intrants, des composants électroniques, des sous-ensembles électroniques ainsi que de la distribution et la vente du produit (Frederick and Gereffi, 2013) (Frederick et al., 2017).

Dans cette étude de cas, notre attention se porte sur une ressource clé que sont les plaquettes de silicium ou *Raw wafers* (voir figure N° 36). Cette ressource est indispensable à la fabrication d'un composant essentiel dans l'industrie électronique qui est le circuit intégré.

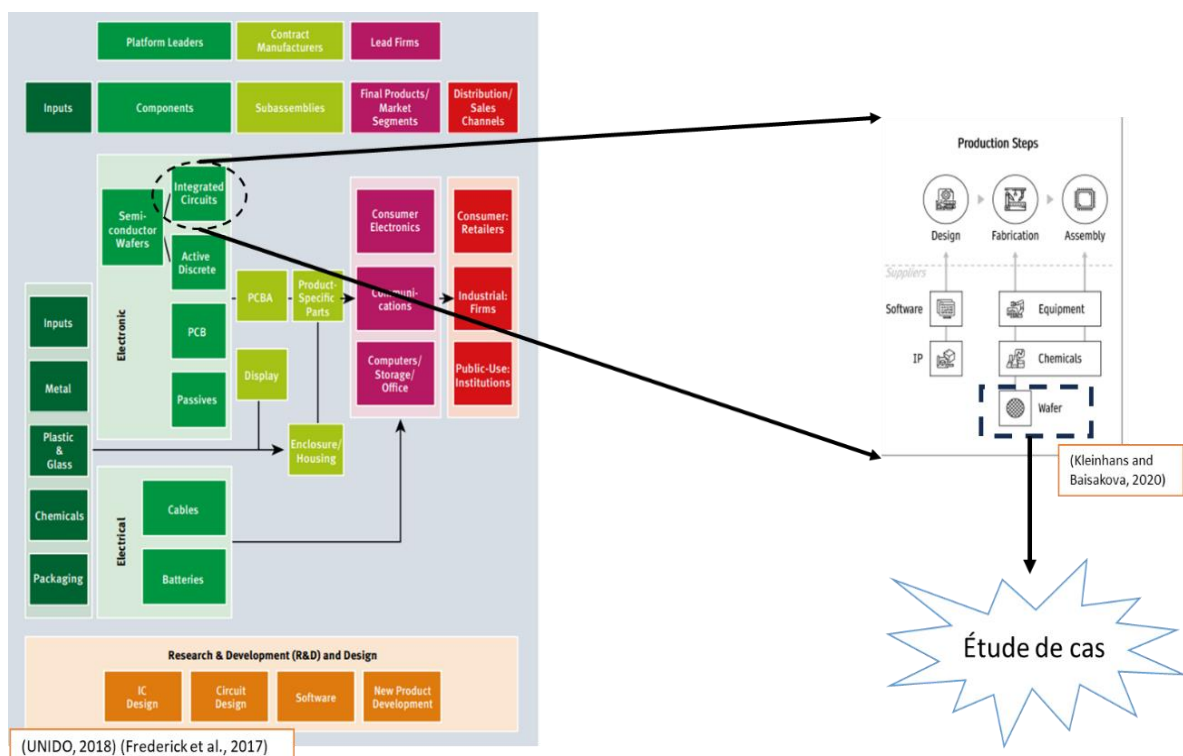


Figure 36 : La place du Raw wafer dans la chaîne de valeur de l'industrie électronique

(UNIDO, 2018) (Frederick et al., 2017; Kleinhans and Baisakova, 2020)

Afin de justifier ce choix, nous allons présenter la chaîne de valeur permettant l'obtention du circuit intégré, également nommé semi-conducteur.

6.2.1 Chaîne de valeur de l'industrie des semi-conducteurs

La chaîne de valeur de l'industrie des semi-conducteurs a fait l'objet de plusieurs études issues d'organismes internationaux, nationaux et de consultants privés. Ces études sont réalisées afin de déterminer la position stratégique des pays et de comprendre l'impact des décisions politiques sur les étapes de la chaîne de valeur de ce produit. Par exemple, le rapport de (Commerce et al., 2021) a noté que la part des États-Unis dans la production mondiale de semi-conducteurs a connu une baisse significative, passant de 37 % en 1990 à seulement 12 % aujourd'hui. Les prévisions sont encore plus pessimistes si aucune stratégie globale américaine n'est mise en place pour soutenir cette industrie cruciale. Un deuxième rapport de (Poitiers and Weil, 2022) a révélé que l'Europe ne représente que 9 % du marché mondial, principalement dans les étapes de conception et la fourniture d'équipements de pointe.

Afin de décrire cette chaîne de valeur, nous allons nous référer aux études listées ci-après.

- La chaîne de valeur mondiale des semi-conducteurs : un guide technologique pour les décideurs politiques (Kleinhans and Baisakova, 2020).
- Chaînes de valeur mondiales et développement industriel : leçons tirées de la Chine, du Sud-Est et de l'Asie du Sud (UNIDO, 2018).
- Évaluation approfondie de la chaîne d'approvisionnement des semi-conducteurs (Mann and Putsche, 2022).
- Construire des chaînes d'approvisionnement résilientes, revitaliser la fabrication américaine, et favoriser une croissance à base élargie (Commerce et al., 2021).
- La chaîne d'approvisionnement des semi-conducteurs : évaluation de la compétitivité nationale (Khan et al., 2021).

- Mesure des distorsions sur les marchés internationaux : la chaîne de valeur des semi-conducteurs. (OECD, 2019).
- Loi sur les puces de l'UE pour renforcer la puissance technologique de l'Europe et renforcer l'économie (Slijkerman, 2022).
- L'écosystème des semi-conducteurs et des matières premières essentielles à l'ère de la grande rivalité des puissances (Teer et al., 2022).
- Étude sur l'écosystème électronique : aperçu, évolutions et position de l'Europe dans le monde : rapport final (CARSA et al., 2020).
- Marché aux puces : analyse de la loi européenne sur les semi-conducteurs (Poitiers and Weil, 2022).

Dans ces rapports, les circuits intégrés sont également désignés sous les termes de semi-conducteurs ou de puces informatiques (OECD, 2019). Afin d'obtenir les informations sur ce produit, il est conseillé d'utiliser le terme « semi-conducteur », car c'est la terminologie couramment utilisée dans les rapports.

Le semi-conducteur est le cœur et le cerveau des équipements électroniques modernes. Ils stockent l'information et effectuent les opérations logiques essentielles au bon fonctionnement des appareils tels que les smartphones, les ordinateurs et les serveurs (OECD, 2019).

La chaîne d'approvisionnement des semi-conducteurs est l'une des plus complexes au monde par son caractère global et la multitude d'acteurs impliqués. La production d'une seule puce informatique nécessite plus de 1000 étapes et peut traverser les frontières internationales jusqu'à 70 fois avant d'atteindre le client final (Khan et al., 2021). Une estimation suggère qu'une grande entreprise de semi-conducteurs basée aux États-Unis pourrait avoir jusqu'à 16000 fournisseurs mondiaux (OECD, 2019).

L'industrie des semi-conducteurs est composée de quatre grands acteurs : les IDM (Integrated Device Manufacturers) qui conçoivent et fabriquent des circuits intégrés (CI) comme Intel (US) ou Samsung (Corée du sud) ; les entreprises « *fabless* » qui se concentrent uniquement sur la conception de CI comme Qualcomm (US), Nvidia (US) et HiSilicon (Chine) ; les entreprises de fonderie qui s'occupent exclusivement de la fabrication de CI (Hung et al., 2017). Une fois le CI fabriqué soit par la fonderie, soit par l'IDM, la puce doit être testée, assemblée et emballée. Cette dernière étape est réalisée soit par la fonderie, soit par l'IDM, soit par des entreprises d'assemblage et de tests de semi-conducteurs (OSAT) (Kleinhans and Baisakova, 2020).

Afin d'illustrer cette diversité dans les modèles opérationnels, prenons l'exemple d'Intel qui est un IDM. Il conçoit, produit et assemble ses processeurs (principalement) lui-même. En revanche, les processeurs AMD sont conçus par AMD, une *fabless* (sans usine) et sont produits dans les usines de TSMC à Taïwan (fonderie) puis emballés par SPIL (OSAT). AMD et Intel produisent des processeurs, mais se basent sur deux modèles opérationnels différents (Kleinhans and Baisakova, 2020).

Les principales étapes de la chaîne de valeur du semi-conducteur sont la conception, la fabrication et enfin le test et l'emballage (voir figure N° 37). Elles sont décrites ci-après.

- La conception de puces est réalisée par l'IDM ou les *fabless* et elle dépend des logiciels de conception et de la propriété intellectuelle (Intellectual Property blocks).
- Le processus de fabrication est réalisé soit par des IDMs, soit par des fonderies. Il nécessite des équipements de fabrication, des produits chimiques et des wafers de silicium pour produire des puces.
- La phase d'assemblage est réalisée soit par des IDMs, soit par des OSAT. Elle nécessite des équipements et des produits chimiques (Kleinhans and Baisakova, 2020).

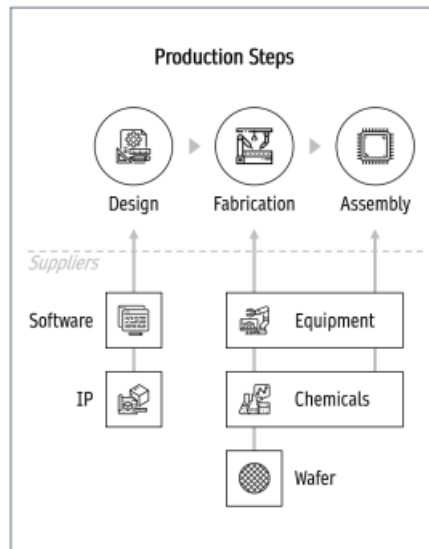


Figure 37 : Les étapes de production du circuit intégré (Kleinhans and Baisakova, 2020)

6.2.2 Importance des semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont essentiels au fonctionnement de nombreux appareils de notre quotidien (Kleinhans and Baisakova, 2020). De plus, ils sont présents dans divers secteurs critiques tels que la santé, les transports, l'énergie, la défense, la sécurité et l'espace (Commission européenne, 2022). Par exemple, une seule voiture moderne peut nécessiter plus de 100 types de semi-conducteurs pour diverses fonctionnalités comme les écrans tactiles, les contrôles du moteur, les caméras d'assistance au conducteur (Commerce et al., 2021).

Les semi-conducteurs ont également une importance géopolitique, devenant un enjeu dans la rivalité technologique entre les États-Unis et la Chine. Les sanctions sur les semi-conducteurs sont devenues un outil de pression politique (Kleinhans and Baisakova, 2020).

Cette industrie a également une importance commerciale, comme l'illustre le cas de la Chine qui a importé des semi-conducteurs pour une valeur de 301 milliards de dollars en 2019, surpassant ses importations de pétrole brut (238 milliards de dollars en 2019) (Barrett, 2020).

L'importance de cette industrie est reconnue mondialement, et de nombreux pays accélèrent leurs efforts pour gagner davantage d'autonomie dans cette industrie, voire pour assurer leur souveraineté. Les États-Unis ont planifié un investissement massif de 22 milliards de dollars (Charboneau, 2020) pour renforcer leur position dominante dans cette industrie. L'Europe reconnaît la valeur inestimable des semi-conducteurs, les considérant comme une clé à sa souveraineté numérique. Ainsi, elle a mis en place en 2022 la loi sur les semi-conducteurs (nommée *Chips Act*) avec pour objectif d'augmenter la part de la production de puces de l'UE à 20 % du marché mondial (European Commission, 2020) (Poitiers and Weil, 2022).

1.1. Le *Raw wafer* : description et importance

Dans la chaîne de valeur des semi-conducteurs, notre attention se porte sur l'étape de fabrication. Cette étape requiert jusqu'à 300 ressources dont beaucoup nécessitent une technologie avancée pour leur production (Ravi, 2021). Une des ressources essentielles est la plaquette de silicium brut, également appelée *Raw wafer*.

Les plaquettes de silicium brut sont des disques extrêmement purs, lisses et fins de silicium monocristallin (Williams 2000). Historiquement, leur diamètre varie entre 50 mm et 450 mm (Voir figure N°38).

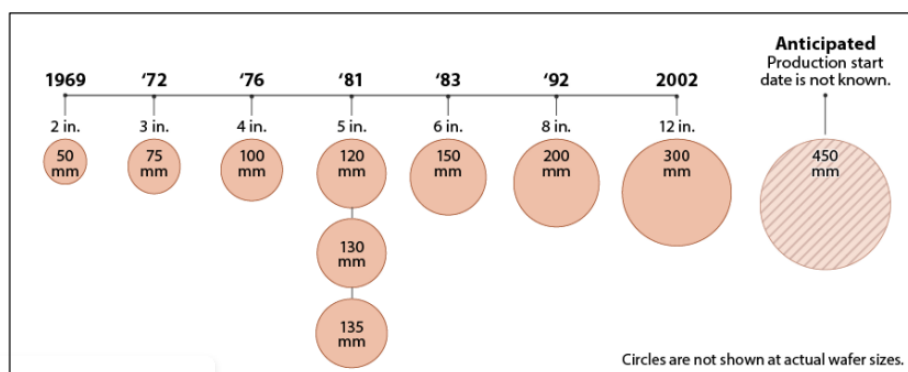


Figure 38 : Evolution du diamètre du Raw wafer (Platzer et al., 2020)

Le *Raw wafer* est la base et le point de départ de la fabrication des semi-conducteurs (Voir figure 39). Ainsi, chaque circuit intégré présent dans les smartphones, ordinateurs, voitures et appareils médicaux contient une partie de cette plaquette de silicium.

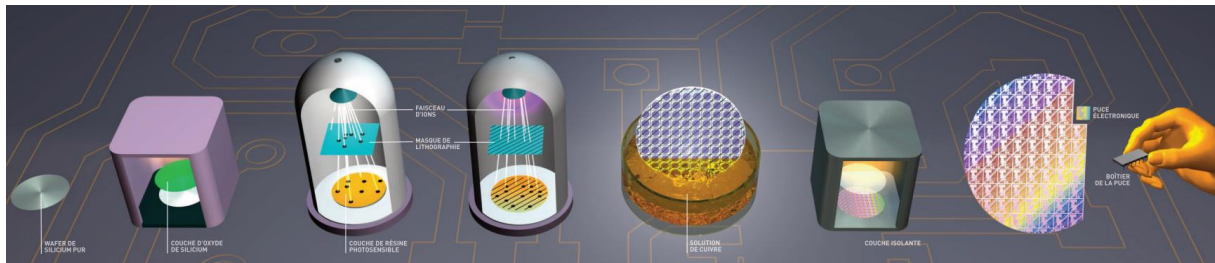


Figure 39 : Fabrication d'une puce électronique (CEA, 2011)

Une indisponibilité, même temporaire, de ces plaquettes pourrait entraîner des répercussions ne se limitant pas à l'industrie électronique. Elle aurait un impact également sur les nombreuses industries dépendantes des produits électroniques pour leurs produits.

Notre intérêt pour cette étude de cas découle aussi du fait de l'inexistence des études axées sur les chaînes de valeur des ressources, notamment le *Raw wafer*. Bien que certaines études, telles que celles de (Teer et al., 2022) et (Khan et al., 2021) se soient intéressées aux principaux fournisseurs de *Raw wafers*, elles n'ont pas approfondi la chaîne de valeur de cette ressource. Cela signifie que les frontières de leurs études ne couvrent pas les chaînes de valeur des ressources d'entrée.

Le *Raw wafer* joue un rôle central dans l'industrie électronique et son approvisionnement doit faire l'objet d'une analyse des risques. Ainsi, notre méthodologie va permettre d'apporter de la transparence et de contribuer à assurer la sécurité des multiples chaînes de valeur imbriquées.

6.2.3 La substitution du *Raw wafer*

Le deuxième point à prendre en compte est la possibilité de substitution du *Raw wafer* basé sur le silicium.

Dans le secteur de la microélectronique, l'arséniure de gallium (GaAs) est considéré comme un matériau de substitution au silicium. Le GaAs présente une efficacité moindre et est limitée à des applications spécifiques (Blengini et al., 2020a).

En dépit des avancées scientifiques dans les matériaux semi-conducteurs, le silicium est le matériau le plus utilisé pour le *Raw wafer*. Cette situation découle du fait que le silicium présente une capacité à agir comme conducteur et isolant, selon les conditions thermiques et énergétiques auxquelles il est soumis. De plus, c'est l'un des éléments chimiques les plus abondants sur la Terre (IRDS, 2023).

6.3 Etape N° 2 : Cartographie du réseau d'approvisionnement du *Raw wafer*

Afin de cartographier le réseau d'approvisionnement, nous allons suivre les étapes de la méthodologie que nous avons proposée dans la partie 5. Il s'agit d'identifier les processus industriels permettant l'obtention de la ressource, d'identifier les industries, d'identifier les acteurs majeurs et les liens fournisseurs-acheteurs, avant de procéder à la cartographie du réseau d'approvisionnement.

6.3.1 Description du processus de production du *Raw wafer*

Pour construire la chaîne de valeur globale, nous devons identifier les différentes transformations physico-chimiques impliquées dans la fabrication du *Raw wafer*. Ceci implique une connaissance détaillée du procédé de fabrication.

Afin d'obtenir les informations nécessaires à la description du procédé industriel, nous avons consulté les ouvrages et des articles scientifiques suivants : (Franssila, 2010), (Seshadri Seetharaman, 2013), (Williams, 2000), (Xakalashe and Tangstad, 2011), (Dixit et al., 2017) (Eranna, 2014), (Boubault, 2021), (Fisher et al., 2012), (Chalamala, 2018), (Hashim, 2006), (Hashim et al., 2004; Mahajan, 2004).

Le *Raw wafer* trouve son application dans des dispositifs semi-conducteurs très complexes qui nécessitent du silicium de haute pureté. Cette pureté, appelée qualité électronique, varie de 9N à 11N (99,999999999% à 99,999999999% de silicium pur) (Seshadri Seetharaman, 2013). Par conséquent, pour obtenir ce niveau de pureté, diverses étapes sont nécessaires pour purifier le silicium-métal (Franssila, 2010). Toutes les étapes du processus visent à atteindre un degré de purification adapté aux applications de haute technologie (Williams, 2000). L'utilisation du silicium dans les circuits intégrés est due à ses propriétés semi-conductrices et le fait qu'il présente un bon compromis coût-performance (Chalmin and Jegourel, 2019).

6.3.1.1 Production du silicium-métal de qualité métallurgique (MGS)

Le silicium-métal n'est pas naturellement présent comme tel dans la nature, mais principalement sous forme de dioxyde de silicium (SiO_2) nommé silice (Dixit et al., 2017). Ce dernier est sous forme de sable quartzique ou de quartz (Xakalashé and Tangstad, 2011).

La production de silicium-métal, également appelé silicium de qualité métallurgique (MGS) (Seshadri Seetharaman, 2013), est basée sur un procédé industriel qui commence par l'extraction du quartz qui sera lavé et broyé (El-Sherif, 2017). Ensuite, le SiO_2 subira une réduction carbothermique dans un four électrique à arc submergé (Xakalashé and Tangstad, 2011) qui est chauffé jusqu'à plus de 1900 °C (Fisher et al., 2012) en lui ajoutant des sources de carbone comme le charbon de bois (Williams, 2000).

À ce stade du processus, le silicium-métal est sous forme liquide (Seshadri Seetharaman, 2013) et sera raffiné, solidifié et broyé (Schei et al., 1998). La pureté typique du silicium d'origine métallurgique est d'environ 98,5 à 99,5 % (Xakalashé and Tangstad, 2011). Sachant que la pureté de ce silicium dépend de la pureté de la matière première (Eranna, 2014). Les impuretés sont généralement le bore, le carbone et de nombreux métaux résiduels, trouvés avec le gisement de quartz (Seshadri Seetharaman, 2013).

La figure 40 présente une installation typique pour la production du silicium-métal.

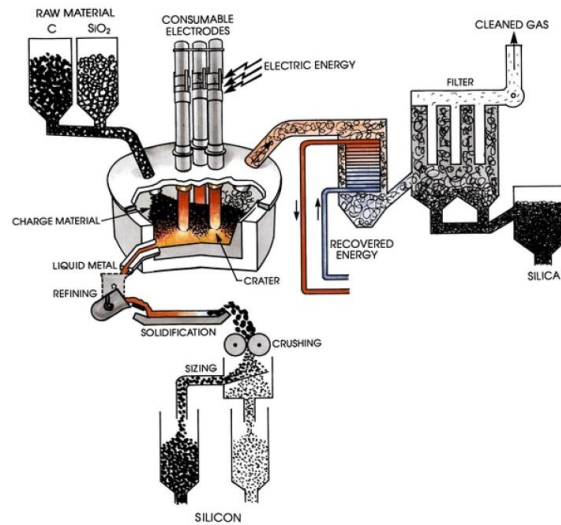


Figure 40 : Installation typique pour la production de silicium-métal (Schei et al., 1998)

La demande de silicium-métal provient principalement des industries de l'aluminium et de la chimie et une petite fraction est raffinée en silicium qualité électronique (Xakalashé and Tangstad, 2011). Selon le diagramme du flux du silicium réalisé par le BRGM (Boubault, 2021) (voir Figure N° 41) en 2019, seulement 1 % du silicium-métal était destiné à l'industrie microélectronique.

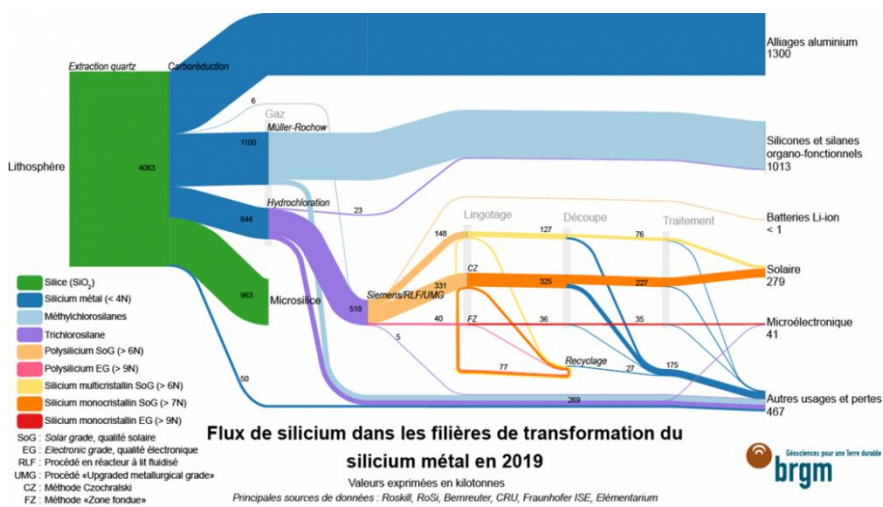


Figure 41 : Flux de silicium dans les filières de transformation du silicium-métal en 2019

(Boubault, 2021)

Plus précisément selon cet article (Boubault, 2021), l'ensemble du silicium extrait pour la filière métallurgique, soit environ 4,1 Mt de silicium contenu sous forme de silice (SiO_2), 32 % s'est retrouvé dans les alliages d'aluminium, 27 % dans les silicones, 24 % dans la micro-silice, 6 % dans le solaire, et moins de 1 % dans la microélectronique. Le reste, soit 10 %, a été utilisé pour d'autres usages ou perdus sous forme d'émissions ou de déchets.

6.3.1.2 Production du polysilicium de qualité électronique (EGP)

La deuxième étape consiste à produire du polysilicium (EGP), caractérisé par une pureté qui varie de 9N à 11N (99,999999999% à 99,999999999%). Ce niveau de pureté reflète la présence d'impuretés à hauteur de quelques parties par milliard (Williams, 2000)(Fisher et al., 2012). L'EGP est produit selon le procédé Siemens développé dans les années 1950 (Xakalashe and Tangstad, 2011). Ce procédé est utilisé dans 80 % de la production mondiale (Chalamala, 2018) (Williams, 2000) (Hashim, 2006).

La fabrication de ce matériau hautement spécialisé (Williams, 2000) commence par la transformation du silicium-métal en trichlorosilane (TCS) SiHCl_3 qui résulte d'une réaction entre la poudre de silicium de qualité métallurgique (Mahajan, 2004) et le chlorure d'hydrogène gazeux dans un réacteur à lit fluidisé (Hashim et al., 2004) à 575 °C (Williams, 2000).

Le TCS liquide résultant de ce traitement subira une série de distillations (Fisher et al., 2012) afin d'obtenir du trichlorosilane de qualité électronique (Hashim et al., 2004) (Xakalashe et Tangstad, 2011).

Le TCS pur est ensuite converti en silicium solide en introduisant le du dihydrogène et du trichlorosilane dans un réacteur de dépôt chimique en phase vapeur (CVD). Ensuite, les tiges d'EGP résultant de ce processus seront transformées en morceaux de taille spécifiée (Seshadri Seetharaman, 2013) (voir Figure N° 42).

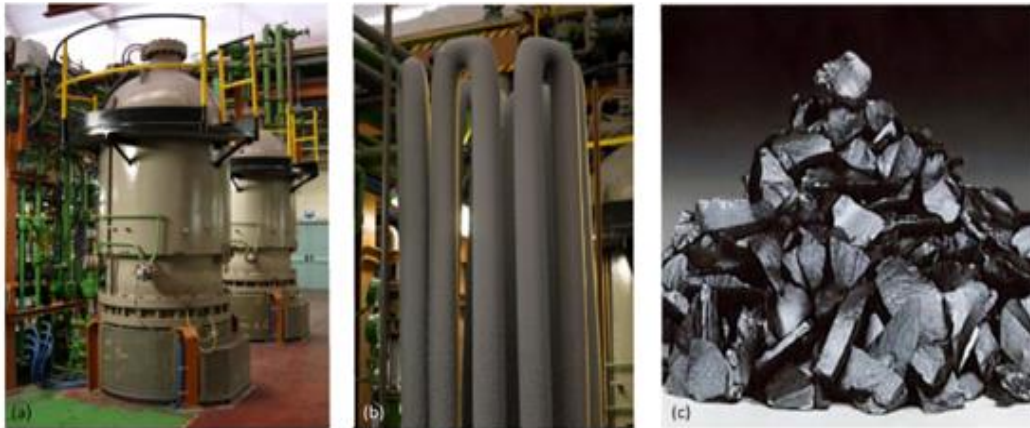


Figure 42 : (a) Réacteur Siemens de base, (b) Tiges de polysilicium telles qu'elles poussent après un cycle de réacteur (c) Morceaux finaux de polysilicium prêts à être chargés dans le four de croissance cristalline. (Fisher et al., 2012)

Selon (Boubault, 2021), sur les 3,1 mégatonnes de silicium métal produites, près de 21 % sont convertis par hydrochloration en gaz trichlorosilane. Ensuite, 80 % de ce gaz trichlorosilane est transformé en polysilicium. La production primaire de polysilicium est estimée à près de 520 kilotonnes en 2019. Cette estimation ne fait pas la distinction entre les différentes puretés de polysilicium.

6.3.1.3 Fabrication du Raw wafer

La fabrication du *Raw wafer* comporte deux principales sous-étapes. La première concerne la production et la croissance d'un lingot monocristallin de silicium sous forme cylindrique, (Williams, 2000) utilisant la méthode CZ (Czochralski). Cette méthode est la principale technique utilisée (Mahajan, 2004) et contribue à la production de 80 % à 90 % des wafers utilisés dans le CI (Eranna, 2014). L'EGP est la matière première clé de ce processus (Franssila 2010).

Lors de ce processus CZ, un creuset en silice est rempli de polysilicium qui est ensuite dopé en fonction des spécifications nécessaires. Ce mélange est progressivement chauffé à 1420 °C dans

un gaz ambiant inerte pour liquéfier le silicium. Par la suite, une graine monocristalline est plongée afin de diriger la solidification du silicium. Dans ce processus de cristallisation, pour un lingot typique de 200 mm, le processus total dure environ 60 heures. Après cette opération, environ 10 % du polysilicium initial demeure non utilisé et les creusets, malgré leur coût élevé, sont généralement mis au rebut (Franssila, 2010).

La deuxième étape consiste à découper le lingot en tranches minces. Ces dernières subissent un traitement de surface et une inspection (Eranna, 2014) à adapter aux applications de semi-conducteurs. Par exemple, cette tranche finale peut subir un dépôt chimique à sa surface et être utilisée comme substrat pour les microprocesseurs (Williams, 2000).

6.3.1.4 Processus industriels de la fabrication du Raw wafer

Pour une vue globale de l'ensemble du processus de fabrication du *Raw wafer* (voir la Figure 43). Cette figure illustre l'ensemble des étapes du processus allant de l'exploration et l'extraction minière jusqu'au découpage. La ligne supérieure illustre les différentes ressources, tandis que la ligne inférieure présente les procédés industriels.

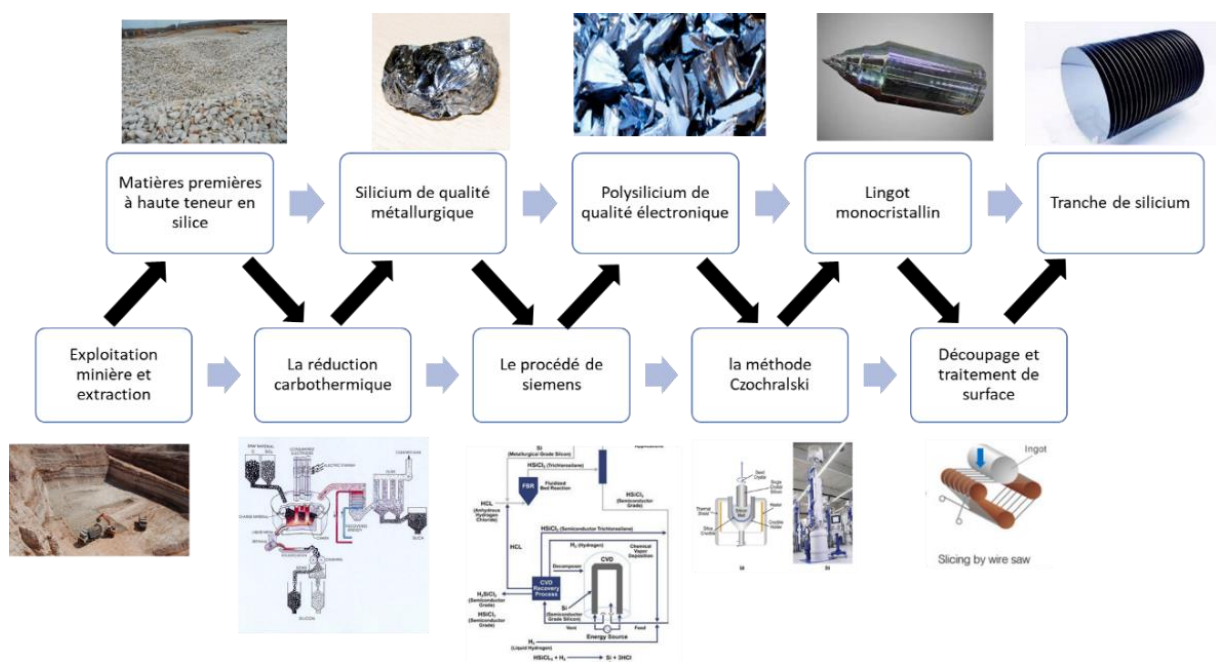


Figure 43 : Processus de fabrication des plaquettes de silicium

6.3.2 Identification des industries

Cette étape dépend intégralement de l'étape précédente. Ainsi, l'étude des processus industriels fournit une ligne directrice pour l'identification des secteurs industriels (Williams, 2000) impliqués dans la production du *Raw wafer*.

Dans cette étude de cas, les secteurs identifiés sont la production de silicium-métal (silicium de qualité métallurgique), la production de polysilicium de qualité électronique et enfin la production du *Raw wafer* (voir Figure N°44).

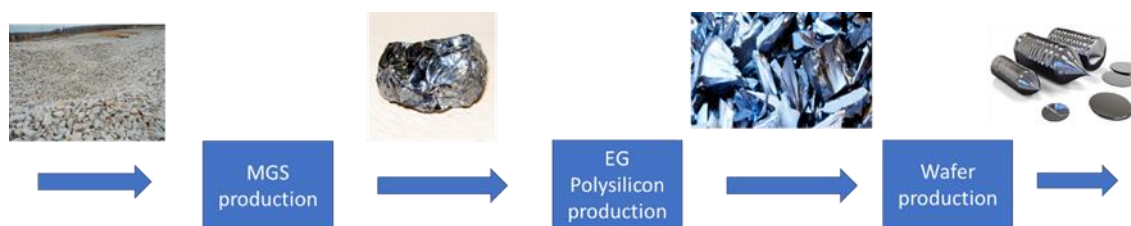


Figure 44 : Chaîne de valeur de fabrication du *Raw wafer*

Il est essentiel de préciser la nomenclature utilisée pour chaque ressource issue des étapes industrielles. Cette nomenclature sert à désigner l'industrie et elle est indispensable pour l'exécution de la démarche d'identification des acteurs.

Dans le cas du silicium-métal, il existe différentes qualités ; rendant indispensable l'utilisation de la nomenclature « qualité métallurgique ». Concernant le polysilicium, il existe deux types de qualité, le premier est la qualité solaire (SGP) et le second est la qualité électronique, l'EGP. La principale différence entre ces deux types réside dans leur degré de pureté, le SGP étant moins pur que l'EGP. De ce fait, il est important de préciser le type de polysilicium. Concernant le *Raw wafer*, le mot *raw* ou *brut* est important dans ce contexte. En effet, selon les utilisations finales de cette plaquette et l'exigence de performance, elle peut nécessiter un traitement de surface supplémentaire. Le résultat de ce traitement offre un produit nommé SOI (silicium sur isolant). Ce cas nécessitera d'ajouter une nouvelle étape à la chaîne de valeur globale. La raison

étant que ce traitement supplémentaire n'est pas forcément réalisé par tous les acteurs de l'industrie du *Raw wafer*.

6.3.3 Identification des acteurs clés et des liaisons

La construction du réseau d'approvisionnement nécessite l'identification des acteurs majeurs dans chaque industrie. Nous allons commencer cet exercice par les producteurs du *Raw wafer*.

6.3.3.1 Les producteurs du *Raw wafer*

Choisir cette industrie pour entamer l'identification n'est pas anodin. Comme nous l'avons mentionné précédemment, les études sur l'industrie des semi-conducteurs (Kleinhans and Baisakova, 2020) (Khan et al., 2021) (Teer et al., 2022) ainsi que l'étude gouvernementale (U.S. Department of Commerce, 2022) ont identifié les principaux fournisseurs de *Raw wafers*. La figure N° 45 illustre un exemple d'une étude qui a réalisé un travail d'identification des principaux fournisseurs de l'industrie des semi-conducteurs.

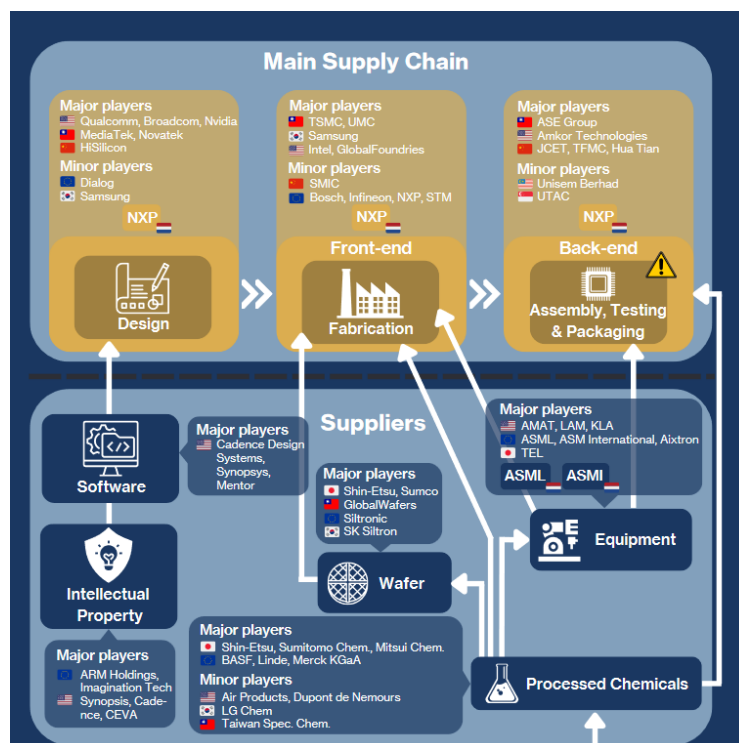


Figure 45 : Écosystème des semi-conducteurs (Teer et al., 2022)

Ainsi, nous disposons de plusieurs sources de données secondaires fiables pour identifier les acteurs. De plus, nous avons consulté les sites Web et les documents diffusés par chaque entreprise (GlobalWafers Co., Ltd, 2021; Shin-Etsu, 2023; Siltronic AG, 2020; SK Siltron, 2022; Sumco, 2019; Thomas, 2021) afin de valider l'implication de chaque acteur dans cette industrie et identifier les sites de production, la capacité de production, les pays de production ainsi que leurs fournisseurs et acheteurs.

Sur la base des informations recueillies, ce secteur industriel est composé de cinq principaux acteurs industriels représentant 90 % du marché. Ces acteurs sont Shin Etsu Handotai (SEH) et SUMCO qui sont basés au Japon, GlobalWafers qui est basé à Taïwan, Siltronic AG qui est basé en Allemagne et SK Siltron basé en Corée du Sud.

Nous avons synthétisé des informations telles que l'entreprise, la part de marché, les sites de production, les acheteurs et les fournisseurs dans le tableau N° 26.

Il convient de souligner que les entreprises ne divulguent pas systématiquement les informations sur leurs fournisseurs et acheteurs, ce qui peut créer des lacunes dans la reconstitution du réseau d'approvisionnement.

Tableau 26 : Les fabricants majeurs du Raw wafer

Entreprises	Part de marché	Pays	Sites de production	Acheteurs	Fournisseurs
Shin-Etsu Handotai (Shin-Etsu, 2023)	33 %	Japon	<p>Japon : Shin-Etsu Handotai Co (Takefu Plant) Shin-Etsu Handotai Co (Gunma Complex Isobe Plant)</p> <p>États-Unis : Shin-Etsu Handotai America</p> <p>Royaume-Uni (Écosse) : Shin-Etsu Handotai Europe (150-200 mm)</p> <p>Malaisie : S.E.H. (Shah Alam) et S.E.H. Malaysia Sdn</p> <p>Taïwan : Shin-Etsu Handotai Taïwan</p> <p>Singapour : S.E.H. Singapore</p>	TSMC (TSMC, 2021)	
Sumco Technology Corporation (Sumco, 2019, 2010) Coentreprise (Mitsubishi Materials Corporation et Sumitomo Metal Industries)	25 %	Japon	<p>Japon : Sumco TECHXIV Corp, SUMCO technology Corp, Japan Formosa SUMCO technology Corporation, Usine (Chitose, Nagasaki, (2) Imari, Saga, Noda, Miyazaki, Yonezawa)</p> <p>Indonésie : PT. SUMCO Indonésie</p> <p>Taïwan : Formosa Sumco Technology Corporation</p> <p>États-Unis : SUMCO Phoenix Corporation (2 usines)</p>	TSMC (CSIMarket, 2023)	Mitsubishi Materials Corporation

GlobalWafers (U.S. Department of Commerce, 2022) (GlobalWafers Co., Ltd, 2020)	17 %	Taiwan	17 usines, 9 pays États-Unis : 2 usines (St. Peters, Missouri) Corée du Sud : 1 usine (Cheonan) Taiwan : 3 usines Japon : 5 usines Italie : 2 usines (Merano, Novara) Danemark : 1 usine (Copenhague) Malaisie : 1 usine (Kuala Lumpur) Singapour : 1 usine Chine : 1 usine (Kunshan)	TSMC (CSIMarket, 2023) GlobalFoundries (GlobalWafers Co., Ltd, 2021; Millington, 2021) Intel, Samsung, Texas Instruments (U.S. Department of Commerce, 2022)	Multiple
Siltronic (Siltronic AG, 2022a)	13 %	Allemagne	Allemagne : 2 Usines États-Unis : 1 Usine Singapour : 1 Usine	Intel, Samsung, SK Hynix TSMC (CSIMarket, 2023) (LaPedus, 2021)	Wacker Chemie AG
SK Siltron (SK Siltron, 2022)	12 %	Corée du Sud	Corée du Sud : 2 Usines	SK Hynix Samsung Electronics	OCI (So-in, 2021)

6.3.3.2 Les producteurs de polysilicium électronique (EGP)

Le polysilicium est utilisé dans le secteur de l'énergie solaire et de la microélectronique. En fonction de son niveau de pureté, il peut être classé en polysilicium solaire SGP ou en polysilicium électronique EGP (Boubault, 2021) (voir Figure N° 46) .

Historiquement, le marché de ce matériau a subi un changement très profond. Entre 1950 et 1990, 90 % du polysilicium produit étaient destinés au secteur des semi-conducteurs tandis que les résidus, qui représentaient 10 % étaient destinés au secteur solaire. Cependant, la demande croissante du secteur solaire avec la transition énergétique a inversé cette tendance. A la suite à cette évolution, plusieurs entreprises ont réorienté leur production, réduisant la part de l'EGP à environ 10 % du marché global (Bernreuter, 2020a). Ceci a réduit l'attention portée à l'EGP mais accroît le défi de trouver des sources fiables d'information sur les producteurs dans ce secteur.

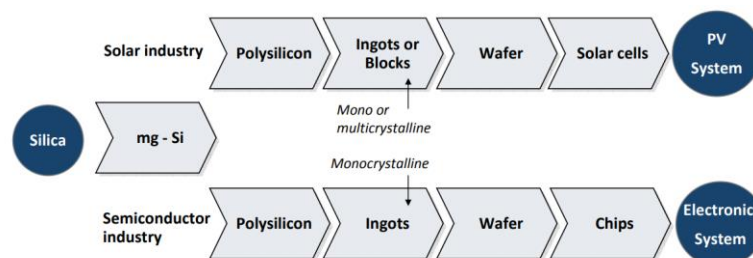


Figure 46 : Chaîne de valeur du silicium destinée à l'industrie solaire et à l'industrie électronique (Frost & Sullivan, 2010)

Le marché de l'EGP est très opaque et les entreprises communiquent rarement sur leurs capacités et les sites de production (U.S. Department of Energy, 2022). De plus, il n'existe pas de littérature grise sur ce secteur industriel. Pour faire face à ce défi, notre démarche initiale a consisté à sélectionner les acteurs identifiés dans le rapport d'entreprise qui fabriquent le *Raw wafer* tels que Wacker Chemie, OCI et Mitsubishi Materials Corporation.

Ensuite, nous avons utilisé les mots-clés “*électronique grade polysilicon*” et “*main producer*” dans les moteurs de recherche Google et Bing, afin d’identifier des rapports gouvernementaux ou de consultants ayant traité ce sujet. Les résultats renvoyaient vers :

- des sites d’études de marché payantes (digitaljournal, absolutereports, virtuemarketresearch, marketresearchreports, dataintelo, marketresearch) qui ont identifié les producteurs suivants : Tokuyama, Wacker Chemie, Hemlock Semiconductor, Mitsubishi Materials, OSAKA Titanium Technologies, OCI, REC Silicon, GCL-Poly Energy, Huanghe Hydropower, et Yichang CSG ;
- des sites de médias d’actualité permettent d’identifier des acteurs (YAMAZAKI, 2019), (iMedia, 2023), (Gupta, 2021), (Bridge Salon, 2020).

Afin de valider la liste des acteurs, nous avons consulté les sites des entreprises.

Ensuite, nous avons identifié un article rédigé par « *Semiconductor Industry Association* » (Ravi, 2022), qui confirme une partie de cette liste. D’après cette association, les plus grands producteurs d’EGP sont : Wacker Chemie (Allemagne), Hemlock Semiconductor (États-Unis), Tokuyama Corporation (Japon), Mitsubishi Corporation (Japon) et REC Silicon (basé aux États-Unis, coté en Norvège). À noter que Wacker Chemie et Hemlock Semiconductor représentent environ les trois quarts de l’approvisionnement mondial en polysilicium electronic grade (EGP) pour la fabrication des semi-conducteurs.

Dans les publications scientifiques, nous avons identifié une seule étude de marché (Naumov and Orehov, 2021) qui présente une analyse du marché du polysilicium. En effet, l’ensemble des données présentées concerne le marché SGP. Cette étude de marché mentionne que « les entreprises japonaises Tokuyama et Mitsubishi Materials sont les principaux producteurs de polysilicium de qualité électronique ». Cette étude est basée sur les rapports payants de

Bloomberg (une entreprise mondiale de médias et d'informations financières qui fournit des actualités, des données, des analyses sur plusieurs industries).

Identifier les acteurs n'étant pas la seule information nécessaire à notre cartographie, nous avons également besoin de connaître la part de marché de chaque acteur.

Ainsi, nous nous sommes tournés vers la littérature asiatique, ce qui nous a permis d'identifier un rapport chinois (Zheshang, 2022) intitulé « L'équilibre serré du polysilicium se poursuit, leader en matière de technologie et de coûts pour renforcer la compétitivité de base — Rapport détaillé de Daqo Energy ».

C'est une étude réalisée par Zheshang Securities Co. Ltd qui exerce des activités de conseil en investissement en valeurs mobilières approuvée par la China Securities Regulatory Commission. Ce rapport, publié en 2022, offre un aperçu du marché d'EGP. Il est basé sur les données du SEMI qui est l'association industrielle mondiale représentant la chaîne d'approvisionnement de la fabrication électronique. Cette association relie plus de 2 000 entreprises membres et 1,3 million de professionnels à travers le monde.

Ainsi, selon (Zheshang, 2022), les producteurs sont peu nombreux et la quantité produite mondialement est très faible. En 2019, les producteurs étaient Hemlock aux États-Unis avec 11000 tonnes/an, Wacker en Allemagne avec 8 500 tonnes/an, la société japonaise Tokuyama avec 6 200 tonnes/an, la société japonaise Mitsubishi avec 3 000 tonnes/an, la société japonaise Sumitomo avec 2 500 tonnes/an et REC avec 900 tonnes/an, sans toutefois tenir compte de la production chinoise.

Selon le même rapport, la Chine a fourni des efforts pour améliorer la qualité du polysilicium afin qu'il soit adapté à l'industrie des semi-conducteurs. Ainsi, à la fin de 2020, les principaux fabricants chinois de polysilicium de qualité électronique comprennent : GLC Poly Energy Jiangsu Xinhua avec 5000 t/an (sina news, 2021) (GCL Poly Energy Holding Limited, 2020)

(Bernreuter, 2018) (GLC, 2018), Huanghe Hydropower avec 3300 t/an (EqualOcean, 2020) (Jialiang, 2020), et Tianhong Ruike avec 1000 t/an. Sachant que d'autres entreprises spécialisées dans le SEG telles que Daquan Energy, Asia Silicon Industry, Xinte Energy, sont en train d'améliorer leur processus afin de fabriquer du polysilicium de qualité électronique.

Concernant l'identification des relations fournisseurs-acheteurs, nous avons utilisé les mêmes moteurs de recherche (Google, Bing) en introduisant des combinaisons de mots-clés incluant un acteur de l'industrie de l'EGP et un autre acteur de l'industrie *Raw wafer* avec le mot clé 'polysilicon'. Par exemple : 'Wacker Chemie', 'Globalwafers', 'polysilicon'.

Les résultats de cette recherche ont fourni les couples suivants : (Wacker Chemie Polysilicon / Siltronic), (Mitsubishi Materials / SUMCO), (Hemlock Semiconductor / Shin-Etsu Handotai), (Rec Silicon / SUMCO), (OCI /SK Siltron), (Hemlock semiconductor / SUMCO)

Ainsi, les références utilisées pour identifier les acteurs de cette industrie, leurs capacités, les sites de production et les relations fournisseurs-acheteurs sont les suivantes.

- Source d'entreprises : (Wacker, 2021) (GLC, 2018) (REC Silicon, 2021) (Tokuyama, 2022a, 2022b) (Hemlock Semiconductor, 2022) (OCI, 2018) (GLC, 2018) (trsilicon, 2018) (Hemlock Semiconductor LLC et al., 2023) (Mitsubishi Materials, 2023) (Siltronic AG, 2022b).
- Sources de consultants : (Bernreuter, 2020b), (Zheshang, 2022), (Yokota, 2020) (Bernreuter, 2018), (Lynch-Morin, 2013).
- Source gouvernementale : (U.S. Department of Energy, 2022).
- Medias : (Alperowicz, 2016) (sina news, 2021) (EqualOcean, 2020) (Jialiang, 2020) (iMedia, 2023) (Gupta, 2021) (Hanwha, 2022) (Kyung-min, 2022) (YAMAZAKI, 2019) (HARADA, n.d.) (Crédit Suisse, 2016; Tsuda, 2014).

Après avoir recueilli l'ensemble des informations, visité les sites de chaque entreprise, étudié les rapports annuels et identifié les sites de production, nous avons synthétisé les informations dans le tableau N° 27.

Tableau 27 : Les fabricants du polysilicium (EGP)

Entreprises	Pays des sites de production	Capacité de production
Wacker Chemie	Etats-Unis	8500 T (2019)
Hemlock semiconductor (DOW Corning Inc and Shin-Etsu Chemical)	Etats-Unis	11000 T (2019)
Tokuyama	Japon	6200 T (2019)
Mitsubishi Materials transféré à SUMCO	Japon / États-Unis	3000 T (2019)
Sumitomo	Japon	2500 T (2019)
REC Silicon	Etats-Unis	900 T (2019)
OCI	Corée du sud (Gunsan)	3000 T (2020)
GCL Poly Energy	Chine (Xinhua)	5000 T (2020)
Huanghe hydropower	Chine	3300 T (2020)
Tianhong Ruike (Shaanxi Non-ferrous Tian Hong et Rec Silicon Material)	Chine (Yulin)	1000 T (2020)

Ainsi, les sites de production de l'EGP sont situés dans seulement quatre pays qui sont les États-Unis avec quatre sites, le Japon avec trois sites, la Chine avec trois sites et la Corée du Sud avec un seul site. Les États-Unis sont le premier producteur, suivis de la Chine en deuxième position (nouvel acteur en 2020), le Japon est en troisième position, et la Corée du Sud est en quatrième position avec un seul site de production.

6.3.3.3 Les producteurs du silicium-métal

Le silicium est le deuxième élément le plus abondant dans l'écorce terrestre après l'oxygène. Il est utilisé industriellement en tant que métal sous deux formes, le silicium métal et le ferro-silicium (Chalmin and Jegourel, 2019).

Le marché du silicium-métal est bien documenté. Étant donné, qu'il est le plus en amont de la chaîne de valeur, le silicium-métal a suscité beaucoup d'intérêt de la part des chercheurs, des gouvernements et des consultants privés. Cet intérêt s'est accentué avec les études de la criticité des matières premières.

Ainsi, nous avons identifié les sources d'information suivantes :

- le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) a publié une fiche de criticité de silicium en 2019 (BRGM, 2019) ;
- United States Geological Survey (USGS) offre des données sur les pays producteurs (United States Geological Survey, 2020) ;
- le Ministère de la transition écologique et solidaire avec l'appui du BRGM et du CEA a réalisé une fiche descriptive du silicium et toute la chaîne de valeur jusqu'au wafer, mais sans distinction entre le SGP et l'EGP (Société Chimique de France, n.d.) ;
- une analyse de plusieurs marchés de commodité réalisée par Cercle Cyclope (Chalmin and Jegourel, 2019) ;
- une base de données conçue par la Commission européenne nommée « Raw materials information system » RMIS qui offre des données sur la production jusqu'en 2021 (European Commission, 2022) ;
- le rapport sur l'étude de criticité des ressources pour l'Europe (Blengini et al., 2020a).

Les informations sur ce marché sont plus axées sur les pays producteurs que sur les entreprises. Ainsi, les données collectées nous permettent de décrire la production mondiale et d'identifier les pays producteurs. De ce fait, la production mondiale du silicium-métal est de 3472 kilotonnes en 2021 et les principaux pays producteurs sont la Chine, les États-Unis, la France, l'Allemagne, la Russie, l'Australie et la Bosnie-Herzégovine (Voir Figure N°47).

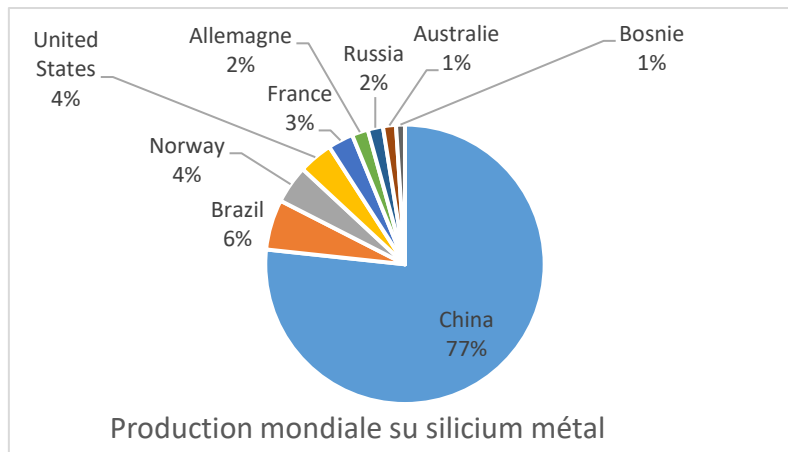


Figure 47 : Répartition de la production mondiale du silicium par pays

L'industrie du silicium-métal est composée de plus de 300 entreprises, dont plus de 100 se trouvent en Chine (U.S. Department of Energy, 2022). Concernant les entreprises leaders du marché et la capacité de production, c'est une information qui n'est pas accessible. La seule source de données est la fiche réalisée par le Ministère de la transition écologique et solidaire avec l'appui du BRGM et du CEA (Société Chimique de France, n.d.)¹.

En se basant sur les données de cette fiche, nous avons entrepris de vérifier ces données dans les rapports annuels de chaque entreprise.

La consultation des sites d'entreprises a permis de confirmer leurs activités de producteurs de silicium-métal et leur position de leader dans le marché. Cependant, la capacité de production n'est pas une information transmise par toutes les entreprises (Kristiansen and Van der Eijk, 2020; Simcao, 2020; Wacker, 2010) (Elkem, 2023; Ferroglobe, 2023; Hoshine, n.d.)². De ce fait, nous considérons les données fournies par (Société Chimique de France, n.d.) comme une estimation approximative et non comme un chiffre définitif.

¹ N.d (Date de publication inconnue)

² N.d (Date de publication inconnue)

Les résultats nous ont permis d'identifier les producteurs ainsi que leur capacité de production suivants :

- Hoshine Silicon (Chine) : 800 000 t (capacité),
- Ferroglobe (multinationale espagnole) : 253 991 t en 2021, 207 332 t en 2020, 289 692 t en 2019 (Ferroglobe, 2021),
- Elkem (Norvège) : 240 000 t en 2019, 237 000 t en 2018 (Elkem, 2019), 215 000 t (2021),
- Dow (États-Unis) : 207 000 t (2018)
- Rima (Brésil) : 96 000 t (2018),
- Rusal (Russie) : 69 000 t (2021),
- Liasa (Brésil) : 60 000 t (2018),
- Wacker Chimie (Norvège) : environ 70 000 t (capacité maximale) (Ag, 2023),
- Simcao (Australie) : 52 000 t (2021).
- Mississippi Silicon (États-Unis) : 36 000 t/an (capacité maximale)

Concernant la Chine, elle détient plus de 70 % de la production mondiale répartie sur une centaine d'entreprises avec une capacité qui dépasse la demande mondiale (Ferroglobe, 2019). Actuellement, selon les statistiques de Shanghai Metals Market (SMM), les trois principales régions productrices de silicium-métal en Chine sont le Xinjiang, le Yunnan ayant représenté collectivement 78 % de la production annuelle en 2021. Ce sont des régions où les matières premières sont abondantes et où les coûts de l'électricité sont faibles (JBT Metal, 2022; Jiang, 2022).

Afin d'identifier les relations fournisseurs-acheteurs, nous avons utilisé les moteurs de recherche (Google, Bing) en introduisant des combinaisons de mots-clés incluant un acteur de

l'industrie de l'EGP et un acteur de l'industrie silicium métal avec le mot-clés 'Silicon metal'.

Par exemple : 'Ferroglobe' 'Mitsubishi materials' 'silicon metal'.

Les relations trouvées sont (Dow Corning / Hemlock) (C. S. Brown, 2018), (Wacker Chemie (Norvège) / Wacker Chemie (Polysilicon) (Etats-Unis)) (Wacker, 2021), (Ferroglobe / REC Silicon) (Ferroglobe, 2022a; Gupta, 2022) ; (Ferroglobe /Wacker Chemie) (Lecouturier, 2019) (Ferroglobe /OCI) (Ferroglobe, 2022b).

Les entreprises d'EGP ont tendance à privilégier les acteurs présents dans la même zone géographique et disposent de plusieurs fournisseurs de silicium-métal pour produire de l'EGP.

La synthèse des données recueillies sur l'industrie du silicium-métal se trouve dans le tableau N° 28.

Tableau 28 : Les producteurs du silicium métal

Entreprise	Sites de production	Capacité de production
Wacker Chemie	Holla, Norvège	Environ 70 000 t/an
Simcoa (filiale de Shin-Etsu chemical)	Australie	52000 t en 2021
Elkem	Norvège Chine (Lanzhou)	215 000 t en 2021 240 000 t en 2019 237 000 t en 2018
Ferroglobe	États-Unis, France, Afrique du Sud, Canada et Espagne.	253 991 t en 2021, 207 332 t en 2020, 289 692 t en 2019
DOW	Brazil Canada Etats-Unis Autres pays	207 000 t/an en 2018
US Rusal	Russie (Shelekhoc, Kamensk - Uralsky, Sverdlovsk)	69000 t/an 2021
Rima	Brésil	36000 t/an
Liasa	Brésil (Minas Gerais)	60000 t/an
Hoshine Silicon	Chine	800 000 t /an
Mississippi Silicon	États-Unis	36 000 t/ ans

6.3.4 Construction de la cartographie

L'étude des trois marchés (Silicium-métal, EGP et *Raw wafer*) nous a permis d'identifier les différents acteurs impliqués dans chaque phase. Les trois marchés sont caractérisés par une

dispersion géographique sur les continents américain, européen et majoritairement asiatique (Voir figures N° 48 et 49).

Concernant la première étape de la chaîne de valeur, seulement 1 % de la production mondiale de silicium est destinée à l'industrie électronique (Boubault, 2020) et les entreprises productrices de l'EGP s'approvisionnent dans le monde entier en silicium-métal. De plus, la production mondiale de silicium métal dépasse la demande mondiale. De ce fait, il n'existe pas de relations fournisseurs-acheteurs spécifiques entre les étapes (producteurs de silicium-métal et producteurs d'EGP). Néanmoins, l'étude des rapports annuels des entreprises a permis l'identification de certains couples : (Dow Corning / Hemlock), (Wacker Chemie (Norvège) / Wacker Chemie (Polysilicon) (États-Unis)), (Ferroglobe / REC Silicon), (Ferroglobe / Wacker Chemie), (Ferroglobe / OCI).

La deuxième étape de la chaîne de valeur (production de l'EGP) est caractérisée par un marché très opaque avec des quantités de production annuelles très faibles. Les pays producteurs sont les États-Unis, le Japon, la Corée du sud et, récemment, la Chine, qui cherche à améliorer ses processus de production pour atteindre la pureté de l'EGP. Dans ce contexte, les couples (fournisseurs/acheteurs) identifiés entre l'étape production d'EGP et la production des plaquettes de Si sont : (Wacker Chemie (Polysilicon) / Siltronic), (Mitsubishi Materials / SUMCO), (Hemlock Semiconductor / Shin-Etsu), (REC Silicon / SUMCO), (OCI / SK Siltron), (Hemlock Semiconductor / SUMCO).

La dernière étape est caractérisée par une dispersion géographique avec une concentration des acteurs sur le continent asiatique. Les informations sur ce marché sont disponibles et les entreprises communiquent sur leur production.

La vision globale de toute la cartographie de la chaîne d'approvisionnement nous révèle l'existence d'entreprises qui ont intégré l'ensemble de la chaîne de valeur en amont et en aval.

Ces entreprises sont :

- l'entreprise Shin-Etsu qui détient des parts de marché dans l'entreprise australienne Simcao pour la production de silicium-métal. Elle détient également des parts dans l'entreprise Hemlock Semiconductor pour la production de l'EGP et possède des sites de production de *Raw wafer* ;
- l'entreprise allemande Wacker Chemie qui possède un site de production de silicium-métal en Norvège, un site de production aux États-Unis pour la production de l'EGP et détient des parts de marché dans l'entreprise Siltronic pour la production du *Raw wafer*.

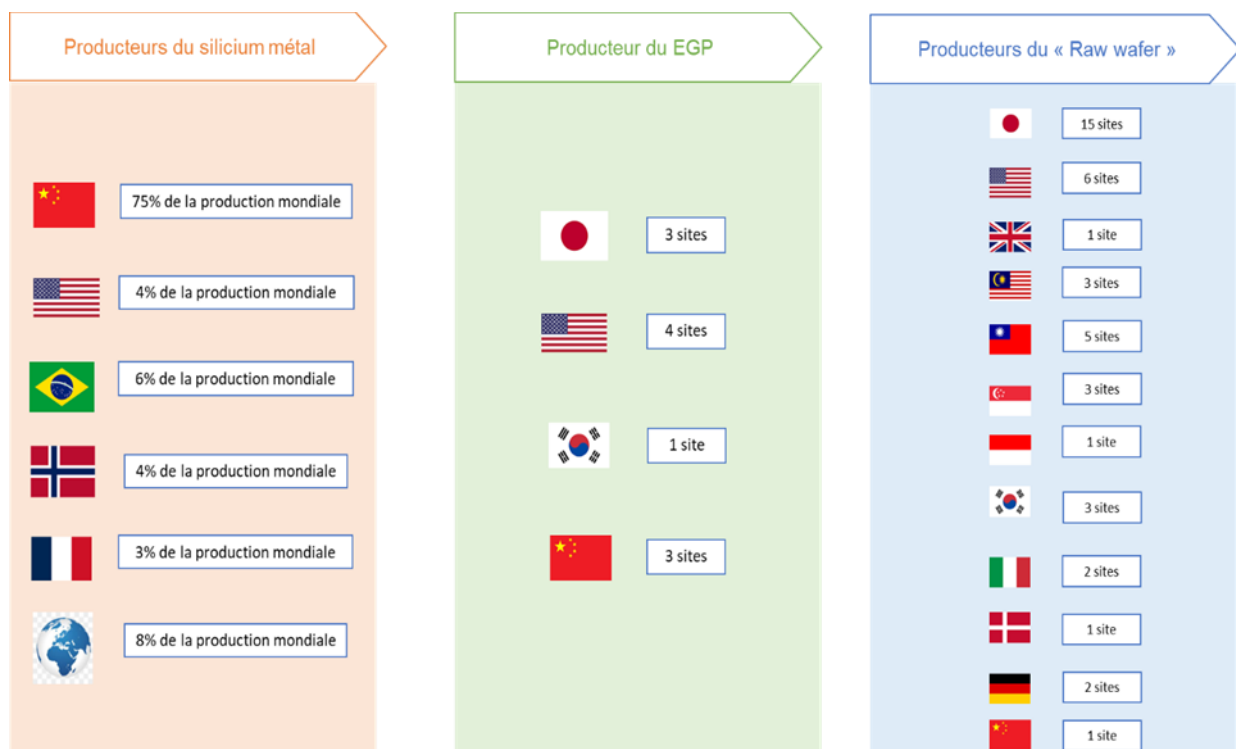


Figure 48 : Dispersion géographique de la production dans chaque étape de valeur

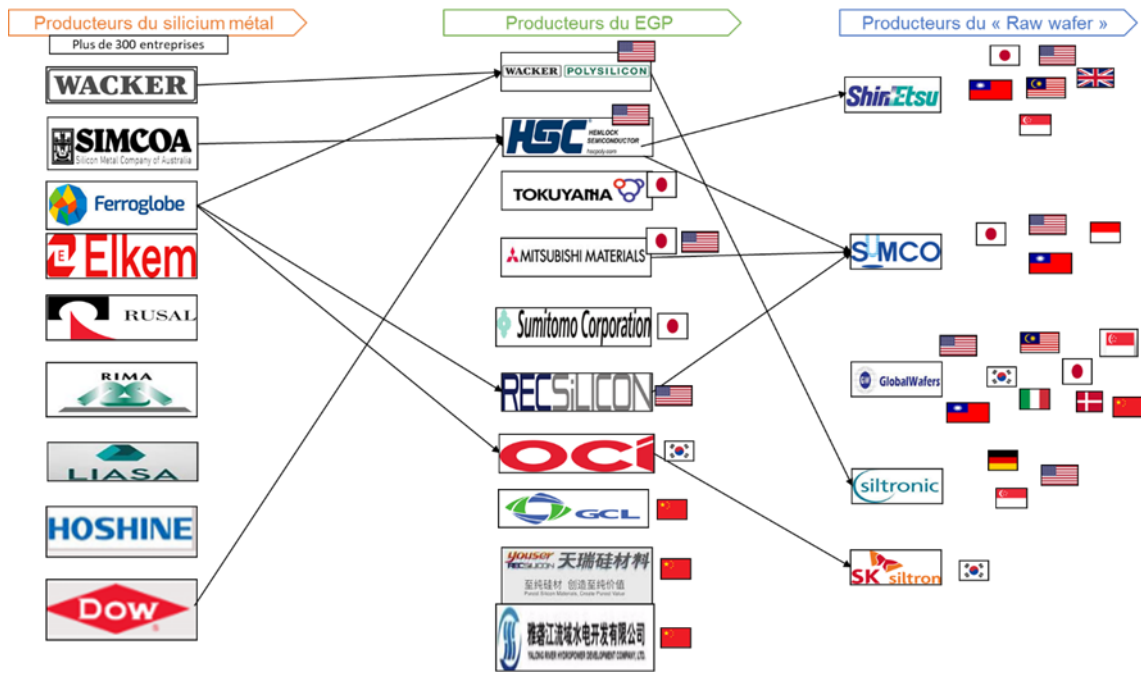


Figure 49 : Réseau d'approvisionnement mondial du Raw wafer

6.4 Etape N° 3 : Estimation et évaluation des risques

Cette troisième étape est consacrée à l'estimation et l'évaluation des risques liés au réseau d'approvisionnement cartographié.

Les risques étudiés, leurs définitions et les bases de données utilisées pour les estimer et évaluer sont synthétisés dans le tableau N° 29.

Tableau 29 : Synthèse des risques, indicateurs et base de données

Systèmes	Risques	Indicateur	Bases de données
Fournisseurs	Risques naturels	WorldRiskIndex	Le rapport du WorldRiskReport 2022 (BE Hilft, 2022)
	Risques pays	WGI	Le site de la banque mondiale (Worldbank, 2022)
Structure du réseau	Risques réglementaires	Existence de sanctions économiques et financières	Sites gouvernementaux, sites Web des Nations Unies (Nations Unies, 2023) et de l'Union européenne (European Commission, 2023)
	Risques logistiques	L'Indice de Performance Logistique (LPI)	La banque mondiale (Worldbank, 2023)

Ressources	Épuisement	Indice d'épuisement	USGS
	Dépendance au sous-produit	Oui ou non	Études d'évaluation de la criticité
	Croissance de la demande	Oui ou non	Rapport de la Commission européenne
	Taux de recyclage en fin de vie	%	Rapport de la Commission européenne
Interconnexion des trois systèmes	Concentration des pays et des entreprises	HHI	Rapports d'entreprises, rapports gouvernementaux, rapports de consultants

6.4.1 Les risques naturels

L'estimation et l'évaluation des risques naturels associés aux pays de chaque fournisseur reposent sur le World Risk Report 2022. Ceci, en utilisant la même échelle de mesure que celle présentée dans la partie N°5. Les tableaux N° 30, 31 et 32 synthétisent cette évaluation en détaillant le niveau d'exposition et le niveau de vulnérabilité pour chaque étape de la chaîne de valeur.

Tableau 30 : Estimation et évaluation des risques naturels pour l'étape de production du Silicium-métal

Étape de la chaîne de valeur	Silicium-métal									
	Pays	Chine	Norvège	France	États-Unis	Brésil	Allemagne	Russie	Australie	Bosnie-et-Herzégovine
Risques naturels		28,70	3,16	6,67	22,73	12,15	3,92	26,54	21,36	2,51
Exposition		64,59	1,06	2,07	39,59	6,37	1,99	28,35	31,21	0,34
Vulnérabilité		12,17	9,43	16,50	13,03	23,19	7,74	24,85	14,62	18,60

Tableau 31 : Estimation et évaluation des risques naturels pour l'étape de production de l'EGP

Chaîne de valeur	EGP				
	Pays	Chine	Japon	Corée du Sud	États-Unis
Risques naturels		28,70	17,03	10,51	22,73
Exposition		64,59	43,67	9,96	39,59
Vulnérabilité		12,17	6,64	11,09	13,03

Tableau 32 : Estimation et évaluation des risques naturels pour l'étape de production du Raw wafer

Chaîne de valeur	Raw wafer											
Pays	Chine	Japon	Corée du Sud	États-Unis	Royaume-Uni	Allemagne	Taiwan	Malaisie	Indonésie	Italie	Danemark	Singapour
Risques naturels	28,70	17,03	10,51	22,73	5,78	3,92	28,70	14,36	41,46	9,37	1,03	0,81
Exposition	64,59	43,67	9,96	39,59	2,58	1,99	64,59	8,64	39,89	8,69	0,18	0,15
Vulnérabilité	12,17	6,64	11,09	13,03	12,97	7,74	12,17	23,86	43,10	10,11	5,85	4,37

6.4.2 Les risques pays

L'estimation et l'évaluation des risques pays du fournisseur sera basée sur les indices du « Worldwide Governance Indicators » issus de la base de données de la Banque Mondiale. Cette base de données évalue 'la stabilité politique', 'l'efficacité de la gouvernance', 'la qualité de la réglementation' 'l'état de droit', et 'le contrôle de la corruption' de chaque pays où sont implantés les fournisseurs. Les valeurs sont entre 0 et 100 de telle sorte que les scores les plus élevés indiquent de meilleures performances. La synthèse des valeurs et l'évaluation des indicateurs de gouvernance pour chaque pays sont dans les tableaux N° 33, 34 et 35.

Tableau 33 : Estimation et évaluation des risques pays pour l'étape de production du Silicium-métal

Chaîne de valeur	Silicium-métal									
Pays	Chine	Norvège	France	Etats-Unis	Brésil	Allemagne	Russie	Australie	Bosnie-et-Herzégovine	
Stabilité politique	29,25	90,1	56,6	47,6	28,8	70,8	23,11	74,06	33,49	
Efficacité de la gouvernance'	76,44	98,08	86,06	88,46	35,1	87,98	45,19	92,79	13,46	
Qualité de la réglementation	41,35	95,19	86,06	90,38	48,08	94,71	32,69	98,56	46,15	
État de droit	53,85	99,52	87,50	88,94	42,31	91,83	20,19	92,79	42,79	
Contrôle de la corruption	58,17	98,08	87,02	83,65	34,62	95,67	19,71	94,71	28,85	

Tableau 34 : Estimation et évaluation des risques pays pour l'étape de production de l'EGP

Chaîne de valeur	EGP				
	Pays	Chine	Japon	Corée du Sud	Etats-Unis
Stabilité politique		29,25	89,32	67,45	47,6
Efficacité de la gouvernance'		76,44	90,38	90,87	88,46
Qualité de la réglementation		41,35	89,9	83,65	90,38
État de droit		53,85	91,35	84,62	88,94
Contrôle de la corruption		58,17	90,87	77,40	83,65

Tableau 35 : Estimation et évaluation des risques pays pour l'étape de production du Raw wafer

Chaîne de valeur	Raw wafer												
	Pays	Chine	Japon	Corée du Sud	Etats-Unis	Royaume-Uni	Allemagne	Taiïwan	Malaisie	Indonésie	Italie	Danemark	Singapour
Stabilité politique		29,25	89,32	67,45	47,6	62,74	70,8	72,17	50,94	27,83	64,15	80,66	97,64
Efficacité de la gouvernance'		76,44	90,38	90,87	88,46	86,54	87,98	91,83	81,25	65,38	64,90	99,04	100
Qualité de la réglementation		41,35	89,9	83,65	90,38	90,87	94,71	91,35	72,60	62,50	69,71	98,08	100
État de droit		53,85	91,35	84,62	88,94	89,42	91,83	87,98	70,19	46,53	59,62	99,04	98,56
Contrôle de la corruption		58,17	90,87	77,40	83,65	93,27	95,67	85,10	61,06	38,46	69,23	100	98,56

6.4.3 Les risques réglementaires

Concernant le risque de sanctions économiques et financières, nous nous sommes référés aux sites gouvernementaux des entreprises en aval de la chaîne de valeur pour identifier les sanctions appliquées sur les entreprises en amont (voir la synthèse dans le tableau N° 36).

Tableau 36 : Présence de Sanctions économiques et financières

Lien	Silicium – EGP				EGP- <i>Raw wafer</i>
Pays	Chine - États-Unis	Union européenne - Russie	États-Unis - Russie	Corée du Sud - Russie	Chine - États-Unis
Sanctions économiques et financières	Sanction croisée	Sanction croisée	Sanction croisée	Sanction croisée	Sanction croisée

L'absence de sanctions économiques et financières aujourd'hui, ne signifie pas qu'il n'y en aura pas à l'avenir, car des sanctions ont déjà été imposées et levées entre les différents pays, et les conflits géopolitiques subsistent. Par exemple, les tensions entre le Japon et la Chine, la Corée du Sud et la Chine, et entre le Japon et la Corée du Sud. Une des sanctions qui nous intéresse est la sanction croisée entre le Japon et la Corée du Sud : le Japon a imposé des restrictions sur l'exportation de produits chimiques essentiels à l'industrie sud-coréenne des semi-conducteurs entre 2019 et 2020, et la Corée du Sud a retiré le Japon de sa liste de partenaires commerciaux privilégiés.

6.4.4 Risques logistiques

Afin d'estimer et d'évaluer les risques logistiques, nous nous sommes basés sur l'indicateur de performance logistique de la Banque Mondiale composé de six indicateurs : l'efficacité des douanes, la qualité de l'infrastructure, facilité d'organisation des expéditions, qualité des services logistiques, suivi et traçabilité et le respect des délais.

La synthèse de l'évaluation des risques logistiques figure dans les tableaux N° 37, 38 et 39.

Tableau 37 : Estimation et évaluation de la performance logistique pour l'étape de production du silicium-métal

Chaîne de valeur	Silicium-métal									
	Pays	Chine	Norvège	France	États-Unis	Brésil	Allemagne	Russie	Australie	Bosnie-et-Herzégovine
LPI index		3,7	3,7	3,9	3,8	3,2	4,1	2,6	3,7	3
L'efficacité des douanes		3,3	3,8	3,7	3,7	2,9	3,9	2,4	3,7	2,7
Qualité de l'infrastructure		4	3,9	3,8	3,9	3,2	4,3	2,7	4,1	2,6
Facilité d'organisation des expéditions		3,6	3	3,7	3,4	2,9	3,7	2,3	3,1	3,1
Qualité des services logistiques		3,8	3,8	3,8	3,9	3,3	4,2	2,6	3,9	2,9
Suivi et traçabilité		3,8	3,7	4	4,2	3,2	4,2	2,5	4,1	3,2
Respect des délais		3,7	4	4,1	3,8	3,5	4,1	2,9	3,6	3,2

Tableau 38 : Estimation et évaluation de la performance logistique pour l'étape de production du EGP

Chaîne de valeur	EGP				
	Pays	Chine	Japon	Corée du Sud	États-Unis
LPI index		3,7	3,9	3,8	3,8
L'efficacité des douanes		3,3	3,9	3,9	3,7
Qualité de l'infrastructure		4	4,2	4,1	3,9
Facilité d'organisation des expéditions		3,6	3,3	3,4	3,4
Qualité des services logistiques		3,8	4,1	3,8	3,9
Suivi et traçabilité		3,8	4	3,8	4,2
Respect des délais		3,7	4	3,8	3,8

Tableau 39 : Estimation et évaluation de la performance logistique pour l'étape de production du Raw wafer

Chaîne de valeur	Raw wafer											
	Pays	Chine	Japon	Corée du Sud	États-Unis	Royaume-Uni	Allemagne	Taïwan	Malaisie	Indonésie	Italie	Danemark
LPI index	3,7	3,9	3,8	3,8	3,7	4,1	3,9	3,6	3	3,7	4,1	4,3
L'efficacité des douanes	3,3	3,9	3,9	3,7	3,5	3,9	3,5	3,3	2,8	3,4	4,1	4,2
Qualité de l'infrastructure	4	4,2	4,1	3,9	3,7	4,3	3,8	3,6	2,9	3,8	4,1	4,6
Facilité d'organisation des expéditions	3,6	3,3	3,4	3,4	3,5	3,7	3,7	3,7	3	3,4	3,6	4
Qualité des services logistiques	3,8	4,1	3,8	3,9	3,7	4,2	3,9	3,7	2,9	3,8	4,1	4,4
Suivi et traçabilité	3,8	4	3,8	4,2	4	4,2	4,2	3,7	3	3,9	4,3	4,4
Respect des délais	3,7	4	3,8	3,8	3,7	4,1	4,2	3,7	3,3	3,9	4,1	4,3

6.4.5 Risques liés à la ressource

Dans chaque étape de la chaîne de valeur, nous allons évaluer l'indice d'épuisement statique, la dépendance au sous-produit, la croissance de la demande et le taux de recyclage en fin de vie pour les ressources Silicium-métal, EGP et Raw wafer (voir tableau N° 40).

Tableau 40 : Evaluation des risques liés à la ressource

Risques liés à la ressource	Silicium-métal	EGP	Raw wafer
Indice d'épuisement	Les réserves de quartz de haute pureté sont considérées comme suffisantes pour répondre aux besoins mondiaux de consommation pour les prochaines décennies (Blengini et al., 2020b) (USGS, 2020)	/	/
Dépendance au sous-produit	Non	Non	Non
Croissance de la demande	La croissance du marché du silicium métallique devrait se poursuivre dans les années à venir (Blengini et al., 2020b)	La consommation mondiale de l'EGP devrait augmenter avec un taux de croissance annuel composé de 10,2 % (Blengini et al., 2020b)	Les ventes Raw wafer pour les semi-conducteurs devraient augmenter
Taux de recyclage en fin de vie	0 % (Bourg, 2018)	/	/

6.4.6 Risque de concentration

Au niveau de l'intersection des trois systèmes, nous allons estimer et évaluer le niveau de concentration des pays producteurs et la concentration des entreprises productrices.

6.4.6.1 La concentration de la production du silicium-métal

Cette évaluation est réalisée en se basant sur l'index Herfindahl-Hirschman (HHI) (T. Brown, 2018). Afin d'évaluer la concentration des pays producteurs du silicium métal, nous nous appuyons sur les données fournies par l'USGS en 2021.

D'après les critères d'évaluation HHI, le marché du silicium métal est fortement concentré, car la Chine détient plus de 50 % de part de marché. De plus, le calcul du HHI des pays producteurs du silicium s'élève à 6014.

$$\text{HHI}_{\text{Silicium métal}} = 77^2 + 6^2 + 4^2 + 4^2 + 3^2 + 2^2 + 2^2 + 1^2 + 1^2$$

$$\text{HHI}_{\text{Silicium métal}} = 6014$$

Afin d'évaluer la concentration des entreprises productrices du silicium métal, nous nous appuyons sur les données fournies par (Société Chimique de France, n.d.) et les sites des entreprises pour l'année 2021. Sachant que la production globale du silicium-métal était de 3472 kilotonnes.

Etant donné que ne nous disposons pas des volumes de production pour chaque entreprise pour la même année 2021, nous avons utilisé la méthode d'évaluation de (Buchert et al., 2009) qui stipule que si les trois premiers producteurs disposent de plus 90 % du marché il est considéré comme concentré. Dans ce contexte, les trois premiers producteurs sont Hoshine Silicon 800 000 t (capacité), Ferroglobe 253,991t (2021) (Ferroglobe, 2021), Elkem 215 000 t (2021).

La somme de leur pourcentage de production est égale à : $23 + 7,3 + 6,2 = 36,4$ % qui est inférieur à 90 %. De ce fait, la concentration de la production au niveau des entreprises n'est pas concentrée.

6.4.6.2 Concentration de la production de l'EGP

L'évaluation de la production des pays n'étant pas possible, nous allons évaluer la concentration de la production des entreprises.

Les données collectées concernent la production des entreprises en 2019 et en 2020. En prenant l'hypothèse que la production est restée constante entre 2019 et 2020 et 2021, nous avons calculé la concentration de la production : Hemlock (26,6 %), Wacker (20,5 %), Tokuyama (15 %), Mitsubishi (7,2 %), Sumitomo (6 %), REC Silicon (2 %), GLC Poly (12 %), Huanghe Hydropower (7,9 %), Tianhong Ruike (2,4 %).

$$HHI_{EGP} = 26,6^2 + 20,5^2 + 15^2 + 7,2^2 + 6^2 + 2^2 + 12^2 + 7,9^2 + 2,4^2$$

$$HHI_{EGP} = 1656$$

La valeur du HHI_{EGP} est entre 1500 et 2500, ce qui fait que le marché est modérément concentré.

6.4.6.3 Concentration de la production du Raw wafer

L'évaluation de la production des pays n'étant pas possible, nous allons évaluer la concentration de la production des entreprises. En se basant sur les rapports d'entreprise, la part de marché des cinq plus grands producteurs est : Shin-Etsu Handotai (SEH) (33 %), SUMCO (25 %), Global wafer (17 %), Siltronic AG (13 %), SK Siltron (12 %)

$$HHI_{Raw\ wafer} = 33^2 + 25^2 + 17^2 + 13^2 + 12^2$$

$$HHI_{Raw\ wafer} = 2316$$

La valeur du HHI *Raw wafer* est entre 1500 et 2500. De ce fait, le marché est modérément concentré par rapport aux entreprises. Cependant, le marché est détenu par seulement quatre pays. Par conséquent, des effets négatifs sur la fiabilité de l’approvisionnement peuvent émerger de cette situation. La synthèse de l’évaluation du risque de concentration pour les trois industries (silicium-métal, EGP et *Raw wafer*) se trouve dans le tableau N° 41.

Tableau 41 : Estimation et évaluation du risque de concentration dans les trois industries (silicium-métal, EGP et Raw wafer)

Risque de concentration	Silicium métal	EGP	<i>Raw wafer</i>
Pays	6014	Le marché est détenu par quatre pays	Le marché est détenu par 12 pays : le Japon 15 sites de production, les Etats-Unis 6 sites de production
Entreprises	Non concentrée	Concentration modérée	Concentration modérée

6.5 Etape N° 4 : Analyse des risques

Dans cette partie de la méthodologie, nous allons synthétiser l'ensemble des résultats de l'évaluation des risques afin de faire émerger les problématiques et les points chauds qui peuvent impacter la sécurité de l'approvisionnement. En d'autres termes, nous allons identifier les points de goulot d'étranglement du réseau d'approvisionnement de la ressource *Raw wafer*.

6.5.1 Analyse horizontale du réseau d'approvisionnement

Cette analyse permet de mettre en évidence des chemins critiques. Ces derniers sont la séquence décrivant le parcours de l’approvisionnement du *Raw wafer*. Dans ce contexte, la séquence est (silicium-métal-EGP-*Raw wafer*) et elle est constituée de trois nœuds et de deux liens.

Dans la définition du chemin critique pour la partie invisible du réseau d’approvisionnement, nous avons indiqué que ce dernier prend en compte les risques externes du fournisseur (risques pays et risques naturels) et les risques structure réseau (risques logistiques et réglementaires).

De plus, pour considérer un chemin comme critique le chemin doit présenter au moins un risque de niveau haut ou très haut. Dans le contexte de cette étude, tous les chemins sont critiques, car au moins un des acteurs ou un lien présentent un risque de niveau haut ou très haut (voir tableaux N° 42, 43 et 44).

Tableau 42 : Synthèse des niveaux de risques pour la production du silicium-métal

Pays (part de marché)	Risques logistiques	Stabilité politique	Qualité de la réglementation	Contrôle de la corruption	Etat de droit	Efficacité de la gouvernance	Risques naturels
Russie (2 %)	4	5	4	5	5	4	5
Brésil (6 %)	3	4	4	4	4	4	4
Chine (77 %)	2	4	4	3	3	2	5
Etats-Unis (4 %)	2	4	2	2	2	2	5
Bosnie-et-Herzégovine (1 %)	3	4	4	4	4	5	2
Australie (1 %)	2	2	1	1	1	1	5
France (3 %)	1	3	2	2	2	2	4
Allemagne (2 %)	1	2	1	1	1	2	3
Norvège (4 %)	2	1	1	1	1	1	2

Tableau 43 : Synthèse des niveaux de risques pour la production de l'EGP

Pays	Risques logistiques	Stabilité politique	Qualité de la réglementation	Contrôle de la corruption	Etat de droit	Efficacité de la gouvernance	Risques naturels
Etats-Unis	2	4	2	2	2	2	5
Chine	2	4	4	3	3	2	5
Corée du Sud	2	3	1	2	2	1	4
Japon	1	2	2	1	1	1	5

Tableau 44 : Synthèse des niveaux de risques pour la production du Raw wafer

Pays (sites de production)	Risques logistiques	Stabilité politique	Qualité de la réglementation	Contrôle de la corruption	Etat de droit	Efficacité de la gouvernance	Risques naturels
Indonésie (1 site)	3	4	3	4	4	3	5
Chine (1 site)	2	4	4	3	3	2	5
Etats-Unis (6 sites)	2	4	2	2	2	2	5
Malaisie (3 sites)	2	3	2	3	3	2	5
Italie (2 sites)	2	3	3	3	3	3	4
Taiwan (5 sites)	1	3	1	2	2	1	5
Corée du Sud (3 sites)	2	3	1	2	2	1	4
Japan (15 sites)	1	2	2	1	1	1	5
Royaume-Uni (1 site)	2	3	1	1	2	2	3
Allemagne (2 sites)	1	2	1	1	1	2	3
Danemark (1 site)	1	2	1	1	1	1	1
Singapour (3 sites)	1	1	1	1	1	1	1

Dans ce réseau d'approvisionnement, nous avons identifié trois étapes. La première étape implique neuf nœuds, la deuxième quatre nœuds et la dernière phase compte 12 nœuds. De ce fait, il existe 432 chemins possibles pour l'approvisionnement en *Raw wafers*.

Pour quantifier le risque associé à chaque itinéraire, nous utilisons une méthode cumulative qui additionne les risques individuels rencontrés à chaque étape. Par exemple, pour le parcours Russie-Chine-Italie, le risque total est calculé comme suit :

Risque global du chemin Russie-Chine-Italie = (Risques logistiques Russie+ Risques Pays Russie+ Risques naturels Russie) + (Risques logistiques Chine+ Risques Pays Chine+ Risques naturels Chine) + (Risques logistiques Italie+ Risques Pays Italie+ Risques naturels Italie) + Existence d'une sanction

Risque global du chemin Russie-Chine-Italie = (4+23+5)+(2+20+4)+(2+15+4) + 0

Risque global du chemin Russie-Chine-Italie = 76

Les risques pays sont composés de cinq indicateurs : stabilité politique, qualité de la réglementation, état de droit, contrôle de la corruption efficacité de la gouvernance.

La présence de sanctions est un facteur additionnel. De ce fait, des sanctions économiques et financières entre des paires de pays (fournisseurs-acheteurs), peuvent augmenter le niveau de risque. Une valeur de 5 est ajoutée au score total de risque dans le cas d'un couple de pays sanctionné, et une valeur de 10 (2 x 5) si deux couples de pays sur le parcours sont sujets à des sanctions.

Cette méthode permet de hiérarchiser les chemins en fonction de leur niveau de risque.

Le tableau N° 41 synthétise l'estimation des risques en se basant sur l'échelle semi qualitative intégré dans la partie N°5 du manuscrit.

Tableau 45 : Estimation des risques pour le chemin Russie-Chine-Italie

Pays	Risques logistiques	Stabilité politique	Qualité de la réglementation	Contrôle de la corruption	Etat de droit	Efficacité de la gouvernance	Risques naturels	Présence de sanctions	Score global
Russie (2 %)	4	5	4	5	5	4	5	0	76
Chine	2	4	4	3	3	2	5		
Italie (2 sites)	2	3	3	3	3	3	4		

Dans le contexte de cette étude, les trois chemins les plus critiques sont dans le tableau N° 46

Tableau 46 : Les trois chemins les plus critiques

Silicium-métal	Score	EGP	Score	Raw wafer	Score	Sanctions	Score global du chemin
Russie	32	Etats-Unis	19	Chine	23	10	84
Russie	32	Etats-Unis	19	Indonésie	26	5	82
Russie	32	Chine	23	Indonésie	26	0	81

Cette analyse permet également d'identifier les chemins les moins critiques, ces derniers représentant une combinaison des nœuds de la phase production du silicium-métal des producteurs de l'EGP et des producteurs de *Raw wafers* avec les niveaux de risque les moins élevés.

Tableau 47 : les composants des possibilités des chemins les moins critiques

Silicium-métal	Score	EGP	Score	Raw wafer	Score
Allemagne (2 %)	11	Corée du Sud	15	Royaume-Uni (1 site)	14
Norvège (4 %)	9	Japon	13	Allemagne (2 sites)	11
				Danemark (1 site)	8
				Singapour (3 sites)	7

6.5.2 Analyse verticale du réseau d'approvisionnement

Dans l'analyse verticale, nous nous intéressons à la structure du marché et à la situation des plus grands producteurs. Elle se fera sous forme d'analyse qualitative basée sur les données recueillies sur les risques fournisseurs et les risques de concentration pays et entreprises.

6.5.2.1 Production du silicium-métal

Le niveau de concentration du marché de silicium métal est très élevé, avec une domination franche de la Chine.

Afin d'analyser les risques liés aux producteurs de silicium-métal, nous avons créé un histogramme englobant les pays, les risques et leur niveau (voir figure N° 50).

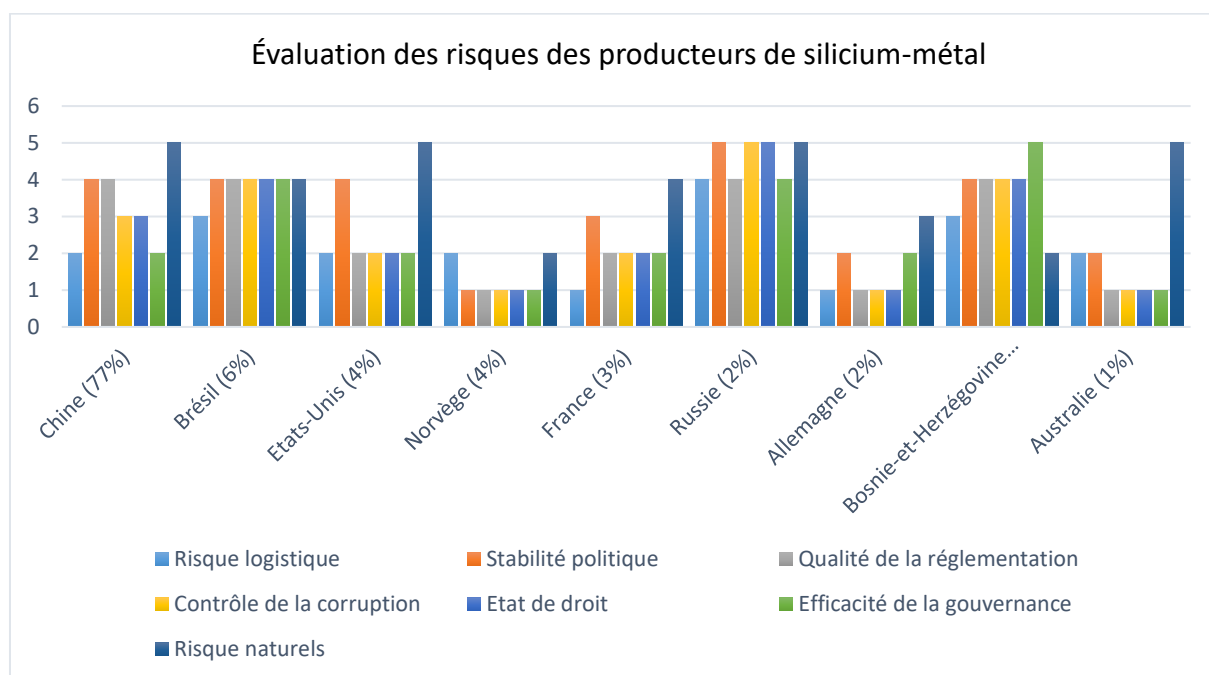


Figure 50 : Histogramme de l'évaluation des risques des producteurs du silicium-métal

L'évaluation des risques de l'étape de la chaîne de valeur « Silicium-métal » suggère que le risque est extrêmement élevé pour plusieurs raisons.

- La Chine, qui détient 77 % de la production mondiale du silicium-métal, exerce une influence majeure sur le marché. Sa position lui confère des avantages lui permettant

d'affecter les prix et les conditions contractuelles. Cependant, ce pays présente un niveau très haut de risque naturel qui pourrait perturber gravement la production. De plus, la stabilité politique et la qualité de la réglementation sont bas, ce qui implique une probabilité de risques liés à la violence, au terrorisme et une réglementation inefficace. La performance logistique du pays est moyenne, avec une faible efficacité douanière pouvant impliquer des retards dans la chaîne d'approvisionnement. En outre, les tensions géopolitiques avec les Etats-Unis qui est un acteur majeur dans la production de l'EPG a conduit à la mise en place de sanctions économiques et financières croisées augmentant la perturbation et limitant la circulation dans le réseau d'approvisionnement.

Ainsi, ce cumul de facteurs fait que l'étape de la production du silicium présente des risques importants sur plusieurs fronts.

Le Brésil est le deuxième producteur de silicium-métal avec 4 % de part de marché. Ce pays présente un risque naturel haut, dû au manque d'infrastructures et de préparations, pouvant entraîner des conséquences graves sur la production du silicium-métal. De plus, ce pays obtient des scores bas dans tous les indicateurs de gouvernance, augmentant ainsi les risques de conflits internes et diminuant la confiance dans les transactions. Enfin, la performance logistique du Brésil est moyenne, avec une performance douanière et facilité d'expédition insuffisante, ce qui peut retarder la chaîne d'approvisionnement. Ces multiples facteurs font du Brésil un fournisseur risqué pour les entreprises dépendantes du silicium-métal.

La Russie est le septième producteur mondial de silicium-métal. Cependant, il présente le profil de risque le plus élevé. Ce pays est très vulnérable aux catastrophes naturelles, ce qui pourrait perturber gravement sa production. Concernant la performance logistique, elle est mauvaise au niveau de l'efficacité douanière et de la facilité d'expédition impactant ainsi la fiabilité de la chaîne d'approvisionnement. De plus, ses indicateurs de gouvernance sont soit bas, soit très bas.

En outre, la Russie fait l'objet de sanctions économiques et financières de la part des États-Unis, de l'Union européenne et de la Corée du Sud, aggravant encore les risques associés à l'approvisionnement en silicium-métal depuis ce pays. Ce cumul de facteurs fait de la Russie le fournisseur le plus problématique sur le marché du silicium.

6.5.2.2 Production de l'EGP

Les sites de production de l'EGP sont répartis entre quatre pays : les États-Unis comptent quatre sites, suivis du Japon et de la Chine avec trois sites chacun, et enfin la Corée du Sud avec un seul site. En ce qui concerne les entreprises, les trois principaux acteurs sont Hemlock Semiconductor et Wacker Chemie, basés aux États-Unis, ainsi que Tokuyama au Japon. Ces trois entreprises détiennent plus de la moitié de la production totale.

Afin d'analyser les risques des producteurs de l'EGP, nous avons créé un histogramme englobant les pays, les risques et leur niveau (voir figure N° 51).

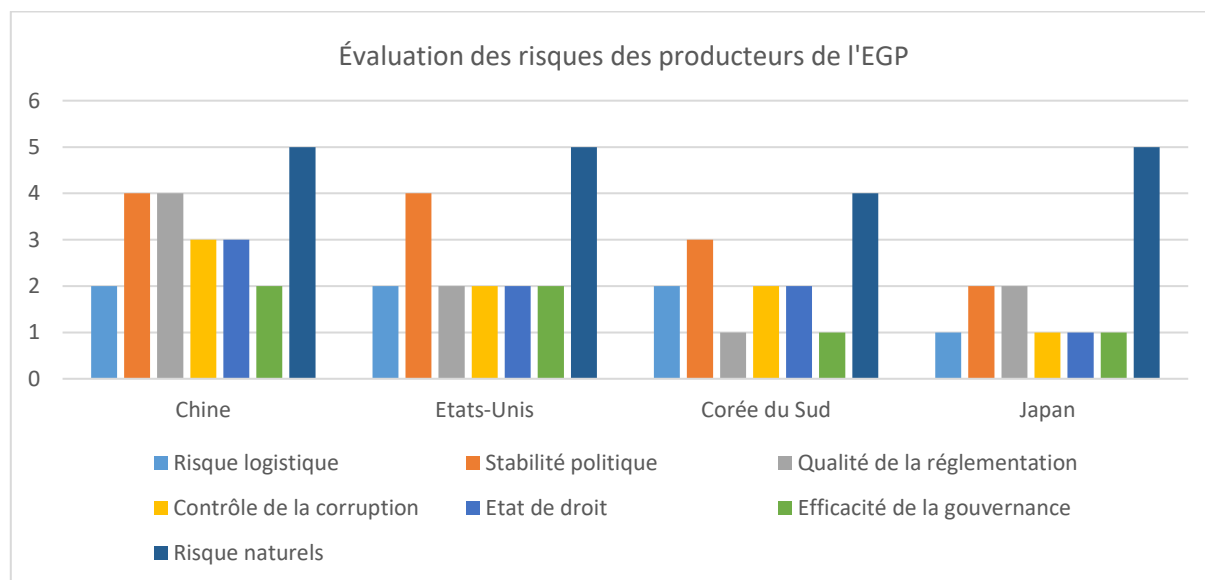


Figure 51 : Histogramme de l'évaluation des risques des producteurs de l'EGP

Les États-Unis font face à des risques naturels élevés comme les ouragans et les tremblements de terre, qui peuvent perturber la chaîne d'approvisionnement. Bien que les États-Unis aient mis

en place des mesures pour faire face à ces risques, leur efficacité n'est pas suffisante pour éliminer complètement la menace. Concernant la performance logistique, ce pays présente des scores élevés pour tous les indicateurs. Cependant, la stabilité politique est basse, créant des incertitudes supplémentaires. Les sanctions économiques et financières croisées avec la Chine et la Russie, des producteurs de silicium-métal, augmentent les risques d'approvisionnement. Le pays présente des avantages en termes de logistique, mais des risques considérables.

Concernant la Chine, c'est un acteur émergent dans ce marché qui a commencé sa production en 2020. Comme indiqué dans les données sur le marché du silicium, le pays présente un niveau élevé de risque naturel. Sur le plan logistique, son indice est mauvais. De plus, le niveau de stabilité politique et la qualité de la réglementation sont bas. En outre, l'existence de sanctions économiques et financières croisées avec les États-Unis ajoute des complications.

Le Japon abrite le troisième plus grand producteur de l'EGP. Les seuls éléments alarmants dans ce pays sont les risques naturels qui peuvent perturber la chaîne d'approvisionnement. Les indices de gouvernance sont hauts à extrêmement hauts, et il fait partie des pays les plus performants en logistique.

La Corée du Sud est le pays le moins important dans ce marché avec un seul site de production. Le point alarmant concerne les risques naturels élevés comme les tremblements de terre et les tsunamis, posant des préoccupations pour l'approvisionnement. Néanmoins, le pays est performant en termes de logistique, ce qui est un avantage pour sécuriser les flux d'approvisionnement. La stabilité politique est jugée moyenne, ajoutant une certaine incertitude à la chaîne d'approvisionnement. En résumé, la Corée du Sud présente des avantages en matière de logistique, mais fait face à des risques naturels élevés et une stabilité politique moyenne.

6.5.2.3 Production du Raw wafer

Les données collectées sur le marché du *Raw wafer* concernent principalement les principales entreprises et l'emplacement des sites de production. Le marché est détenu par cinq entreprises qui ont des sites de production dans 12 pays. Le Japon détient 15 sites de production, suivi des États-Unis qui en possèdent six sites de production et le Taiwan abrite cinq sites de production. Afin d'analyser les risques des producteurs du *Raw wafer*, nous avons créé un histogramme englobant les pays, les risques et leur niveau (voir figure N° 52).

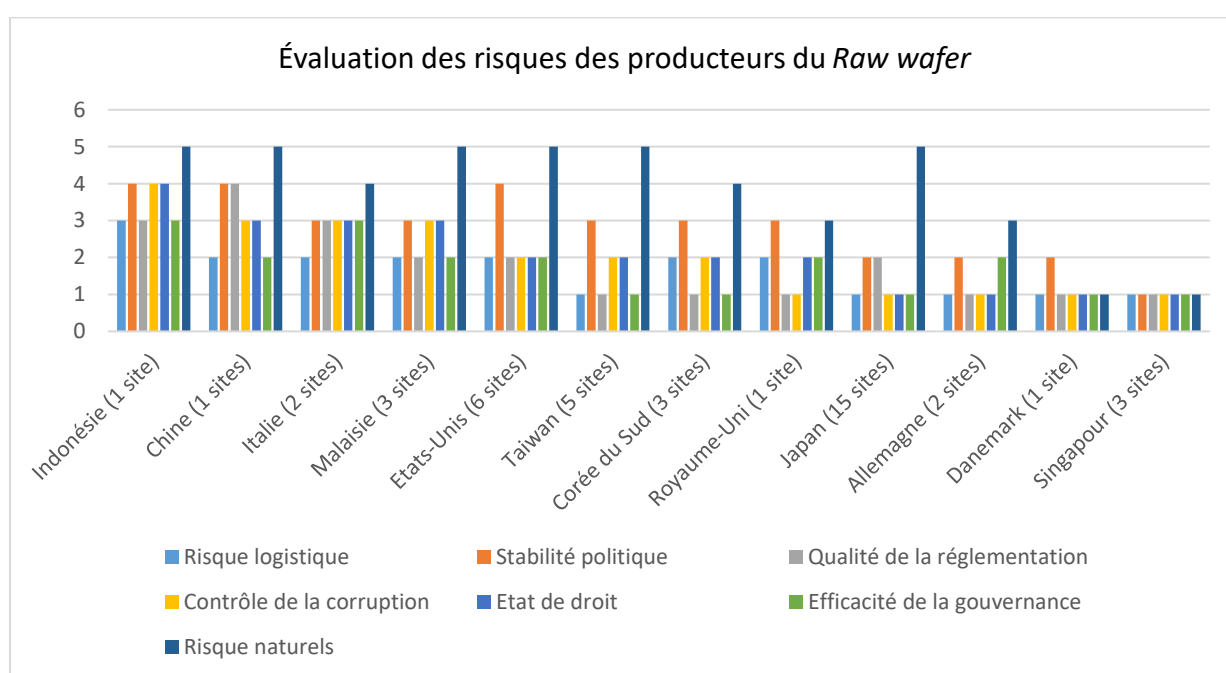


Figure 52 : Histogramme de l'évaluation des risques des producteurs du Raw wafer

Le Japon est le pays qui abrite 15 sites de production. Le seul élément alarmant dans ce pays, c'est le risque naturel qui peut perturber la chaîne d'approvisionnement. Toutefois, les indices de gouvernance sont hauts à extrêmement hauts, et il fait partie des pays les plus performants en logistique.

Le deuxième pays en termes de nombre de sites de production est les États-Unis, qui comptent six sites. Ce pays est confronté à un risque naturel haut, menaçant sa chaîne

d'approvisionnement. Bien que performant en logistique, il souffre d'une stabilité politique basse et des tensions géopolitiques avec la Chine. L'émergence de la Chine sur le marché de l'EGP pourrait affecter la production du *Raw wafer* américain.

Le troisième pays en termes de nombre de sites de production est Taïwan, qui compte cinq sites de production. Il est caractérisé par un risque naturel très haut, pour lesquels les mesures de mitigation existantes sont insuffisantes. En termes de logistique, le pays est performant, mais sa stabilité politique est moyenne du fait de la situation géopolitique tendue avec la Chine.

Le pays qui présente un niveau de risque le plus élevé est l'Indonésie. Ce dernier abrite un seul site de production, mais il est confronté à un très haut niveau de risque naturel. Sa stabilité politique est basse et son efficacité en matière de gouvernance est moyenne. Le faible état de droit et le faible contrôle de la corruption contribuent à un environnement commercial risqué. Sa performance logistique est moyenne, avec un point faible particulier en ce qui concerne l'efficacité des douanes.

A cette analyse, nous allons ajouter une troisième couche qui l'analyse des risques liés à la ressource.

6.5.3 Analyse des risques liés à la ressource

Dans cette partie, nous allons analyser la situation à long terme du silicium-métal, de l'EPG et du *Raw wafer* en tant que ressource.

Concernant la ressource silicium-métal, bien que l'indice d'épuisement statique suggère une disponibilité suffisante des réserves de quartz de haute pureté pour les prochaines décennies, cette disponibilité pourrait être mise sous pression par la croissance continue de la demande pour ce matériau et par un taux de recyclage en fin de vie actuellement nul. Par conséquent, la disponibilité du silicium est liée aux sources primaires de production.

L'analyse à long terme des risques associés à l'EGP et au *Raw wafer* révèle plusieurs préoccupations en matière d'approvisionnement. Il n'existe pas d'indice d'épuisement, étant donné que ce sont des produits intermédiaires. Néanmoins, la croissance continue de la demande peut mettre sous pression la capacité de production existante. Les taux de recyclage étant indisponibles, renforçant la dépendance aux sources primaires de production. Les producteurs sont confrontés à des risques naturels élevés et à d'autres défis propres à chaque pays présenté précédemment.

6.5.4 Synthèse de l'analyse des risques dans le réseau d'approvisionnement

Les trois analyses révèlent plusieurs constats qui soulignent la fragilité de l'approvisionnement du *Raw wafer*. D'abord, la Chine, présente à toutes les étapes de l'approvisionnement et dominant le marché du silicium-métal tout en émergeant dans le marché de l'EGP, accroît son influence. Ceci rend ce réseau d'approvisionnement dépendant d'un acteur qui présente un profil de risque élevé.

La concentration du marché de l'EGP entre les mains de quatre pays et la production du *Raw wafer* entre les mains de cinq producteurs exacerbant la situation de l'approvisionnement. De plus, il ne faut pas oublier que chaque pays abritant les sites de production présente un ensemble de risques (naturels, logistiques et de gouvernance) de niveau haut et très haut.

Le paysage global du réseau d'approvisionnement du *Raw wafer* peut être qualifié de fragile, avec des préoccupations réelles et des niveaux de risque très hauts. Pris ensemble, ces éléments témoignent d'une grande probabilité de rupture d'approvisionnement. Ainsi, posant un défi majeur pour assurer la fiabilité de l'approvisionnement. Il devient donc impératif d'adopter des mesures pour la réduction des risques.

6.6 Etape N° 5 : Mitigation des risques

Dans cette partie, nous allons présenter les stratégies de mitigation en nous basant sur les trois analyses effectuées : l'analyse verticale, l'analyse horizontale et l'analyse à long terme liée à la ressource.

6.6.1 Stratégies basées sur l'analyse verticale

Dans cette étude de cas, l'identification des chemins critiques est un moyen puissant pour les entreprises, qu'elles aient ou non une visibilité complète sur leur chaîne d'approvisionnement.

- Utilité de l'analyse lorsque la visibilité est bonne

Quand une entreprise a une visibilité complète sur sa chaîne, cette analyse lui permet de reformuler sa stratégie d'approvisionnement en choisissant des partenaires et des chemins associés à des risques moindres. Ainsi, les chemins à éviter seront ceux qui représentent un risque global élevé. Avec une visibilité accrue, l'entreprise peut affiner ses choix d'itinéraires, éliminant ou minimisant l'interaction avec des points à haut risque. Ceci permet de réduire significativement les risques et d'établir des partenariats stratégiques avec des fournisseurs connectés à des chemins moins critiques.

- Utilité de l'analyse en l'absence de visibilité complète

Dans les cas où les entreprises n'ont pas une visibilité totale sur leur chaîne d'approvisionnement, l'analyse des chemins critiques reste importante. Cette analyse révèle que tous les chemins comportent des risques significatifs à des degrés divers, incluant des risques naturels, logistiques, politiques et de gouvernance. Par conséquent, des mesures de protection et de prévention doivent être mises en place. L'entreprise doit diversifier ses fournisseurs et maintenir un inventaire tampon plus grand pour pallier toute rupture inattendue.

- Stratégies communes aux deux scénarios :

- la veille stratégique : un suivi continu des conditions politiques et économiques dans les pays sources peut aider à anticiper les problèmes.
- l'audit et l'évaluation constante : une évaluation constante des risques est indispensable.

Chacune de ces stratégies exige des ressources différentes en termes de temps, d'argent et d'expertise.

6.6.2 Stratégies basées sur l'analyse horizontale

L'analyse verticale a permis de fournir un profil des industries présentes à chaque étape de la chaîne de valeur. Cette analyse présente l'exemple parfait que certaines situations peuvent être hors du contrôle pour les entreprises. Cependant, il existe des moyens de préparation et réactivité qui seront axés sur la protection de l'approvisionnement comme des stocks élevés, des relations avec des fournisseurs de secours dans des pays différents, et des plans de continuité de l'activité.

6.6.3 Stratégies de mitigation basées sur l'analyse à long terme du système ressource

L'analyse des risques a apporté des informations sur le niveau de risque que peut présenter l'utilisation de silicium métal de l'EGP et du *Raw wafer*. Le *Raw wafer* à base silicium est utilisé pour son coût et ses propriétés technologiques. Cependant, le tableau que dresse l'analyse des risques incite à prendre des mesures à court terme, mais également à des solutions pour le long terme. Notamment l'investissement en Recherche et Développement pour développer des matériaux de substitution et des procédés de recyclage. Le second point concerne les plans de collecte des produits en fin de vie, mis en place par les entreprises.

6.7 Conclusion

Cette dernière partie a permis de valider l'applicabilité et l'efficacité de notre méthodologie dans le contexte du réseau d'approvisionnement du *Raw wafer*. En élaborant cette étude de cas, nous

avons choisi un scénario caractérisé par une perte totale de visibilité, ce qui nous a permis d'établir non seulement la pertinence, mais aussi la robustesse de notre approche.

En suivant notre méthodologie pas à pas, nous avons accompli plusieurs objectifs. Tout d'abord, nous avons validé l'importance du *Raw wafer* comme sujet d'étude pertinent. Ensuite, nous avons réussi à cartographier une partie de son réseau d'approvisionnement. Ceci nous a permis d'estimer et d'évaluer un ensemble de risques : ceux liés aux fournisseurs, à la structure du réseau, et aux ressources impliquées. Par ailleurs, nous avons réalisé une analyse horizontale afin d'identifier les chemins critiques dans le réseau, une analyse verticale pour profiler les risques associés à chaque industrie impliquée, et enfin une analyse des risques liés aux ressources pour en déterminer leur profil de risque.

L'étude n'a pas été sans défis. Ainsi, les obstacles rencontrés comprennent la complexité du procédé technique de transformation de la ressource de son état initial (silicium-métal) à son état final (*Raw wafer*), l'identification des acteurs clés et des interconnexions, et la difficulté d'obtenir des données fiables. En effet, de nombreuses entreprises ne divulguent pas les informations essentielles à une cartographie précise.

Notre analyse a révélé un paysage d'approvisionnement à haut risque et susceptible de connaître des ruptures et des perturbations. Ce paysage est caractérisé par la concentration de la production de silicium métal en Chine, un pays évalué comme étant à haut risque. De plus, la limitation de la production de l'EGP et du *Raw wafer* à un nombre restreint de producteurs les confronte à des risques élevés et très élevés sur plusieurs fronts : naturels, logistiques et de gouvernance.

Pour atténuer ces risques, l'identification et la classification des chemins critiques permettront d'orienter la reconfiguration potentielle du réseau. Cette approche sera complétée par les pratiques traditionnelles de gestion des risques dans les chaînes d'approvisionnement. Ainsi,

pour faire face aux risques provenant des industries intervenant dans le réseau d'approvisionnement et qui échappent au contrôle des entreprises. En ce qui concerne les risques liés aux ressources, l'absence de recyclage est l'élément le plus alarmant.

Ainsi, notre méthodologie offre un cadre aux entreprises pour adopter une posture proactive pour gérer les risques liés à leurs réseaux d'approvisionnement, que ces entreprises disposent d'une visibilité complète sur leurs chaînes d'approvisionnement ou qu'elles soient confrontées à une perte de visibilité.

7 Discussion et conclusion

Cette dernière partie du manuscrit présente une synthèse de la recherche et souligne les résultats de chaque phase afin de fournir une vision globale du travail accompli. Elle aborde également les contributions aux connaissances existantes ainsi que les implications managériales qui en découlent. Enfin, cette partie présente les limites de la recherche et formule des orientations pour les recherches futures.

7.1 Rappel de la question de recherche

La gestion des risques dans les réseaux d'approvisionnement des métaux constitue un enjeu majeur, tant pour la société en général que pour des secteurs industriels spécifiques qui en dépendent. Ces réseaux d'approvisionnement évoluent dans un contexte de mondialisation, de complexification des réseaux, de perte de visibilité et des préoccupations liées à la consommation et la disponibilité des métaux.

C'est dans ce contexte qu'a émergé notre question de recherche : "***Comment développer une méthodologie efficace pour sécuriser l'approvisionnement en métaux pour les industries qui en dépendent, tout en intégrant les contraintes associées à la complexité, la mondialisation, la perte de visibilité, ainsi qu'aux activités minières et aux processus de transformation des métaux ?***"

7.2 Synthèse des résultats

Dans le but de répondre à cette question de recherche, nous avons entrepris une démarche exploratoire. Cette démarche a permis de collecter plusieurs éléments pour la construction de la méthodologie, que ce soient des processus, des outils ou des théories. Ces derniers sont articulés autour de notre question de recherche principale.

Ainsi, deux phases exploratoires dans le domaine de la gestion des risques dans les chaînes d'approvisionnement (SCRM) ont été menées. La première phase a identifié des catégories de

risques dédiées à la chaîne d'approvisionnement, des outils permettant d'épauler la gestion des risques et les stratégies de réduction des risques. De plus, elle a identifié les étapes clés du processus SCRM. Cependant, elle a mis en évidence son caractère générique, ce qui a orienté la recherche vers des approches spécifiques aux industries dépendant des métaux.

La deuxième phase a confirmé l'importance du processus SCRM. Par ailleurs, elle a mis en évidence une étape additionnelle qui est la cartographie de la chaîne d'approvisionnement. Cependant, elle a également identifié des lacunes. Ces lacunes sont l'absence de cadre pour réaliser la cartographie et l'absence de catégories de risques spécifiques aux industries qui dépendent des métaux. Ces résultats ont souligné le besoin de développer une nouvelle méthodologie.

Ensuite, nous avons entamé une troisième phase exploratoire. Cette dernière visait à identifier les approches et outils permettant de prendre en compte le contexte particulier des industries qui dépendent des métaux et qui n'ont pas été pris en compte dans le domaine du SCRM. Ainsi, l'étude s'est concentrée sur les crises liées au cobalt, au palladium et aux terres rares, et a souligné le potentiel d'une approche proactive connue sous le nom d'évaluation de la criticité des matières. Cette dernière examine plusieurs facteurs tels que la disponibilité géologique, la concentration de la production mondiale et la stabilité politique des pays producteurs.

Une quatrième phase exploratoire sous forme de revue de littérature systématique sur la criticité des matières a été réalisée. Cette dernière a permis d'établir que le domaine de la criticité des matières est multidisciplinaire prenant en compte l'aspect économique, géologique, géopolitique et environnemental de l'approvisionnement des métaux. Ce domaine est abordé tant par les sciences sociales que par les sciences techniques et plusieurs thématiques de recherche ont été identifiées. Les plus importantes dans le cadre de notre étude sont l'évaluation de la criticité et les stratégies d'atténuation de la criticité. Ainsi, cette phase a permis d'identifier de nouveaux facteurs de risque et des stratégies pour les atténuer. En outre, elle a permis

l'identification et la construction d'un ensemble de bases de données pour estimer et évaluer les risques qui peuvent être intégrés dans notre méthodologie.

Ensuite, nous avons entamé la construction de la méthodologie. Cette dernière était guidée par les résultats des phases exploratoires, les défis de visibilité, la complexité du réseau d'approvisionnement et les préoccupations spécifiques aux activités minières et aux transformations des métaux.

La méthodologie est structurée autour de cinq étapes principales : identification des réseaux d'approvisionnement à prioriser, cartographie des réseaux sélectionnés, estimation et évaluation des risques, analyse des risques et enfin, leur mitigation. Cette méthodologie intègre le défi de la visibilité en suggérant l'utilisation de données secondaires. De plus, elle intègre le défi de la complexité en recommandant la décomposition du système en trois sous-systèmes distincts. Par ailleurs, cette division permet une analyse approfondie des risques associés à chaque sous-système et leur interconnexion. Dans le volet de l'analyse, cette méthodologie inclut une analyse verticale pour identifier les chemins critiques, une analyse horizontale pour analyser les profils de risque des industries qui interviennent dans le réseau d'approvisionnement ainsi qu'une analyse des risques liés aux ressources pour établir le profil de risque des ressources.

Ensuite, afin de valider et tester la robustesse et la pertinence de cette méthodologie, elle a été appliquée au réseau d'approvisionnement de *Raw wafer* en choisissant un scénario de manque total de visibilité. L'application de la méthodologie pas à pas a permis de cartographier une partie du réseau d'approvisionnement du *Raw wafer* et d'estimer et d'évaluer un éventail de risques liés aux fournisseurs, à la structure du réseau, et aux ressources impliquées.

Les résultats décrivent un paysage d'approvisionnement à haut risque, accentué par la concentration de la production de silicium métal en Chine, des sanctions économiques et financières entre plusieurs couples de fournisseurs-acheteurs et des profils de risque de

plusieurs acteurs inquiétants. Pour atténuer ces risques, notre méthodologie propose d'identifier et de classer les chemins critiques pour la reconfiguration potentielle du réseau. Cette approche doit être complétée par des stratégies de réduction des risques traditionnels de gestion des risques.

Ainsi, la méthodologie développée répond à la question de recherche en intégrant

- la complexité du réseau d'approvisionnement en le décomposant en sous-systèmes ;
- la perte de visibilité et la mondialisation en intégrant la cartographie comme étape indispensable et en fournissant un cadre pour réaliser cette cartographie. En considérant les acteurs majeurs dans chaque industrie et en ayant une cartographie avec une portée mondiale ;
- les préoccupations liées aux activités minières et au processus de transformation des métaux par l'identification du processus de transformation des métaux de leur état initial à leur état final, en considérant les risques associés à la criticité des matières, et en évaluant ces risques à travers l'ensemble des étapes de transformation.

7.3 Contributions de la recherche

Cette thèse apporte plusieurs contributions sur les plans théorique et managérial.

7.3.1 Contributions théoriques

En réponse à l'absence de méthodologie de gestion des risques de la chaîne d'approvisionnement (SCRM) spécifique au contexte industriel, cette recherche pallie ce manque. Elle crée des catégories de risques qui sont les risques fournisseurs (internes, externes et relationnels), les risques liés à la structure du réseau (les risques logistiques et réglementaires) et les risques liés à la ressource (temps d'épuisement, dépendance au sous-produit, dépendance à la production primaire, l'augmentation de la demande) et le risque de concentration. Également, elle propose une méthodologie adaptée aux industries qui dépendent des métaux.

Cette recherche établit un pont entre le domaine de la criticité des matières et celui du SCRM. Elle considère la criticité des matières comme un élément enrichissant en termes de facteurs de risque et de bases de données pour estimer et évaluer les risques. Elle prend également en compte la dimension de vulnérabilité de l'évaluation de la criticité des matières pour hiérarchiser efficacement les réseaux à prioriser dans la gestion des risques liés à l'approvisionnement en métaux. Ce travail enrichit les stratégies de réduction des risques par deux approches : la substitution et l'économie circulaire.

7.3.2 Contribution managériale

Cette thèse propose un ensemble de contributions pratiques pour la gestion des risques d'approvisionnement en métaux pour les entreprises et les praticiens.

- Elle introduit une méthodologie complète de gestion des risques qui tient compte des recommandations existantes et des défis spécifiques à cette industrie.
- Elle propose un outil de cartographie de réseau s'appuyant sur des données secondaires pour restaurer la visibilité en cas de manque d'information.
- Ce cadre méthodologique propose une approche d'analyse verticale, horizontale et liée aux ressources afin d'exploiter les résultats d'estimations et d'évaluation des risques et guider les choix des stratégies de réduction des risques. Notamment l'identification des chemins critiques et leur classification.
- Au-delà de l'aspect technique, la méthodologie encourage une vision globale de la gestion des risques pour assurer la continuité et la fiabilité des opérations d'approvisionnement au niveau de l'entreprise.

Ce faisant, cette thèse fournit un cadre robuste et intégré pour la gestion proactive des risques dans les chaînes d'approvisionnement en métaux.

7.4 Limites de la recherche

Le premier point concerne le fait que le risque zéro n'existe pas. Ainsi, la gestion des risques dans les chaînes d'approvisionnement est complexe en raison de plusieurs facteurs. L'un d'entre eux est la multiplicité des risques qui, combinée à l'impossibilité d'identifier tous les risques existants, rend cette gestion ardue. Il est important de souligner que la gestion des risques n'est pas une science exacte. Ainsi, même en utilisant les méthodologies les plus robustes, une certaine part d'incertitude demeurera toujours.

Le deuxième point concerne la nature dynamique des réseaux d'approvisionnement. Par conséquent, la cartographie du réseau, bien que nécessitant des ressources considérables pour son élaboration, peut rapidement devenir obsolète.

Le troisième point concerne la qualité et les sources des données. Ainsi, dans la gestion des risques, les entreprises doivent choisir entre se fier d'un côté aux informations disponibles en interne, considérées comme fiables, car elles sont des données primaires et prendre le risque de manquer des éléments qui pourraient émerger ailleurs dans la chaîne. D'un autre côté choisir une alternative qui explore des sources de données secondaires pour compléter la vision globale, en prenant soin de trianguler ces données pour vérifier leur fiabilité. Cette recherche opte pour la deuxième approche afin d'accroître la visibilité et de capturer un ensemble plus large de risques.

Le dernier point concerne l'influence des facteurs externes aux entreprises, notamment les avancements technologiques et les politiques gouvernementales. De plus, elles sont soumises à des facteurs géopolitiques, environnementaux et technologiques qui échappent à leur contrôle. Ces éléments peuvent limiter l'efficacité des stratégies de gestion des risques, quelle que soit la méthodologie utilisée pour identifier et atténuer ces risques.

7.5 Orientation pour les futures recherches

Une première piste de recherche future pourrait consister à évaluer l'efficacité de la méthodologie proposée dans différents secteurs industriels tels que l'industrie pharmaceutique et l'industrie agroalimentaire. Cela implique de prendre en compte les défis spécifiques liés aux matières premières nécessaires à chaque industrie.

Une deuxième piste de recherche consisterait à comprendre les relations complexes entre les différents risques du réseau d'approvisionnement, la manifestation d'un risque peut déclencher ou amplifier un autre risque. Comprendre ces relations interdépendantes pourrait ouvrir la voie à de nouvelles études visant à affiner l'estimation et l'évaluation des risques.

La troisième piste de recherche concerne les mécanismes mis en place par les gouvernements pour sécuriser l'approvisionnement en matières premières, en particulier pour les industries qu'ils considèrent comme stratégiques et leurs implications importantes pour la gestion des risques dans les réseaux d'approvisionnement des entreprises.

La quatrième voie de recherche possible concerne les bases de données sur des données historiques, afin d'établir des probabilités objectives permettant ainsi une meilleure estimation des risques. Ceci permettrait de pallier les problèmes de qualité et de disponibilité des données.

Références

- A.Abbas, F., Noori, E., Abbas, D., 2023. Electronic Components.
- Achzet, B., Helbig, C., 2013. How to evaluate raw material supply risks—an overview. *Resources Policy* 38, 435–447. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.06.003>
- Adewuyi, A.O., Babatunde, M.A., Bankole, A.S., 2014. A global value chain analysis of cocoa and Garment in Nigeria. *Journal of Sustainable Development in Africa* 16, 1–20.
- Ag, W.C., 2023. Wacker_Chemie_AG_-CDP_Climate_Change_Questionnaire_2023.
- Ageron, B., Spalanzani, A., 2010. Value Creation and Supplier Selection: an Empirical Analysis, in: Wang, L., Koh, S.C.L. (Eds.), *Enterprise Networks and Logistics for Agile Manufacturing*. Springer, London, pp. 137–153. https://doi.org/10.1007/978-1-84996-244-5_7
- Agnusdei, G., Gnoni, M., Tornese, F., 2019. Modelling and simulation tools for integrating forward and reverse logistics: a literature review. <https://doi.org/10.46354/i3m.2019.emss.045>
- Akcil, A., Agcasulu, I., Swain, B., 2019. Valorization of waste LCD and recovery of critical raw material for circular economy: A review. *Resources, Conservation and Recycling* 149, 622–637. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.031>
- Alitosa, F., Kusumah, L.H., 2019. The Main Critical Risk in the Supply Chain of Component Automotive Industry: A Case Study. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 598, 012081. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/598/1/012081>
- Alonso, E., Gregory, J., Field, F., Kirchain, R., 2007. Material Availability and the Supply Chain: Risks, Effects, and Responses. *Environ. Sci. Technol.* 41, 6649–6656. <https://doi.org/10.1021/es070159c>
- Alperowicz, N., 2016. Tokuyama sells Malaysia polysilicon business to competitor OCI. *Borderless*. URL <https://www.borderless.net/news/chemical-value-chain/tokuyama-sells-malaysia-polysilicon-business-to-competitor-oci/> (accessed 8.23.23).
- Althaf, S., Babbitt, C.W., 2021a. Disruption risks to material supply chains in the electronics sector. *Resources, Conservation and Recycling* 167, 105248. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105248>
- Althaf, S., Babbitt, C.W., 2021b. Disruption risks to material supply chains in the electronics sector. *Resources, Conservation and Recycling* 167, 105248. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105248>
- Andersson, P., 2020. Chinese assessments of “critical” and “strategic” raw materials: Concepts, categories, policies, and implications. *The Extractive Industries and Society* 7, 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.01.008>
- Araya, N., Kraslawski, A., Cisternas, L.A., 2020. Towards mine tailings valorization: Recovery of critical materials from Chilean mine tailings. *Journal of Cleaner Production* 263, 121555. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121555>
- Archie Lockamy III, 2017. An examination of external risk factors in Apple Inc.’s supply chain. *Supply Chain Forum: An International Journal* 18, 177–188. <https://doi.org/10.1080/16258312.2017.1328252>
- Arendt, R., Muhl, M., Bach, V., Finkbeiner, M., 2020. Criticality assessment of abiotic resource use for Europe— application of the SCARCE method. *Resources Policy* 67, 101650. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101650>
- Arowosola, A., Gaustad, G., 2019. Estimating increasing diversity and dissipative loss of critical metals in the aluminum automotive sector. *Resources, Conservation and Recycling* 150, 104382. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.016>

- Auerbach, R., Bokelmann, K., Stauber, R., Gutfleisch, O., Schnell, S., Ratering, S., 2019. Critical raw materials – Advanced recycling technologies and processes: Recycling of rare earth metals out of end of life magnets by bioleaching with various bacteria as an example of an intelligent recycling strategy. *Minerals Engineering* 134, 104–117. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.12.022>
- Aven, T., 2012. The risk concept—historical and recent development trends. *Reliability Engineering & System Safety* 99, 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.res.2011.11.006>
- Avenier, M.-J., 2011. Les paradigmes épistémologiques constructivistes : post-modernisme ou pragmatisme ? *Management & Avenir* 43, 372–391. <https://doi.org/10.3917/mav.043.0372>
- Avenier, M.-J., Gavard-Perret, M.-L., 2012. Inscrire son projet de recherche dans un cadre épistémologique.
- Ayres, R.U., Peiró, L.T., 2013. Material efficiency: rare and critical metals. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 371, 20110563. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0563>
- Bach, V., Finogenova, N., Berger, M., Winter, L., Finkbeiner, M., 2017. Enhancing the assessment of critical resource use at the country level with the SCARCE method – Case study of Germany. *Resources Policy* 53, 283–299. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.07.003>
- Bak, O., 2018. Supply chain risk management research agenda: From a literature review to a call for future research directions. *Business Process Mgmt Journal* 24, 567–588. <https://doi.org/10.1108/BPMJ-02-2017-0021>
- Ballard, G.M., 1992. Industrial risk: safety by design, in: *Risk: Analysis, Assessment and Management*. Chichester, p. Pp 95-104.
- Ballinger, B., Stringer, M., Schmeda-Lopez, D.R., Kefford, B., Parkinson, B., Greig, C., Smart, S., 2019. The vulnerability of electric vehicle deployment to critical mineral supply. *Applied Energy* 255, 113844. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113844>
- Barrett, E., 2020. China will spend \$300 billion on semiconductor imports as U.S. squeezes chip supply [WWW Document]. *Fortune*. URL <https://fortune.com/2020/08/27/china-semiconductor-chip-imports-us-ban-huawei/> (accessed 8.21.23).
- Barroso, A., Machado, V.H., Cruz-Machado, V., 2011. Supply Chain Resilience Using the Mapping Approach. <https://doi.org/10.5772/15006>
- Barteková, E., Kemp, R., 2016. National strategies for securing a stable supply of rare earths in different world regions. *Resources Policy* 49, 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.05.003>
- Barthélemy, B., Courrèges, P., 2011. *Gestion des risques: méthode d'optimisation globale*. Editions Eyrolles.
- Basole, R.C., Bellamy, M.A., 2014a. Supply Network Structure, Visibility, and Risk Diffusion: A Computational Approach. *Decision Sciences* 45, 753–789. <https://doi.org/10.1111/dec.12099>
- Basole, R.C., Bellamy, M.A., 2014b. Visual analysis of supply network risks: Insights from the electronics industry. *Decision Support Systems* 67, 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2014.08.008>
- Basole, R.C., Bellamy, M.A., Park, H., Putrevu, J., 2016. Computational Analysis and Visualization of Global Supply Network Risks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 12, 1206–1213. <https://doi.org/10.1109/TII.2016.2549268>
- BE Hilft, D., 2022. *The WorldRiskIndex 2022*. Bündnis Entwicklung Hilft, Institute for International Law of Peace and Armed Conflict (IFHV).
- Beck, U., Lash, S., Wynne, B., 1992. *Risk Society: Towards a New Modernity*. SAGE Publications.

- Bedder, J.C.M., 2015. Classifying critical materials: a review of European approaches. *Applied Earth Science* 124, 207–212. <https://doi.org/10.1179/1743275815Y.0000000011>
- Bellamy, M.A., Basole, R.C., 2013. Network analysis of supply chain systems: A systematic review and future research. *Systems Engineering* 16, 235–249. <https://doi.org/10.1002/sys.21238>
- Bensaada, I., Taghezout, N., 2019. An enterprise risk management system for SMEs: innovative design paradigm and risk representation model. *Small Enterprise Research* 26, 179–206. <https://doi.org/10.1080/13215906.2019.1624190>
- Bernard, F., Salviac, É., 2009. *Fonction achats: contrôle interne et gestion des risques*. Maxima Laurent du Mesnil.
- Bernreuter, J., 2020a. Polysilicon Uses: Semiconductor & Solar | Bernreuter Research [WWW Document]. URL <https://www.bernreuter.com/polysilicon/uses/> (accessed 8.22.23).
- Bernreuter, J., 2020b. Wacker starts short-time work at its German polysilicon plants [WWW Document]. URL <https://www.bernreuter.com/newsroom/polysilicon-news/article/wacker-starts-short-time-work-at-its-german-polysilicon-plants/> (accessed 8.23.23).
- Bernreuter, J., 2018. GCL subsidiary: Polysilicon for semiconductors reaches volume [WWW Document]. URL <https://www.bernreuter.com/newsroom/polysilicon-news/article/gcl-subsi-dary-polysilicon-for-semiconductors-reaches-volume/> (accessed 1.31.23).
- Bertrand, G., Cassard, D., Arvanitidis, N., Stanley, G., 2016. Map of Critical Raw Material Deposits in Europe. *Energy Procedia, European Geosciences Union General Assembly 2016, EGU Division Energy, Resources & the Environment (ERE)* 97, 44–50. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.016>
- Beylot, A., Villeneuve, J., 2015. Assessing the national economic importance of metals: An Input–Output approach to the case of copper in France. *Resources Policy* 44, 161–165. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.02.007>
- Blackhurst, J.V., Scheibe, K.P., Johnson, D.J., 2008. Supplier risk assessment and monitoring for the automotive industry. *Int Jnl Phys Dist & Log Manage* 38, 143–165. <https://doi.org/10.1108/09600030810861215>
- Blengini, G.A., Latunussa, C.E.L., Eynard, U., De Matos, C.T., Wittmer, D., Georgitzikis, K., Pavel, C., Carrara, S., Mancini, L., Unguru, M., 2020a. Study on the EU’s list of critical raw materials (2020) final report. Publications Office of the European Union: Luxembourg.
- Blengini, G.A., Latunussa, C.E.L., Eynard, U., De Matos, C.T., Wittmer, D., Georgitzikis, K., Pavel, C., Carrara, S., Mancini, L., Unguru, M., 2020b. Study on the EU’s list of critical raw materials (2020) final report. Publications Office of the European Union: Luxembourg.
- Blengini, G.A., Nuss, P., Dewulf, J., Nita, V., Peirò, L.T., Vidal-Legaz, B., Latunussa, C., Mancini, L., Blagoeva, D., Pennington, D., Pellegrini, M., Van Maercke, A., Solar, S., Grohol, M., Ciupagea, C., 2017. EU methodology for critical raw materials assessment: Policy needs and proposed solutions for incremental improvements. *Resources Policy* 53, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.05.008>
- Blos, M.F., Quaddus, M., Wee, H.M., Watanabe, K., 2009. Supply chain risk management (SCRM): a case study on the automotive and electronic industries in Brazil. *Supply Chain Management: An International Journal* 14, 247–252. <https://doi.org/10.1108/13598540910970072>
- Borade, A.B., Bansod, S.V., 2007. “Domain Of Supply Chain Management - A State Of Art”. *Journal of Technology Management & Innovation* 2, 109–121.
- Bortnikov, N.S., Volkov, A.V., Galyamov, A.L., Vikent’ev, I.V., Aristov, V.V., Lalomov, A.V., Murashov, K.Yu., 2016. Mineral resources of high-tech metals in Russia: State of

- the art and outlook. *Geol. Ore Deposits* 58, 83–103. <https://doi.org/10.1134/S1075701516020021>
- Botterill, L., Mazur, N., 2004. Risk and risk perception: A literature review. Kingstrom, ACT: Australian Government Rural Industries Research and Development Corporation.
- Boubault, A., 2021. Chaîne de transformation du silicium métal, recyclage et montée de la Chine sur le marché du polysilicium en 2019 | MineralInfo [WWW Document]. Minéralinfo. URL <https://www.mineralinfo.fr/fr/ecomine/chaine-de-transformation-du-silicium-metal-recyclage-montee-de-chine-sur-marche-du> (accessed 8.20.23).
- Boubault, A., 2020. Le silicium : un élément chimique très abondant, un affinage stratégique | MineralInfo [WWW Document]. URL <https://www.mineralinfo.fr/fr/ecomine/silicium-un-element-chimique-tres-abondant-un-affinage-strategique> (accessed 1.31.23).
- Bouchet, M.-H., 2007. Intelligence économique et gestion des risques. Pearson Education France.
- Boudia, S., 2019. Quand une crise en cache une autre : la « crise des terres rares » entre géopolitique, finance et dégâts environnementaux. *Critique internationale* 85, 85–103. <https://doi.org/10.3917/cii.085.0085>
- Bouhaddou, I., 2015. Vers une optimisation de la chaîne logistique : proposition de modèles conceptuels basés sur le PLM (Product Lifecycle Management) (phdthesis). Université du Havre ; Université Moulay Ismaïl (Meknès, Maroc).
- Bourg, S., 2018. SCRREEN: Solutions for Critical Raw Materials—A European Expert Network, in: Davis, B.R., Moats, M.S., Wang, S., Gregurek, D., Kapusta, J., Battle, T.P., Schlesinger, M.E., Alvear Flores, G.R., Jak, E., Goodall, G., Free, M.L., Asselin, E., Chagnes, A., Dreisinger, D., Jeffrey, M., Lee, J., Miller, G., Petersen, J., Ciminelli, V.S.T., Xu, Q., Molnar, R., Adams, J., Liu, W., Verbaan, N., Goode, J., London, I.M., Azimi, G., Forstner, A., Kappes, R., Bhambhani, T. (Eds.), *Extraction 2018, Série de, Minéraux, Métaux et Matériaux*. Springer International Publishing, pp. 2367–2379.
- Brandao, M.S., Godinho-Filho, M., 2022. Is a multiple supply chain management perspective a new way to manage global supply chains toward sustainability? *Journal of Cleaner Production* 375, 134046. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134046>
- BRGM, 2019. Fiche de criticité - Silicium métal.
- Bridge Salon, 2020. Bridge Report - Tokuyama (No. 4043).
- Brindley, C., 2017. *Supply Chain Risk*. Taylor & Francis.
- Brown, C.S., 2018. in the matter of silicon metal from Australia, brazil, kazakhstan, and norway (Testimony). U.S International trade commission washington, DC.
- Brown, T., 2018. Measurement of mineral supply diversity and its importance in assessing risk and criticality. *Resources Policy, Special Issue on Mining Value Chains, Innovation and Learning* 58, 202–218. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.05.007>
- Brunt, D., 2000. From Current State to Future State: Mapping the Steel to Component Supply Chain. *International Journal of Logistics Research and Applications* 3, 259–271. <https://doi.org/10.1080/713682765>
- Buchert, M., Manhart, A., Bleher, D., Pingel, D., 2012. Recycling critical raw materials from waste electronic equipment. *Freiburg: Öko-Institut eV* 49, 30–40.
- Buchert, M., Schüler, D., Bleher, D., 2009. Critical metals for sustainable technologies and their recycling potential. UNEP report, March.
- Buechler, D.T., Zyaykina, N.N., Spencer, C.A., Lawson, E., Ploss, N.M., Hua, I., 2020. Comprehensive elemental analysis of consumer electronic devices: Rare earth, precious, and critical elements. *Waste Management* 103, 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.014>

- Busch, J., Steinberger, J.K., Dawson, D.A., Purnell, P., Roelich, K., 2014. Managing Critical Materials with a Technology-Specific Stocks and Flows Model. *Environ. Sci. Technol.* 48, 1298–1305. <https://doi.org/10.1021/es404877u>
- Bustamante, M.L., Gaustad, G., 2015. Price volatility in PV-critical material markets: Perspectives for solar firms, consumers, and policy makers, in: 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). Presented at the 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2015.7356392>
- Bustamante, M.L., Gaustad, G., Alonso, E., 2018. Comparative Analysis of Supply Risk-Mitigation Strategies for Critical Byproduct Minerals: A Case Study of Tellurium. *Environ. Sci. Technol.* 52, 11–21. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03963>
- Bustamante, M.L., Gaustad, G., Goe, M., 2014. Criticality Research in the Materials Community. *JOM* 66, 2340–2342. <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1187-5>
- Cagliano, R., Caniato, F., Golini, R., Kalchschmidt, M., Spina, G., 2008. Supply chain configurations in a global environment: a longitudinal perspective. *Operations Management Research* 1, 86–94.
- Calvo, G., Valero, Alicia, Valero, Antonio, 2018. Thermodynamic Approach to Evaluate the Criticality of Raw Materials and Its Application through a Material Flow Analysis in Europe. *Journal of Industrial Ecology* 22, 839–852. <https://doi.org/10.1111/jiec.12624>
- CARSA, Decision SARL, Directorate-General for Communications Networks, C. and T. (European C., Coulon, O., Olliver, J.K., Dubois, G., Saint-Martin, L., Vodovar, M., 2020. Study on the electronics ecosystem: overview, developments and Europe's position in the world : final report. Publications Office of the European Union, LU.
- Carter, C.R., Rogers, D.S., Choi, T.Y., 2015. Toward the Theory of the Supply Chain. *Journal of Supply Chain Management* 51, 89–97. <https://doi.org/10.1111/jscm.12073>
- Cattaneo, O., Gereffi, G., Staritz, C., 2010. Global value chains in a postcrisis world: a development perspective. World Bank Publications.
- CEA, 2011. La fabrication d'une puce électronique. CEA.
- Cenci, M.P., Dal Berto, F.C., Camargo, P.S.S., Veit, H.M., 2021. Separation and concentration of valuable and critical materials from wasted LEDs by physical processes. *Waste Management* 120, 136–145. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.023>
- Ceryno, P.S., Scavarda, L.F., Klingebiel, K., 2015. Supply chain risk: empirical research in the automotive industry. *Journal of Risk Research* 18, 1145–1164. <https://doi.org/10.1080/13669877.2014.913662>
- Chalamala, B., 2018. Manufacturing of Silicon Materials for Microelectronics and PV. (No. SAND2018-1390PE). Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States).
- Chalmin, P., Jegourel, Y., 2019. Cyclope 2019: les marchés mondiaux: les illusions perdues.
- Chancerel, P., Marwede, M., Nissen, N.F., Lang, K.-D., 2015. Estimating the quantities of critical metals embedded in ICT and consumer equipment. *Resources, Conservation and Recycling* 98, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.03.003>
- Chancerel, P., Rotter, V.S., Ueberschaar, M., Marwede, M., Nissen, N.F., Lang, K.-D., 2013. Data availability and the need for research to localize, quantify and recycle critical metals in information technology, telecommunication and consumer equipment. *Waste Manage. Res.* 31, 3–16. <https://doi.org/10.1177/0734242X13499814>
- Charboneau, T., 2020. What the CHIPS for America Act Could Mean for the U.S. Semiconductor Industry [WWW Document]. All about circuit. URL <https://www.allaboutcircuits.com/news/what-the-chips-act-for-america-could-mean-for-us-semiconductor-industry/> (accessed 8.21.23).

- Charles, R.G., Douglas, P., Dowling, M., Liversage, G., Davies, M.L., 2020. Towards Increased Recovery of Critical Raw Materials from WEEE— evaluation of CRMs at a component level and pre-processing methods for interface optimisation with recovery processes. *Resources, Conservation and Recycling* 161, 104923. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104923>
- Chen, P.-S., Wu, M.-T., 2013. A modified failure mode and effects analysis method for supplier selection problems in the supply chain risk environment: A case study. *Computers & Industrial Engineering* 66, 634–642. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.09.018>
- Cheng, C.-Y., Chen, T.-L., Chen, Y.-Y., 2014. An analysis of the structural complexity of supply chain networks. *Applied Mathematical Modelling* 38, 2328–2344. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.10.016>
- Cho, D.W., Lee, Y.H., Ahn, S.H., Hwang, M.K., 2012. A framework for measuring the performance of service supply chain management. *Computers & Industrial Engineering, Soft Computing for Management Systems* 62, 801–818. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.11.014>
- Choi, C.H., Cao, J., Zhao, F., 2016. System Dynamics Modeling of Indium Material Flows under Wide Deployment of Clean Energy Technologies. *Resources, Conservation and Recycling* 114, 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.04.012>
- Choi, T.Y., Hong, Y., 2002. Unveiling the structure of supply networks: case studies in Honda, Acura, and DaimlerChrysler. *Journal of Operations Management* 20, 469–493.
- Choi, T.Y., Rogers, D., Vakil, B., 2020. Coronavirus Is a Wake-Up Call for Supply Chain Management. *Harvard Business Review*.
- Chopra, S., Meindl, P., Kalra, D.V., 2007. *Supply Chain Management* by Pearson. Pearson Education India.
- Chopra, S., Sodhi, M.S., 2004. Managing Risk to Avoid Supply-Chain Breakdown [WWW Document]. MIT Sloan Management Review. URL <https://sloanreview.mit.edu/article/managing-risk-to-avoid-supplychain-breakdown/> (accessed 2.4.20).
- Christopher, M., Lee, H., 2004. Mitigating supply chain risk through improved confidence. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 34, 388–396. <https://doi.org/10.1108/09600030410545436>
- Christopher, M., Peck, H., 2004. Building the Resilient Supply Chain. *The International Journal of Logistics Management* 15, 1–14. <https://doi.org/10.1108/09574090410700275>
- Ciacci, L., Nuss, P., Reck, B.K., Werner, T.T., Graedel, T.E., 2016. Metal Criticality Determination for Australia, the US, and the Planet—Comparing 2008 and 2012 Results. *Resources* 5, 29. <https://doi.org/10.3390/resources5040029>
- Colicchia, C., Strozzi, F., 2012. Supply chain risk management: A new methodology for a systematic literature review. *Supply Chain Management: An International Journal* 17, 403–418. <https://doi.org/10.1108/13598541211246558>
- Commerce, U.S.D. of, Office, U.S.W.H., Energy, U.S.D. of, Defense, U.S.D. of, Services, U.S.D. of H. and H., 2021. *Building Resilient Supply Chains, Revitalizing American Manufacturing, and Fostering Broad-based Growth: 100-day Reviews Under Executive Order 14017*. White House.
- Commission, E.-E., 2022. Consultation européenne sur la chaîne de valeur des semi-conducteurs | Bâtir l'avenir numérique de l'Europe [WWW Document]. URL <https://digital-strategy.ec.europa.eu/fr/consultations/european-semiconductor-value-chain-consultation> (accessed 8.21.23).
- Commission, E.-E., 2010. *Critical raw materials for the EU. Report of the ad-hoc working group on defining critical raw materials*. Brussels.

- Cooper, C., Booth, A., Varley-Campbell, J., Britten, N., Garside, R., 2018. Defining the process to literature searching in systematic reviews: a literature review of guidance and supporting studies. *BMC Med Res Methodol* 18, 85. <https://doi.org/10.1186/s12874-018-0545-3>
- Council, N.R., 1991. Plasma processing of materials: scientific opportunities and technological challenges.
- Crédit Suisse, 2016. Mitsubishi Materials (5711/5711 JP) [WWW Document]. URL <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:FQMwofWztwoJ:https://plus.credit-suisse.com/u/XyFJfd&cd=8&hl=fr&ct=clnk&gl=fr> (accessed 8.27.23).
- CSIMarket, 2023. Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Limited's (TSM) Suppliers by Company, Division and Industry - CSIMarket [WWW Document]. URL https://csimarket.com/stocks/suppliers_glance.php?code=TSM (accessed 8.22.23).
- Daw, G., 2017. Security of mineral resources: A new framework for quantitative assessment of criticality. *Resources Policy* 53, 173–189. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.06.013>
- De Backer, K., Miroudot, S., 2014. Mapping global value chains.
- de Farias, I.V., dos Santos Alvim, S.L., de Simas, D., Frazzon, E.M., 2022. Visibility model for enhancing supply chains resilience. *IFAC-PapersOnLine, 10th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2022* 55, 2521–2525. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.088>
- De Marchi, V., Di Maria, E., 2019. Environmental Upgrading and Suppliers' Agency in the Leather Global Value Chain. *Sustainability* 11, 6530. <https://doi.org/10.3390/su11236530>
- De Oliveira, U.R., Espindola, L.S., Marins, F., 2017. Analysis of supply chain risk management researches. <https://doi.org/10.1590/0104-530x3515-16>
- de Oliveira, U.R., Marins, F.A.S., Rocha, H.M., Salomon, V.A.P., 2017. The ISO 31000 standard in supply chain risk management. *Journal of Cleaner Production* 151, 616–633. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.054>
- Defense (DoD), D. of, 2004. Defense Acquisition Guidebook Ch. 4.2. 6. “System of Systems Engineering,.” Pentagon Washington, DC.
- Delautre, G., 2017. The distribution of value added among firms and countries the case of the ICT manufacturing sector. International Labour Organization.
- Deliverable, R.-S., 2021. State of play and roadmap concepts: Electronics Sector.
- Demirel, G., MacCarthy, B.L., Ritterskamp, D., Champneys, A.R., Gross, T., 2019. Identifying dynamical instabilities in supply networks using generalized modeling. *Journal of Operations Management* 65, 136–159.
- Dewulf, J., Blengini, G.A., Pennington, D., Nuss, P., Nassar, N.T., 2016. Criticality on the international scene: Quo vadis? *Resources Policy* 50, 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.09.008>
- DG Trésor, 2023. Sanctions économiques internationales | Direction générale du Trésor [WWW Document]. URL <https://www.tresor.economie.gouv.fr/services-aux-entreprises/sanctions-economiques> (accessed 8.28.23).
- Diemer, A., Nedelciu, E., Schellens, M., Gisladottir, J., 2018. Challenges for Sustainability in Critical Raw Material Assessments. *International Journal of Management and Sustainability* 7, 156–179. <https://doi.org/10.18488/journal.11.2018.73.156.179>
- Dixit, M.N.K., Agarwal, A., Purohit, M., 2017. Silicon Wafer Technologies: Past & Future. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)* 5, 10.
- Douglas, M., 1992. Risk and Blame: Essays in Cultural Theory 336.
- Douglas, M., 1990. Risk as a Forensic Resource. *Daedalus* 119, 1–16.

- D.P, P., C.A, B., P.V, K., T, de R., 2017. Product policy and material scarcity challenges: the essential role of government in the past and lessons for today. *Research in Design Series* 347–352. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-820-4-347>
- Duclos, S.J., Otto, J.P., Konitzer, D.G., 2010. Design in an era of Constrained Resources. *Mechanical Engineering* 132, 36–40. <https://doi.org/10.1115/1.2010-Sep-3>
- Eggert, R., 2017. Materials, critical materials and clean-energy technologies. *EPJ Web Conf.* 148, 00003. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714800003>
- Eheliyagoda, D., Zeng, X., Li, J., 2020. A method to assess national metal criticality: the environment as a foremost measurement. *Humanit Soc Sci Commun* 7, 1–12. <https://doi.org/10.1057/s41599-020-00537-4>
- Ekanayake, E.M.A.C., Shen, G.Q.P., Kumaraswamy, M.M., 2021. Identifying supply chain capabilities of construction firms in industrialized construction. *Production Planning & Control* 32, 303–321. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1732494>
- Ekwere, N., 2016. Framework of effective risk management in small and medium enterprises (SMESs): a literature review. *Bina Ekonomi* 20, 23–46.
- El Falaki, A., Khaldouni, O., Youlyouz-Marfak, I., Marfak, A., Zerrouk, L., Ait Ahmed, Y., Saad, E., 2021. « L’approche systémique appliquée à la gestion des risques des technologies biomédicales en exploitation ». *IRBM News* 42, 100354. <https://doi.org/10.1016/j.irbmw.2021.100354>
- Elkem, 2023. Our Worldwide Presence | About Elkem [WWW Document]. Elkem.com. URL <https://www.elkem.com/about-elkem/worldwide-presence/> (accessed 8.25.23).
- Elkem, 2019. Annual report 2019. Elkem ASA, Oslo, Norway.
- Elshkaki, A., 2020. Long-term analysis of critical materials in future vehicles electrification in China and their national and global implications. *Energy* 202, 117697. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117697>
- EPRS, A., 2016. Worldwide governance indicators – political stability 2014 (percentile range) [WWW Document]. Epthinktank. URL <https://epthinktank.eu/2016/05/23/migration-and-the-eu-a-long-term-perspective/worldwide-governance-indicators-political-stability-2014-percentile-range/> (accessed 8.28.23).
- EqualOcean, 2020. Huanghe hydropower polysilicon production capacity expanded to 3300 tons / year [WWW Document]. EqualOcean. URL <https://equalocean.com/briefing/20201211230011895> (accessed 8.23.23).
- Eranna, G., 2014. *Crystal Growth and Evaluation of Silicon for VLSI and ULSI*, 0 ed. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17812>
- Erdmann, L., Behrendt, S., Feil, M., 2011. *Kritische Rohstoffe für Deutschland*. KfW Bankengruppe, Berlin.
- Erdmann, L., Graedel, T.E., 2011. Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses. *Environ. Sci. Technol.* 45, 7620–7630. <https://doi.org/10.1021/es200563g>
- European Commission, 2023. Overview of sanctions and related resources [WWW Document]. URL https://finance.ec.europa.eu/eu-and-world/sanctions-restrictive-measures/overview-sanctions-and-related-resources_en (accessed 8.28.23).
- European Commission, 2022. RMIS - Raw Materials Information System [WWW Document]. URL <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/rmp/Silicon%20metal> (accessed 8.25.23).
- European Commission, 2020. Speech by Commissioner Thierry Breton at Hannover Messe [WWW Document]. European Commission - European Commission. URL https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/SPEECH_20_1362 (accessed 8.21.23).

- Fabbe-Costes, N., Lechaptois, L., Spring, M., 2020. “The map is not the territory”: a boundary objects perspective on supply chain mapping. *International Journal of Operations & Production Management* 40, 1475–1497. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-12-2019-0828>
- Fan, Y., Stevenson, M., 2018. A review of supply chain risk management: definition, theory, and research agenda. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 48, 205–230. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-01-2017-0043>
- Feenstra, R.C., 1998. Integration of trade and disintegration of production in the global economy. *Journal of Economic Perspectives* 12, 31–50.
- Féniès, P., 2006. Une méthodologie de modélisation par processus multiples et incrémentiels : application pour l'évaluation des performances de la Supply Chain (phdthesis). Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
- Ferdows, K., 1997. Making the most of foreign factories.
- Fernandez-Stark, K., Bamber, P., Gereffi, G., Ahmed, G., Heil, S.J., Root, C., 2011. The fruit and vegetables global value chain: Economic upgrading and workforce development. Center on Globalization, Governance & Competitiveness (CGGC), Duke University, North Carolina, USA.
- Ferro, P., Bonollo, F., 2019a. Materials selection in a critical raw materials perspective. *Materials & Design* 177, 107848. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107848>
- Ferro, P., Bonollo, F., 2019b. Design for Recycling in a Critical Raw Materials Perspective. *Recycling* 4, 44. <https://doi.org/10.3390/recycling4040044>
- Ferroglobe, 2023. Industrial Footprint | Ferroglobe PLC [WWW Document]. URL <https://www.ferroglobe.com/about-ferroglobe/industrial-footprint> (accessed 8.25.23).
- Ferroglobe, 2022a. Ferroglobe and REC Silicon Announce MOU to Develop an Integrated Solar Supply Chain in the United States | Ferroglobe PLC [WWW Document]. URL <https://www.ferroglobe.com/news-releases/news-release-details/ferroglobe-and-rec-silicon-announce-mou-develop-integrated-solar> (accessed 8.26.23).
- Ferroglobe, 2022b. Investor day.
- Ferroglobe, 2021. Ferroglobe PLC : Annual Report and Accounts 2021 [WWW Document]. URL <https://investor.ferroglobe.com/static-files/9f3c73f6-d8b5-4ecc-a99f-1d87d974a696> (accessed 9.2.23).
- Ferroglobe, 2019. ANNUAL REPORT PURSUANT TO SECTION 13 OR 15(d) OF THE SECURITIES EXCHANGE ACT OF 1934- FERROGLOBE.
- Fiala, P., 2005. Information sharing in supply chains. *Omega, OR and its Applications* 33, 419–423. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2004.07.006>
- Fisher, G., Seacrist, M., Standley, R., 2012. Silicon Crystal Growth and Wafer Technologies. *Proceedings of the IEEE* 100, 1454–1474. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2189786>
- Fizaine, F., Galiègue, X., 2021. L'économie des ressources minérales et le défi de la soutenabilité 1: Contexte et enjeux. ISTE Group.
- Forme-Chretien, F.-A.G.L., 2007. Référentiel d'évaluation de la performance d'une chaîne logistique : application à une entreprise de l'ameublement.
- Franck, C., 2007. Framework for Supply Chain Risk Management. *Supply Chain Forum: An International Journal* 8, 2–13. <https://doi.org/10.1080/16258312.2007.11517178>
- Franssila, S., 2010. Introduction to Microfabrication. John Wiley & Sons.
- Frederick, S., 2014. Combining the Global Value Chain and global IO approaches, in: A Paper Presented at the International Conference on the Measurement of International Trade and Economic Globalisation, Aguascalientes, Mexico.
- Frederick, S., Bamber, P., Brun, L., Cho, J., Gereffi, G., Lee, J., 2017. Korea in global value chains: pathways for industrial transformation.

- Frederick, S., Gereffi, G., 2013. Costa Rica in the electronics global value chain. Durham: CGGC.
- Frenzel, M., Kullik, J., Reuter, M.A., Gutzmer, J., 2017. Raw material 'criticality'—sense or nonsense? *J. Phys. D: Appl. Phys.* 50, 123002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa5b64>
- Frenzel, Max, Mikolajczak, C., Reuter, M.A., Gutzmer, J., 2017. Quantifying the relative availability of high-tech by-product metals – The cases of gallium, germanium and indium. *Resources Policy* 52, 327–335.
- Frost & Sullivan, 2010. Assessment of polysilicon global market and it's fabrication technology landscape.
- Fu, X., Polli, A., Olivetti, E., 2019. High-Resolution Insight into Materials Criticality: Quantifying Risk for By-Product Metals from Primary Production. *J. Ind. Ecol.* 23, 452–465. <https://doi.org/10.1111/jiec.12757>
- Fujita, M., Thisse, J.-F., 2006. Globalization and the Evolution of the Supply Chain: Who Gains and Who Loses?*. *International Economic Review* 47, 811–836. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2354.2006.00397.x>
- Gaffuri, P., Stolyarova, E., Llerena, D., Appert, E., Consonni, M., Robin, S., Consonni, V., 2021. Potential substitutes for critical materials in white LEDs: Technological challenges and market opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 143, 110869. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110869>
- Galos, K., Kot-Niewiadomska, A., Kamyk, J., 2021. The Role of Poland in the European Union Supply Chain of Raw Materials, Including Critical Raw Materials. *Materials Proceedings* 5, 14. <https://doi.org/10.3390/materproc2021005014>
- Ganeshan, R., Harrison, T.P., 1995. An Introduction to Supply Chain Management, Department of Management Sciences and Information Systems. Penn State University.
- Gardner, J.T., Cooper, M.C., 2003. Strategic Supply Chain Mapping Approaches. *Journal of Business Logistics* 24, 37–64. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2003.tb00045.x>
- Gaspars-Wieloch, H., 2019. Role of scenario planning and probabilities in economic decision problems – literature review and new conclusions. <https://doi.org/10.3846/cibmee.2019.011>
- Gaustad, G., Krystofik, M., Bustamante, M., Badami, K., 2018. Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues. *Resour. Conserv. Recycl.* 135, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.002>
- GCL Poly Energy Holding Limites, 2020. Le polysilicium de qualité électronique de GCL brise le blocus technique à l'étranger et exporte vers la Corée du Sud.
- Genin, P., 2003. Planification tactique robuste avec usage d'un APS: proposition d'un mode de gestion par plan de référence.
- George, J., Pillai, V.M., 2019. A study of factors affecting supply chain performance. *Journal of Physics: Conference Series* 1355, 012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1355/1/012018>
- Gereffi, G., Lee, J., 2012. Why the World Suddenly Cares About Global Supply Chains. *Journal of Supply Chain Management* 48, 24–32. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2012.03271.x>
- Ghadge, A., Dani, S., Chester, M., Kalawsky, R., 2013. A systems approach for modelling supply chain risks. *Supply Chain Management: An International Journal* 18, 523–538. <https://doi.org/10.1108/SCM-11-2012-0366>
- Ghadge, A., Dani, S., Kalawsky, R., 2012. Supply chain risk management: present and future scope. *The International Journal of Logistics Management* 23, 313–339. <https://doi.org/10.1108/09574091211289200>

- Ghadge, A., Dani, S., Kalawsky, R., 2010. A framework for managing risks in the aerospace supply chain using systems thinking, in: 2010 5th International Conference on System of Systems Engineering. Presented at the 2010 5th International Conference on System of Systems Engineering, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SYSESE.2010.5544082>
- Giurco, D., Mohr, S., Mudd, G., Mason, L., Prior, T., 2012. Resource Criticality and Commodity Production Projections. *Resources* 1, 23–33. <https://doi.org/10.3390/resources1010023>
- GLC, 2018. GCL: A “Model” of Sci-tech Innovation Corporate News-GCL News [WWW Document]. GLC POWER. URL <http://www.gcl-power.com/en/about/newdetail/5090.html> (accessed 8.23.23).
- GlobalWafers Co., Ltd, 2021. GLOBALFOUNDRIES and GlobalWafers Partnering to Expand Semiconductor Wafer Supply | AIOSEO GlobalWafers Co., Ltd. All rights reserved. [WWW Document]. URL <https://www.sas-globalwafers.com/en/globalfoundries-and-globalwafers-partnering-to-expand-semiconductor-wafer-supply/> (accessed 8.23.23).
- GlobalWafers Co., Ltd, 2020. GlobalWafers Enters into Business Combination Agreement with Siltronic.
- Glöser, S., Tercero Espinoza, L., Gandenberger, C., Faulstich, M., 2015. Raw material criticality in the context of classical risk assessment. *Resources Policy* 44, 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2014.12.003>
- Glöser-Chahoud, S., Tercero Espinoza, L., Walz, R., Faulstich, M., 2016. Taking the Step towards a More Dynamic View on Raw Material Criticality: An Indicator Based Analysis for Germany and Japan. *Resources* 5, 45. <https://doi.org/10.3390/resources5040045>
- Goe, M., Gaustad, G., 2014. Identifying critical materials for photovoltaics in the US: A multi-metric approach. *Applied Energy* 123, 387–396. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.025>
- Gourc, D., 2006. Vers un modèle général du risque pour le pilotage et la conduite des activités de biens et de services : Propositions pour une conduite des projets et une gestion des risques intégrées (thesis). Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT.
- Govil, M., Proth, J.-M., 2002. Supply chain design and management: strategic and tactical perspectives. Academic Press.
- Graedel, T.E., Allwood, J., Birat, J.P., Reck, B.K., Sibley, S.F., Sonnemann, G., Buchert, M., Hagelüken, C., 2011. UNEP Recycling Rates of Metals—A Status Report, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. 2011. Google Scholar 1–46.
- Graedel, T.E., Barr, R., Chandler, C., Chase, T., Choi, J., Christoffersen, L., Friedlander, E., Henly, C., Jun, C., Nassar, N.T., Schechner, D., Warren, S., Yang, M., Zhu, C., 2012. Methodology of Metal Criticality Determination. *Environ. Sci. Technol.* 46, 1063–1070. <https://doi.org/10.1021/es203534z>
- Graedel, T.E., Gunn, G., Espinoza, L.T., 2013. Metal resources, use and Criticality, in: *Critical Metals Handbook*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1002/9781118755341.ch1>
- Graedel, T.E., Harper, E.M., Nassar, N.T., Nuss, P., Reck, B.K., 2015a. Criticality of metals and metalloids. *PNAS* 112, 4257–4262. <https://doi.org/10.1073/pnas.1500415112>
- Graedel, T.E., Harper, E.M., Nassar, N.T., Reck, B.K., 2015b. On the materials basis of modern society. *PNAS* 112, 6295–6300. <https://doi.org/10.1073/pnas.1312752110>
- Graedel, T.E., Nassar, N.T., 2015. The criticality of metals: a perspective for geologists. *Geological Society, London, Special Publications* 393, 291–302. <https://doi.org/10.1144/SP393.4>

- Graedel, T.E., Nuss, P., 2014. Employing Considerations of Criticality in Product Design. *JOM* 66, 2360–2366. <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1188-4>
- Graedel, T.E., Reck, B.K., 2016. Six Years of Criticality Assessments: What Have We Learned So Far? *Journal of Industrial Ecology* 20, 692–699. <https://doi.org/10.1111/jiec.12305>
- Grandell, L., Lehtilä, A., Kivinen, M., Koljonen, T., Kihlman, S., Lauri, L.S., 2016. Role of critical metals in the future markets of clean energy technologies. *Renewable Energy* 95, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.102>
- Graubard, S.R., 1990. Preface to the Issue “Risk.” *Daedalus* 119, V–VI.
- Gretschmann, K., Schepers, S., 2016. *Revolutionising EU Innovation Policy: Pioneering the Future*. Springer.
- Griffin, G., Gaustad, G., Badami, K., 2019. A framework for firm-level critical material supply management and mitigation. *Resources Policy* 60, 262–276. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.12.008>
- Grimes, S.M., Maguire, D., 2020. Assessment of priorities in critical material recovery from Waste Electrical and Electronic Equipment. *Resources Policy* 68, 101658. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101658>
- Guillaume, R., 2011. *Gestion des risques dans les chaînes logistiques : planification sous incertitude par la théorie des possibilités* (These de doctorat). Toulouse 2.
- Gulley, A.L., 2022. One hundred years of cobalt production in the Democratic Republic of the Congo. *Resources Policy* 79, 103007. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103007>
- Gulley, A.L., McCullough, E.A., Shedd, K.B., 2019. China’s domestic and foreign influence in the global cobalt supply chain. *Resources Policy* 62, 317–323. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.03.015>
- Gunn, G., 2014. *Critical Metals Handbook*. John Wiley & Sons.
- Guo, Z., Haimes, Y.Y., 2017. Exploring Systemic Risks in Systems-of-Systems Within a Multiobjective Decision Framework. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 47, 906–915. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2016.2523918>
- Gupta, A., 2022. Ferroglobe And REC Silicon Announce MoU To Develop An Integrated Solar Supply Chain In The United States – EQ Mag Pro. *The Leading Solar Magazine In India*. URL <https://www.eqmagpro.com/ferroglobe-and-rec-silicon-announce-mou-to-develop-an-integrated-solar-supply-chain-in-the-united-states-eq-mag-pro/> (accessed 8.26.23).
- Gupta, A., 2021. Top 10 Ranking of World’s Largest Polysilicon Manufacturers. *The Leading Solar Magazine In India*. URL <https://www.eqmagpro.com/top-10-ranking-of-worlds-largest-polysilicon-manufacturers/> (accessed 8.23.23).
- Gurtu, A., Johny, J., 2021. Supply Chain Risk Management: Literature Review. *Risks* 9, 1–16.
- Ha, N.T.T., Long, N.T., Trang, T.T.T., 2022. Development of The Electronics Industry of Thai Nguyen Province, Vietnam: Achievements and Limitations. *European Journal of Development Studies* 2, 66–71. <https://doi.org/10.24018/ejdevelop.2022.2.2.87>
- Habib, K., 2019. A product classification approach to optimize circularity of critical resources – the case of NdFeB magnets. *Journal of Cleaner Production* 230, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.048>
- Habib, K., Hamelin, L., Wenzel, H., 2016. A dynamic perspective of the geopolitical supply risk of metals. *Journal of Cleaner Production* 133, 850–858. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.118>
- Hache, E., 2020. IFPEN | Copper in the energy transition: an essential, structural and geopolitical metal! [WWW Document]. IFPEN. URL <https://www.ifpenouvelles.com/article/copper-energy-transition-essential-structural-and-geopolitical-metal> (accessed 8.16.23).

- Hache, E., Seck, G.S., Simoen, M., Bonnet, C., Carcanague, S., 2019. Critical raw materials and transportation sector electrification: A detailed bottom-up analysis in world transport. *Applied Energy* 240, 6–25. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.057>
- Hadj-Hamou, K., 2002. Contribution to the design of products with large diversity and their supply chain: a constraint based approach. (phdthesis). Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT.
- Haines, Y.Y., 2018. Risk Modeling of Interdependent Complex Systems of Systems: Theory and Practice. *Risk Analysis* 38, 84–98. <https://doi.org/10.1111/risa.12804>
- Hallstedt, S., Isaksson, O., Wallin, J., Zetterlund, H., 2016. MATERIAL CRITICALITY METHOD - PRODUCT VULNERABILITY FROM A SUSTAINABLE BUSINESS PERSPECTIVE [WWW Document]. DS 84: Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference. URL <https://www.designsociety.org/publication/38832/MATERIAL+CRITICALITY+METHOD+-+PRODUCT+VULNERABILITY+FROM+A+SUSTAINABLE+BUSINESS+PERSPECTIVE> (accessed 3.28.20).
- Hallstedt, S.I., Isaksson, O., 2017. Material criticality assessment in early phases of sustainable product development. *Journal of Cleaner Production* 161, 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.085>
- Hamir, H., Sum, R.M., 2021. An Analysis of Risk Management Processes and Comparison with ISO31000:2018. *Asian Journal of Research in Business and Management* 3, 16–30.
- Hancock, L., Ralph, N., Armand, M., Macfarlane, D., Forsyth, M., 2018. In the lab: New ethical and supply chain protocols for battery and solar alternative energy laboratory research policy and practice. *Journal of Cleaner Production* 187, 485–495. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.097>
- Hanouz, M.D., Geiger, T., Doherty, S., 2014. Global enabling trade report, in: World Economic Forum.
- Hanwha, 2022. Hanwha Solutions Becomes the Largest Shareholder of “Clean Polysilicon” Manufacturer REC Silicon to Build a Green Solar Supply Chain [WWW Document]. Hanwha.com. URL https://www.hanwha.com/en/news_and_media/press_release/hanwha-solutions-becomes-the-largest-shareholder-of-clean-polysilicon-manufacturer-rec-silicon-to-build-a-green-solar-supply-chain.html (accessed 8.23.23).
- HARADA, M., n.d. Mitsubishi Materials Corporation: Sale of semiconductor polysilicon business to SUMCO Corporation Work [WWW Document]. Nishimura & Asahi. URL <https://www.nishimura.com/en/experience/work/92820> (accessed 8.27.23).
- Harland, C., Brenchley, R., Walker, H., 2003a. Risk in supply networks. *Journal of Purchasing and Supply Management, Supply Chain Management: Selected Papers from the European Operations Management Association (EurOMA) 8th International Annual Conference* 9, 51–62. [https://doi.org/10.1016/S1478-4092\(03\)00004-9](https://doi.org/10.1016/S1478-4092(03)00004-9)
- Harland, C., Brenchley, R., Walker, H., 2003b. Risk in supply networks. *Journal of Purchasing and Supply Management, Supply Chain Management: Selected Papers from the European Operations Management Association (EurOMA) 8th International Annual Conference* 9, 51–62. [https://doi.org/10.1016/S1478-4092\(03\)00004-9](https://doi.org/10.1016/S1478-4092(03)00004-9)
- Harper, E.M., Diao, Z., Panousi, S., Nuss, P., Eckelman, M.J., Graedel, T.E., 2015a. The criticality of four nuclear energy metals. *Resources, Conservation and Recycling* 95, 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.12.009>

- Harper, E.M., Kavlak, G., Burmeister, L., Eckelman, M.J., Erbis, S., Espinoza, V.S., Nuss, P., Graedel, T.E., 2015b. Criticality of the Geological Zinc, Tin, and Lead Family. *Journal of Industrial Ecology* 19, 628–644. <https://doi.org/10.1111/jiec.12213>
- Hashim, U., 2006. High Purity Polycrystalline Silicon Growth and Characterization. *Chiang Mai J. Sci.* 8.
- Hashim, U., Ehsan, A.A., Botaliev, P., Abduraimov, J., 2004. ELECTRONIC GRADE POLYSILICON PRODUCTION USING CVD SYSTEM: A PROJECT AT GAO KRISTALL PLANT IN KYRGYZSTAN. *Journal of Industrial Technology* 11.
- Hassan, M.M.D., 2006. Engineering supply chains as systems. *Systems Engineering* 9, 73–89. <https://doi.org/10.1002/sys.20042>
- Hassid, O., 2008. *La gestion des risques - 2ème édition*. Dunod.
- Hatayama, H., Tahara, K., 2018. Adopting an objective approach to criticality assessment: Learning from the past. *Resources Policy* 55, 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.11.002>
- Hatayama, H., Tahara, K., 2015. Criticality Assessment of Metals for Japan's Resource Strategy. <https://doi.org/10.2320/MATERTRANS.M2014380>
- Hayes, S.M., McCullough, E.A., 2018. Critical minerals: A review of elemental trends in comprehensive criticality studies. *Resources Policy, Sustainable management and exploitation of extractive waste: towards a more efficient resource preservation and waste recycling* 59, 192–199. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.06.015>
- He, Y., 2018. The trade-security nexus and U.S. policy making in critical minerals. *Resources Policy* 59, 238–249. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.07.010>
- Heckmann, I., Comes, T., Nickel, S., 2015. A critical review on supply chain risk – Definition, measure and modeling. *Omega* 52, 119–132. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.10.004>
- Helbig, C., Bradshaw, A.M., Kolotzek, C., Thorenz, A., Tuma, A., 2016a. Supply risks associated with CdTe and CIGS thin-film photovoltaics. *Applied Energy* 178, 422–433. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.102>
- Helbig, C., Bradshaw, A.M., Wietschel, L., Thorenz, A., Tuma, A., 2018a. Supply risks associated with lithium-ion battery materials. *Journal of Cleaner Production* 172, 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.122>
- Helbig, C., Bradshaw, A.M., Wietschel, L., Thorenz, A., Tuma, A., 2018b. Supply risks associated with lithium-ion battery materials. *Journal of Cleaner Production* 172, 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.122>
- Helbig, C., Bruckler, M., Thorenz, A., Tuma, A., 2021a. An Overview of Indicator Choice and Normalization in Raw Material Supply Risk Assessments. *Resources-Basel* 10, 79. <https://doi.org/10.3390/resources10080079>
- Helbig, C., Kolotzek, C., Thorenz, A., Reller, A., Tuma, A., Schafnitzel, M., Krohns, S., 2017. Benefits of resource strategy for sustainable materials research and development. *Sustainable Materials and Technologies* 12, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.01.004>
- Helbig, C., Schrijvers, D., Hool, A., 2021b. Selecting and prioritizing material resources by criticality assessments. *One Earth* 4, 339–345. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.02.006>
- Helbig, C., Wietschel, L., Thorenz, A., Tuma, A., 2016b. How to evaluate raw material vulnerability - An overview. *Resources Policy* 48, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.02.003>
- Hemlock Semiconductor, 2022. Sustainability report. USA.

- Hemlock Semiconductor LLC, Wacker Chemie AG, Globalwafers CO. LTD, Shin-Etsu Handotai America, SK Siltron CO. LTD, SUMCO CORP, 2023. Companies Propose Expanding Semiconductor Definition in Manufacturing Credit Regs | Tax Notes.
- Hentic-Giliberto, M., 2016. Acceptabilité du risque : quelle approche des néo-entrepreneurs ? *Management & Avenir* 88, 179–202. <https://doi.org/10.3917/mav.088.0179>
- Ho, W., Zheng, T., Yildiz, H., Talluri, S., 2015a. Supply chain risk management: a literature review. *International Journal of Production Research* 53, 5031–5069. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1030467>
- Ho, W., Zheng, T., Yildiz, H., Talluri, S., 2015b. Supply chain risk management: a literature review. *International Journal of Production Research* 53, 5031–5069. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1030467>
- Hocquard, C., Samama, J.C., 2012. Les défis des métaux «critiques». *Géologues*.
- Hofmann, M., Hofmann, H., Hagelüken, C., Hool, A., 2018. Critical raw materials: A perspective from the materials science community. *Sustainable Materials and Technologies* 17, e00074. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00074>
- Hoshine, n.d. Hoshine Silicon Industry Co., Ltd. [WWW Document]. URL http://www.hoshinesilicon.com/index_en.aspx (accessed 8.25.23).
- Huang, G.Q., Lau, J.S.K., Mak, K.L., 2003. The impacts of sharing production information on supply chain dynamics: A review of the literature. *International Journal of Production Research* 41, 1483–1517. <https://doi.org/10.1080/0020754031000069625>
- Hudnurkar, M., Deshpande, S., Rathod, U., Jakhar, S., 2017. Supply Chain Risk Classification Schemes: A Literature Review. *Operations and Supply Chain Management: An International Journal* 10, 182–199. <https://doi.org/10.31387/oscm0290190>
- Hugos, M.H., 2003. *Essentials of Supply Chain Management*. John Wiley & Sons.
- Hung, H.-C., Chiu, Y.-C., Wu, M.-C., 2017. Analysis of Competition Between IDM and Fabless–Foundry Business Models in the Semiconductor Industry. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* 30, 254–260. <https://doi.org/10.1109/TSM.2017.2699739>
- Iddir, O., 2014. Études des dangers : arbre de défaillances (méthode d’analyse détaillée des risques ADR).
- iMedia, 2023. Polysilicon industry research report: Polysilicon boom continues, pattern optimization reshuffle accelerates [WWW Document]. URL <https://min.news/en/economy/654315b1ee575b170bc1ef197da10443.html> (accessed 1.31.23).
- Ioannidou, D., Heeren, N., Sonnemann, G., Habert, G., 2019a. The future in and of criticality assessments. *Journal of Industrial Ecology* 23, 751–766. <https://doi.org/10.1111/jiec.12834>
- Ioannidou, D., Meylan, G., Sonnemann, G., Habert, G., 2017. Is gravel becoming scarce? Evaluating the local criticality of construction aggregates. *Resources, Conservation and Recycling* 126, 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.016>
- Ioannidou, D., Pommier, R., Habert, G., Sonnemann, G., 2019b. Evaluating the risks in the construction wood product system through a criticality assessment framework. *Resources, Conservation and Recycling* 146, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.021>
- IRDS, 2023. New Challenges Facing Semiconductors - IEEE IRDS™ [WWW Document]. URL <https://irds.ieee.org/topics/new-challenges-facing-semiconductors> (accessed 9.2.23).
- Isik, F., 2011. Complexity in supply chains: a new approach to quantitative measurement of the supply-chain-complexity. *Supply chain management* 21, 417–432.

- Jansson, U., Norrman, A., 2004. Ericsson's proactive supply chain risk management approach after a serious sub-supplier accident. *Int Jnl Phys Dist & Log Manage* 34, 434–456. <https://doi.org/10.1108/09600030410545463>
- Jasiński, D., Cinelli, M., Dias, L.C., Meredith, J., Kirwan, K., 2018a. Assessing supply risks for non-fossil mineral resources via multi-criteria decision analysis. *Resources Policy, Special Issue on Mining Value Chains, Innovation and Learning* 58, 150–158. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.04.011>
- Jasiński, D., Cinelli, M., Dias, L.C., Meredith, J., Kirwan, K., 2018b. Assessing supply risks for non-fossil mineral resources via multi-criteria decision analysis. *Resources Policy, Special Issue on Mining Value Chains, Innovation and Learning* 58, 150–158. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.04.011>
- JBT Metal, 2022. Silicon Metal Manufacturers In China [WWW Document]. URL <https://www.ayjbtmetal.com/news/Silicon-Metal-Manufacturers-In-China.html> (accessed 1.31.23).
- Jialiang, F., 2020. 中国量产电子级多晶硅企业产能扩增至3300吨/年-中新网 [WWW Document]. *Chinanews*. URL <https://www.chinanews.com.cn/cj/2020/12-11/9359680.shtml> (accessed 8.23.23).
- Jiang, M., 2022. Review of China Silicon Metal Producing Areas and Capacity Commissioning Progress in 2022_SMM | Shanghai Non ferrous Metals [WWW Document]. URL <https://news.metal.com/newscontent/101961599/review-of-china-silicon-metal-producing-areas-and-capacity-commissioning-progress-in-2022> (accessed 1.31.23).
- Jiang, Z., Zhao, T., Wang, S., Ren, F., 2020. A Novel Risk Assessment and Analysis Method for Correlation in a Complex System Based on Multi-Dimensional Theory. *Applied Sciences* 10, 3007. <https://doi.org/10.3390/app10093007>
- Jin, Y., 2017. Development of materials criticality profiling methodology at product level (phdthesis). Université de Technologie de Troyes.
- Jin, Y., Kim, J., Guillaume, B., 2016. Review of critical material studies. *Resources, Conservation and Recycling* 113, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.06.003>
- Jones, L., Demirkaya, M., Bethmann, E., 2019. Global value chain analysis: Concepts and approaches. *J. Int'l Com. & Econ.* 1.
- Junne, T., Wulff, N., Breyer, C., Naegler, T., 2020. Critical materials in global low-carbon energy scenarios: The case for neodymium, dysprosium, lithium, and cobalt. *Energy* 211, 118532. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118532>
- Jüttner, U., Peck, H., Christopher, M., 2003. Supply chain risk management: outlining an agenda for future research. *International Journal of Logistics Research and Applications* 6, 197–210. <https://doi.org/10.1080/13675560310001627016>
- Kastanaki, E., Giannis, A., 2021. Dynamic estimation of future obsolete laptop flows and embedded critical raw materials: The case study of Greece. *Waste Management* 132, 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.017>
- Khan, O., Burnes, B., 2007. Risk and supply chain management: creating a research agenda. *Int Jnl Logistics Management* 18, 197–216. <https://doi.org/10.1108/09574090710816931>
- Khan, S.M., Mann, A., Peterson, D., 2021. The semiconductor supply chain: Assessing national competitiveness. *Center for Security and Emerging Technology* 8.
- Khemiri, R., 2017. Développement d'une approche floue multicritères pour une planification intégrée couplant la gestion de la performance et du risque.
- Kiemel, S., Smolinka, T., Lehner, F., Full, J., Sauer, A., Mieke, R., 2021. Critical materials for water electrolyzers at the example of the energy transition in Germany. *Int. J. Energy Res.* 45, 9914–9935. <https://doi.org/10.1002/er.6487>

- Kilubi, I., Haasis, H., 2015. Supply Chain Risk Management Enablers - A Framework Development Through Systematic Review of the Literature from 2000 to 2015 (SSRN Scholarly Paper No. ID 2728911). Social Science Research Network, Rochester, NY.
- Kim, J., Guillaume, B., Chung, J., Hwang, Y., 2015. Critical and precious materials consumption and requirement in wind energy system in the EU 27. *Applied Energy* 139, 327–334. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.003>
- Kim, Juhan, Lee, J., Kim, B., Kim, Jinsoo, 2019. Raw material criticality assessment with weighted indicators: An application of fuzzy analytic hierarchy process. *Resources Policy* 60, 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.01.005>
- Kiser, J., Cantrell, G., 2006. 6 steps to managing risk. *Supply Chain Management Review* 10.
- Kleindorfer, P.R., Saad, G.H., 2005. Managing Disruption Risks in Supply Chains. *Production and Operations Management* 14, 53–68. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2005.tb00009.x>
- Kleinhans, J.-P., Baisakova, D.N., 2020. The global semiconductor value chain. The Stiftung Neue Verantwortung.
- Knašytė, M., Kliopova, I., Staniškis, J.K., 2012. Economic Importance, Environmental and Supply Risks on Imported Resources in Lithuanian Industry. *Environmental Research, Engineering and Management* 60, 40-47–47. <https://doi.org/10.5755/j01.erem.60.2.1308>
- Knobloch, V., Zimmermann, T., Gößling-Reisemann, S., 2018. From criticality to vulnerability of resource supply: The case of the automobile industry. *Resources, Conservation and Recycling* 138, 272–282. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.027>
- Köhler, A.R., Bakker, C., Peck, D., 2013. Critical materials: a reason for sustainable education of industrial designers and engineers. *European Journal of Engineering Education* 38, 441–451. <https://doi.org/10.1080/03043797.2013.796341>
- Kolotzek, C., Helbig, C., Thorenz, A., Reller, A., Tuma, A., 2018. A company-oriented model for the assessment of raw material supply risks, environmental impact and social implications. *Journal of Cleaner Production* 176, 566–580. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.162>
- Kopacek, B., 2016. Intelligent disassembly of components from printed circuit boards to enable re-use and more efficient recovery of critical metals, in: 2016 Electronics Goes Green 2016+ (EGG). Presented at the 2016 Electronics Goes Green 2016+ (EGG), pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/EGG.2016.7829842>
- Kraemer, M.U.G., Yang, C.-H., Gutierrez, B., Wu, C.-H., Klein, B., Pigott, D.M., Group†, O.C.-19 D.W., Plessis, L. du, Faria, N.R., Li, R., Hanage, W.P., Brownstein, J.S., Layan, M., Vespignani, A., Tian, H., Dye, C., Pybus, O.G., Scarpino, S.V., 2020. The effect of human mobility and control measures on the COVID-19 epidemic in China. *Science* 368, 493–497. <https://doi.org/10.1126/science.abb4218>
- Kristiansen, L.-M., Van der Eijk, C., 2020. Overview of the Norwegian metallurgical industry. NTNU, Institutt for materialteknologi, SFI, Trondheim.
- K.T., R., Sarmah, S.P., Tarei, P.K., 2020. An integrated framework for the assessment of inbound supply risk and prioritization of the risk drivers: A real-life case on electronics supply chain. *Benchmarking: An International Journal* 27, 1261–1286. <https://doi.org/10.1108/BIJ-03-2019-0119>
- Ku, A.Y., 2018. Anticipating critical materials implications from the Internet of Things (IOT): Potential stress on future supply chains from emerging data storage technologies. *Sustainable Materials and Technologies* 15, 27–32. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.10.001>

- Ku, A.Y., Dosch, C., Grossman, T.R., Herzog, J.L., Maricocchi, A.F., Polli, D., Lipkin, D.M., 2014. Addressing Rare-Earth Element Criticality: An Example from the Aviation Industry. *JOM* 66, 2355–2359. <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1159-9>
- Ku, A.Y., Loudis, J., Duclos, S.J., 2018. The impact of technological innovation on critical materials risk dynamics. *Sustainable Materials and Technologies* 15, 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.11.002>
- Kuipers, S., van Grieken, B.J., van Asselt, M.B.A., 2018. Risk, Hazards, and Crises in Research: What Risks Get Researched, Where, and How? *Risk, Hazards & Crisis in Public Policy* 9, 384–396. <https://doi.org/10.1002/rhc3.12160>
- Kull, T.J., Talluri, S., 2008. A Supply Risk Reduction Model Using Integrated Multicriteria Decision Making. *IEEE Transactions on Engineering Management* 55, 409–419. <https://doi.org/10.1109/TEM.2008.922627>
- Kummer, J.T., 1980. *Minerals yearbook: Metals and minerals*. United States Geological Survey.
- Kyung-min, L., 2022. Hanwha expands solar energy investment in US [WWW Document]. *koreatimes*. URL https://www.koreatimes.co.kr/www/tech/2023/08/419_326118.html (accessed 8.23.23).
- Lambert, D.M., Stock, J.R., Ellram, L.M., 1998. *Fundamentals of logistics management*, Irwin/McGraw-Hill series in marketing. Irwin/McGraw-Hill, Boston.
- LaPedus, M., 2021. More Silicon Wafer Consolidation [WWW Document]. *Semiconductor Engineering*. URL <https://semiengineering.com/more-silicon-wafer-consolidation/> (accessed 8.22.23).
- Lapko, Y., Trianni, A., Nuur, C., Masi, D., 2018. In Pursuit of Closed-Loop Supply Chains for Critical Materials: An Exploratory Study in the Green Energy Sector. *Journal of Industrial Ecology* 0. <https://doi.org/10.1111/jiec.12741>
- Lapko, Y., Trucco, P., 2018. Influence of power regimes on identification and mitigation of material criticality: The case of platinum group metals in the automotive sector. *Resources Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.08.008>
- Lapko, Y., Trucco, P., Nuur, C., 2016. The business perspective on materials criticality: Evidence from manufacturers. *Resources Policy* 50, 93–107. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.09.001>
- Lavastre, O., Gunasekaran, A., Spalanzani, A., 2012a. Supply chain risk management in French companies. *Decision Support Systems*, 1)Decision Support Systems for Logistics and Supply Chain Management 2)Business Intelligence and the Web 52, 828–838. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2011.11.017>
- Lavastre, O., Gunasekaran, A., Spalanzani, A., 2012b. Supply chain risk management in French companies. *Decis. Support Syst.* 52, 828–838. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2011.11.017>
- Lecouturier, B., 2019. *Ferroglobe : 105 ans d’histoire*. La Vie Nouvelle. URL <https://www.la-vie-nouvelle.fr/infos/dossiers/ferroglobe%e2%80%89-%e2%80%a8105-ans-dhistoire/> (accessed 8.27.23).
- Lee, H.L., Billington, C., 1993. Material Management in Decentralized Supply Chains. *Operations Research* 41, 835–847. <https://doi.org/10.1287/opre.41.5.835>
- Lee, J., Bazilian, M., Sovacool, B., Hund, K., Jowitt, S.M., Nguyen, T.P., Månberger, A., Kah, M., Greene, S., Galeazzi, C., Awuah-Offei, K., Moats, M., Tilton, J., Kukoda, S., 2020. Reviewing the material and metal security of low-carbon energy transitions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 124, 109789. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109789>
- Lee, K., Cha, J., 2021. Towards Improved Circular Economy and Resource Security in South Korea. *Sustainability* 13, 17. <https://doi.org/10.3390/su13010017>

- Li, S., Yan, J., Pei, Q., Sha, J., Mou, S., Xiao, Y., 2019. Risk Identification and Evaluation of the Long-term Supply of Manganese Mines in China Based on the VW-BGR Method. *Sustainability* 11, 2683. <https://doi.org/10.3390/su11092683>
- Lister, T.E., Wang, P., Anderko, A., 2014. Recovery of critical and value metals from mobile electronics enabled by electrochemical processing. *Hydrometallurgy* 149, 228–237. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.08.011>
- Lloyd, S., Lee, J., Clifton, A., Elghali, L., France, C., 2012. Recommendations for assessing materials criticality. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management* 165, 191–200. <https://doi.org/10.1680/warm.12.00002>
- Løvik, A.N., Hagelūken, C., Wāger, P., 2018. Improving supply security of critical metals: Current developments and research in the EU. *Sustainable Materials and Technologies* 15, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.01.003>
- Lv, S., Kim, H., Zheng, B., Jin, H., 2018. A Review of Data Mining with Big Data towards Its Applications in the Electronics Industry. *Applied Sciences* 8, 582. <https://doi.org/10.3390/app8040582>
- Lynch-Morin, K., 2013. Hemlock Semiconductor named supplier of the year by silicon-wafer producer SUMCO - mlive.com [WWW Document]. URL https://www.mlive.com/business/mid-michigan/2013/04/hemlock_semiconductor_named_su.html (accessed 8.26.23).
- Mabert, V.A., Venkataramanan, M. a., 1998. Special Research Focus on Supply Chain Linkages: Challenges for Design and Management in the 21st Century*. *Decision Sciences* 29, 537–552. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1998.tb01353.x>
- MacCarthy, B.L., Ahmed, W.A.H., Demirel, G., 2022. Mapping the supply chain: Why, what and how? *International Journal of Production Economics, Special Issue celebrating Volume 250 of the International Journal of Production Economics* 250, 108688. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108688>
- Machacek, E., 2017. Constructing criticality by classification: Expert assessments of mineral raw materials. *Geoforum* 84, 368–377. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.03.028>
- Magnusson, P., Baack, D.W., Zdravkovic, S., Staub, K.M., Amine, L.S., 2008. Meta-analysis of cultural differences: Another slice at the apple. *International Business Review* 17, 520–532. <https://doi.org/10.1016/j.ibusrev.2008.04.003>
- Mahajan, S., 2004. The role of materials science in microelectronics: past, present and future. *Progress in Materials Science, A Festschrift in Honor of T. B. Massalski* 49, 487–509. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(03\)00027-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(03)00027-6)
- Mahmoudi, J., 2006. Simulation et gestion des risques en planification distribuée de chaînes logistiques: application au secteur de l'électronique et des télécommunications.
- Maldonado, F.S., Lomelí, O.C., Rendón, G.V., Robledo, V.A., Hernandez, J.G.L., Rios, S.E.V., 2022. Correlation of Aggressive Environments and Operative Yielding of Manufacturing workers in an Electronics Industry of Mexicali. *Partners Universal International Research Journal* 1, 175–181. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7512208>
- Malinauskiene, M., Kliopova, I., Hugi, C., Staniskis, J.K., 2018. Geostrategic Supply Risk and Economic Importance as Drivers for Implementation of Industrial Ecology Measures in a Nitrogen Fertilizer Production Company. *J. Ind. Ecol.* 22, 422–433. <https://doi.org/10.1111/jiec.12561>
- Mancini, L., De Camillis, C., Pennington, D., European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2013. Security of supply and scarcity of raw materials: towards a methodological framework for sustainability assessment. Publications Office, Luxembourg.
- Manhart, A., Vogt, R., Priester, M., Dehoust, G., Auberger, A., Blepp, M., Dolega, P., Kämper, C., Giegrich, J., Schmidt, G., Kosmol, J., 2019. The environmental criticality of primary

- raw materials – A new methodology to assess global environmental hazard potentials of minerals and metals from mining. *Miner Econ* 32, 91–107. <https://doi.org/10.1007/s13563-018-0160-0>
- Mann, M., Putsche, V., 2022. Semiconductor-Supply Chain Deep Dive Assessment. USDOE Office of Policy (PO).
- Manuj, I., Mentzer, J.T., 2008a. Global Supply Chain Risk Management. *Journal of Business Logistics* 29, 133–155. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2008.tb00072.x>
- Manuj, I., Mentzer, J.T., 2008b. Global Supply Chain Risk Management. *Journal of Business Logistics* 29, 133–155. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2008.tb00072.x>
- Marcos, J.T., Scheller, C., Godina, R., Spengler, T.S., Carvalho, H., 2021. Sources of uncertainty in the closed-loop supply chain of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Cleaner Logistics and Supply Chain* 1, 100006. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2021.100006>
- Marra, A., Cesaro, A., Belgiorno, V., 2018. Separation efficiency of valuable and critical metals in WEEE mechanical treatments. *Journal of Cleaner Production* 186, 490–498. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.112>
- Marscheider-Weidemann, F., Langkau, S., Eberling, E., Erdmann, L., Haendel, M., Krail, M., Loibl, A., Neef, C., Neuwirth, M., Rostek, L., 2021. Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021.
- Martins, F., Castro, H., 2019. Significance ranking method applied to some EU critical raw materials in a circular economy – priorities for achieving sustainability. *Procedia CIRP* 84, 1059–1062. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.281>
- Massari, S., Ruberti, M., 2013. Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies. *Resources Policy* 38, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.07.001>
- Mastrocinque, E., Yuce, B., Lambiase, A., Packianather, M.S., 2014. A System of Systems Approach to Supply Chain Design. *Applied Mechanics and Materials* 496–500, 2807–2814. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.496-500.2807>
- Mateus, A., Martins, L., 2019. Challenges and opportunities for a successful mining industry in the future. *BOLETÍN GEOLOGICO Y MINERO* 130, 99–121. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.130.1.007>
- Maurand-Valet, A., 2011. Choix méthodologiques en Sciences de Gestion : pourquoi tant de chiffres ? *Management & Avenir* 43, 289–302. <https://doi.org/10.3917/mav.043.0289>
- Mayer, H., Gleich, B., 2015. Measuring Criticality of Raw Materials: An Empirical Approach Assessing the Supply Risk Dimension of Commodity Criticality. *Natural Resources* 6, 56.
- McCullough, E., Nassar, N.T., 2017. Assessment of critical minerals: updated application of an early-warning screening methodology. *Miner Econ* 30, 257–272. <https://doi.org/10.1007/s13563-017-0119-6>
- McLellan, B.C., Yamasue, E., Tezuka, T., Corder, G., Golev, A., Giurco, D., 2016. Critical Minerals and Energy—Impacts and Limitations of Moving to Unconventional Resources. *Resources* 5, 19. <https://doi.org/10.3390/resources5020019>
- Mehrabikoushki, A., 2008. Partage d'information dans la chaîne logistique: évaluation des impacts sur la performance d'une chaîne logistique des modes de collaboration mis en oeuvre entre les partenaires et des informations échangées. Lyon, INSA.
- Mentzer, J.T., DeWitt, W., Keebler, J.S., Min, S., Nix, N.W., Smith, C.D., Zacharia, Z.G., 2001. Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics* 22, 1–25.
- Merzifonluoglu, Y., 2015. Impact of risk aversion and backup supplier on sourcing decisions of a firm. *International Journal of Production Research* 53, 6937–6961. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.999956>

- Miehe, R., Schneider, R., Baaij, F., Bauernhansl, T., 2016. Criticality of Material Resources in Industrial Enterprises – Structural Basics of an Operational Model. *Procedia CIRP*, The 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering 48, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.035>
- Millet, P.-A., Schmitt, P., Botta-Genoulaz, V., 2009. The SCOR model for the alignment of business processes and information systems. *Enterprise Information Systems* 3, 393–407. <https://doi.org/10.1080/17517570903030833>
- Milliken, F.J., 1987. Three types of perceived uncertainty about the environment: State, effect, and response uncertainty. *The Academy of Management Review* 12, 133–143. <https://doi.org/10.2307/257999>
- Millington, E., 2021. GlobalFoundries and GlobalWafers Partnering to Expand Semiconductor Wafer Supply [WWW Document]. GlobalFoundries. URL <https://gf.com/dresden-press-release/globalfoundries-and-globalwafers-partnering-expand-semiconductor-wafer-supply/> (accessed 8.22.23).
- Mitsubishi Materials, 2023. Integrated Report 2023. Mitsubishi Materials Corporation.
- Miyake, D.I., Junior, A.S.T., Favaro, C., 2010. Supply chain mapping initiatives in the Brazilian automotive industry: challenges and opportunities. *Journal of Operations and Supply Chain Management* 3, 78–97. <https://doi.org/10.12660/joscmv3n1p78-97>
- Miyamoto, W., Kosai, S., Hashimoto, S., 2019a. Evaluating Metal Criticality for Low-Carbon Power Generation Technologies in Japan. *Minerals* 9, 95. <https://doi.org/10.3390/min9020095>
- Miyamoto, W., Kosai, S., Hashimoto, S., 2019b. Evaluating Metal Criticality for Low-Carbon Power Generation Technologies in Japan. *Minerals* 9, 95. <https://doi.org/10.3390/min9020095>
- Moats, M., Alagha, L., Awuah-Offei, K., 2021. Towards resilient and sustainable supply of critical elements from the copper supply chain: A review. *Journal of Cleaner Production* 307, 127207. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127207>
- Montoya-Torres, J., Ortiz-Vargas, D., 2014. Collaboration and information sharing in dyadic supply chains: A literature review over the period 2000–2012. *Estudios Gerenciales* 30. <https://doi.org/10.1016/j.estger.2014.05.006>
- Morley, N., Eatherley, D., 2008. Material security: ensuring resource availability for the UK economy. C-Tech Innovation Ltd., Chester.
- Mortureux, Y., 2016. Fondamentaux de l'analyse de risque. *Fondation pour une culture de sécurité industrielle* 2, 40.
- Moss, R.L., Tzimas, E., Kara, H., Willis, P., Kooroshy, J., 2013. The potential risks from metals bottlenecks to the deployment of Strategic Energy Technologies. *Energy Policy, Special section: Long Run Transitions to Sustainable Economic Structures in the European Union and Beyond* 55, 556–564. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.053>
- Mouloua, Z., 2007. Ordonnements coopératifs pour les chaînes logistiques (phdthesis). Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL.
- Mrabet, W., Souissi, N., Tikito, K., 2017. Definitions of Supply Chain- Evolution toward System of Systems.
- Mubarik, M.S., Naghavi, N., Mubarik, M., Kusi-Sarpong, S., Khan, S.A., Zaman, S.I., Kazmi, S.H.A., 2021. Resilience and cleaner production in industry 4.0: Role of supply chain mapping and visibility. *Journal of Cleaner Production* 292, 126058. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126058>
- Mudd, G.M., Jowitt, S.M., Werner, T.T., 2017. The world's by-product and critical metal resources part I: Uncertainties, current reporting practices, implications and grounds for optimism. *Ore Geology Reviews* 86, 924–938. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.05.001>

- Mueller, S.R., Wäger, P.A., Turner, D.A., Shaw, P.J., Williams, I.D., 2017. A framework for evaluating the accessibility of raw materials from end-of-life products and the Earth's crust. *Waste Management* 68, 534–546. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.043>
- Musa, S.N., 2012. *Supply Chain Risk Management : Identification, Evaluation and Mitigation Techniques*.
- Nansai, K., Nakajima, K., Kagawa, S., Kondo, Y., Shigetomi, Y., Suh, S., 2015. Global Mining Risk Footprint of Critical Metals Necessary for Low-Carbon Technologies: The Case of Neodymium, Cobalt, and Platinum in Japan. *Environ. Sci. Technol.* 49, 2022–2031. <https://doi.org/10.1021/es504255r>
- Nansai, K., Nakajima, K., Suh, S., Kagawa, S., Kondo, Y., Takayanagi, W., Shigetomi, Y., 2017. The role of primary processing in the supply risks of critical metals. *Economic Systems Research* 29, 335–356. <https://doi.org/10.1080/09535314.2017.1295923>
- Nassar, N.T., Barr, R., Browning, M., Diao, Z., Friedlander, E., Harper, E.M., Henly, C., Kavlak, G., Kwatra, S., Jun, C., Warren, S., Yang, M.-Y., Graedel, T.E., 2012. Criticality of the Geological Copper Family. *Environ. Sci. Technol.* 46, 1071–1078. <https://doi.org/10.1021/es203535w>
- Nassar, N.T., Du, X., Graedel, T.E., 2015a. Criticality of the Rare Earth Elements. *Journal of Industrial Ecology* 19, 1044–1054. <https://doi.org/10.1111/jiec.12237>
- Nassar, N.T., Graedel, T.E., Harper, E.M., 2015b. By-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Science Advances* 1, e1400180. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400180>
- National Research Council, 2008a. *Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy*. The National Academies Press, Washington, DC. <https://doi.org/10.17226/12034>
- National Research Council, 2008b. *Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy*. The National Academies Press, Washington, DC. <https://doi.org/10.17226/12034>
- Nations Unies, 2023. Sanctions | Conseil de sécurité des Nations Unies [WWW Document]. URL <https://www.un.org/securitycouncil/fr/sanctions/information> (accessed 8.28.23).
- Naude, M.J., Chiweshe, N., 2017. A proposed operational risk management framework for small and medium enterprises. *South African Journal of Economic and Management Sciences* 20, 1–10.
- Naumov, A., Orehov, D., 2021. The modern phase of the polysilicon market. *Modern Electronic Materials* 7, 115–126. <https://doi.org/10.3897/j.moem.7.81721>
- Neff, B., 2018. *Traps and Transformations of Grenadian Water Management*.
- Négre, P., Ladenberger, A., Reimann, C., Birke, M., Demetriades, A., Sadeghi, M., 2019. GEMAS: Geochemical background and mineral potential of emerging tech-critical elements in Europe revealed from low-sampling density geochemical mapping. *Applied Geochemistry* 111, 104425. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104425>
- Nguyen, R.T., Fishman, T., Zhao, F., Imholte, D.D., Graedel, T.E., 2018. Analyzing critical material demand: A revised approach. *Science of The Total Environment* 630, 1143–1148. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.283>
- Nieto, A., Guelly, K., Kleit, A., 2013. Addressing criticality for rare earth elements in petroleum refining: The key supply factors approach. *Resources Policy* 38, 496–503. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.08.001>
- Northey, S.A., Mudd, G.M., Werner, T.T., 2018. Unresolved Complexity in Assessments of Mineral Resource Depletion and Availability. *Nat. Resour. Res.* 27, 241–255. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9352-5>
- Nuss, P., Harper, E.M., Nassar, N.T., Reck, B.K., Graedel, T.E., 2014. Criticality of Iron and Its Principal Alloying Elements. *Environ. Sci. Technol.* 48, 4171–4177. <https://doi.org/10.1021/es405044w>

- Nuss, P., Ohno, H., Chen, W.-Q., Graedel, T.E., 2019. Comparative analysis of metals use in the United States economy. *Resources, Conservation and Recycling* 145, 448–456. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.025>
- OCI, 2018. Polysilicon < Our Business | OCI [WWW Document]. URL <https://www.oci.co.kr/eng/sub/business/poly.asp> (accessed 8.24.23).
- OECD, 2019. Measuring distortions in international markets: The semiconductor value chain (OECD Trade Policy Papers No. 234), OECD Trade Policy Papers. <https://doi.org/10.1787/8fe4491d-en>
- Oh, J.H., 2001. B2B EC in Automobile Electronics and Construction Industries in Korea. Korea University.
- Olivetti, E.A., Ceder, G., Gaustad, G.G., Fu, X., 2017. Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals. *Joule* 1, 229–243. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.08.019>
- Omodara, L., Pitkäaho, S., Turpeinen, E.-M., Saavalainen, P., Oravisjärvi, K., Keiski, R.L., 2019a. Recycling and substitution of light rare earth elements, cerium, lanthanum, neodymium, and praseodymium from end-of-life applications - A review. *Journal of Cleaner Production* 236, 117573. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.048>
- Omodara, L., Pitkäaho, S., Turpeinen, E.-M., Saavalainen, P., Oravisjärvi, K., Keiski, R.L., 2019b. Recycling and substitution of light rare earth elements, cerium, lanthanum, neodymium, and praseodymium from end-of-life applications - A review. *Journal of Cleaner Production* 236, 117573. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.048>
- Palomino, A., Marty, J., Auffret, S., Joumard, I., Sousa, R.C., Prejbeanu, I.L., Ageron, B., Dieny, B., 2021. Evaluating critical metals contained in spintronic memory with a particular focus on Pt substitution for improved sustainability. *Sustainable Materials and Technologies* 28, e00270. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00270>
- Panigrahi, C.M.A., 2012. Risk Management in Micro, Small and Medium Enterprises (MSMEs) in India: A Critical Appraisal. *Asia Pacific Journal of Marketing & Management Review* 1.
- Panousi, S., Harper, E.M., Nuss, P., Eckelman, M.J., Hakimian, A., Graedel, T.E., 2016. Criticality of Seven Specialty Metals. *Journal of Industrial Ecology* 20, 837–853. <https://doi.org/10.1111/jiec.12295>
- Patel, S., Swain, B., Behera, A., Mohapatra, S., 2020. Metallic Glasses: A Revolution in Material Science. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90165>
- Pavel, C.C., Marmier, A., Tzimas, E., Schleicher, T., Schüler, D., Buchert, M., Blagoeva, D., 2016. Critical raw materials in lighting applications: Substitution opportunities and implication on their demand. *physica status solidi (a)* 213, 2937–2946. <https://doi.org/10.1002/pssa.201600594>
- Pavel, C.C., Thiel, C., Degreif, S., Blagoeva, D., Buchert, M., Schüler, D., Tzimas, E., 2017. Role of substitution in mitigating the supply pressure of rare earths in electric road transport applications. *Sustainable Materials and Technologies* 12, 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.01.003>
- Peck, D., Bakker, C., 2012. Eco-design opportunities for critical material supply risks. Ieee, New York.
- Peck, D., Kandachar, P., Tempelman, E., 2015. Critical materials from a product design perspective. *Materials & Design (1980-2015)* 65, 147–159. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.08.042>
- Peck, H., 2006. Reconciling supply chain vulnerability, risk and supply chain management. *International Journal of Logistics Research and Applications* 9, 127–142. <https://doi.org/10.1080/13675560600673578>

- Platzer, M.D., Jr, J.F.S., Sutter, K.M., 2020. Semiconductors: U.S. Industry, Global Competition, and Federal Policy. *Global Competition* 58.
- Poitiers, N.F., Weil, P., 2022. *Marché aux puces : analyse de la loi européenne sur les semi-conducteurs*. IFRI.
- Poulizac, C.M.F., 2013. Modeling mining economics and materials markets to inform criticality assessment and mitigation. Massachusetts Institute of Technology.
- Pournader, M., Kach, A., Talluri, S. (Sri), 2020. A Review of the Existing and Emerging Topics in the Supply Chain Risk Management Literature. *Decision Sciences* 51, 867–919. <https://doi.org/10.1111/dec.12470>
- Prakash, S., Soni, G., Rathore, A.P.S., 2017. A critical analysis of supply chain risk management content: a structured literature review. *Journal of Advances in Management Research* 14, 69–90. <https://doi.org/10.1108/JAMR-10-2015-0073>
- Proença, D., Estevens, J., Vieira, R., Borbinha, J., 2017. Risk Management: A Maturity Model Based on ISO 31000, in: 2017 IEEE 19th Conference on Business Informatics (CBI). Presented at the 2017 IEEE 19th Conference on Business Informatics (CBI), pp. 99–108. <https://doi.org/10.1109/CBI.2017.40>
- Purdy, G., 2010. ISO 31000:2009—Setting a New Standard for Risk Management. *Risk Analysis* 30, 881–886. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2010.01442.x>
- Qazi, A., 2017. Supply chain risk management: exploring an integrated process for managing interdependent risks and risk mitigation strategies. University of Strathclyde.
- Qazi, A., Akhtar, P., 2020. Risk matrix driven supply chain risk management: Adapting risk matrix based tools to modelling interdependent risks and risk appetite. *Computers & Industrial Engineering* 139, 105351. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.08.002>
- Qazi, A., Quigley, J., Dickson, A., 2015. Supply Chain Risk Management: Systematic literature review and a conceptual framework for capturing interdependencies between risks, in: 2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM). Presented at the 2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM), pp. 1–13. <https://doi.org/10.1109/IEOM.2015.7093701>
- Raaidi, S., Bouhaddou, I., Benghabrit, A., 2018. Is Supply Chain a complex system? MATEC Web Conf. 200, 00018. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201820000018>
- Rabe, W., Kostka, G., Smith Stegen, K., 2017. China's supply of critical raw materials: Risks for Europe's solar and wind industries? *Energy Policy* 101, 692–699. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.09.019>
- Rademaker, J.H., Kleijn, R., Yang, Y., 2013. Recycling as a Strategy against Rare Earth Element Criticality: A Systemic Evaluation of the Potential Yield of NdFeB Magnet Recycling. *Environ. Sci. Technol.* 47, 10129–10136. <https://doi.org/10.1021/es305007w>
- Rahimpour Golroudbary, S., Calisaya-Azpilcueta, D., Kraslawski, A., 2019. The Life Cycle of Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Critical Minerals Recycling: Case of Lithium-ion Batteries 80, 321. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.003>
- Raj Sinha, P., Whitman, L.E., Malzahn, D., 2004. Methodology to mitigate supplier risk in an aerospace supply chain. *Supply Chain Management: An International Journal* 9, 154–168. <https://doi.org/10.1108/13598540410527051>
- Ramly, E.F., Osman, M.S., 2018. Development of Risk Management Framework-Case Studies, in: *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Paris, France*.
- Rangel, D.A., Oliveira, T.K. de, Leite, M.S.A., 2015. Supply chain risk classification: discussion and proposal. *International Journal of Production Research* 53, 6868–6887. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.910620>

- Rao, S., Goldsby, T.J., 2009. Supply chain risks: a review and typology. *The International Journal of Logistics Management* 20, 97–123. <https://doi.org/10.1108/09574090910954864>
- Rappin, B., 2011. De l'unité ontologique des épistémologies gestionnaires et de ses conséquences. *Management & Avenir* 43, 476–489. <https://doi.org/10.3917/mav.043.0476>
- Ravi, S., 2022. SIA Highlights Low Risk of Forced Labor in Semiconductor Supply Chains [WWW Document]. Semiconductor Industry Association. URL <https://www.semiconductors.org/sia-highlights-low-risk-of-forced-labor-in-semiconductor-supply-chains/> (accessed 1.31.23).
- Ravi, S., 2021. Strengthening the Global Semiconductor Supply Chain in an Uncertain Era. SIA/BCG.
- Razak, G.M., Hendry, L.C., Stevenson, M., 2023. Supply chain traceability: a review of the benefits and its relationship with supply chain resilience. *Production Planning & Control* 34, 1114–1134. <https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1983661>
- REC Silicon, 2021. REC Silicon Annual Report 2021.
- Reller, A., 2011. Criticality of metal resources for functional materials used in electronics and microelectronics. *physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters* 5, 309–311. <https://doi.org/10.1002/pssr.201105126>
- Reverdiau, G., Le Duigou, A., Alleau, T., Aribart, T., Dugast, C., Priem, T., 2021. Will there be enough platinum for a large deployment of fuel cell electric vehicles? *International Journal of Hydrogen Energy* 46, 39195–39207. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.149>
- Roelich, K., Dawson, D.A., Purnell, P., Knoeri, C., Revell, R., Busch, J., Steinberger, J.K., 2014. Assessing the dynamic material criticality of infrastructure transitions: A case of low carbon electricity. *Applied Energy* 123, 378–386. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.052>
- Rosenau-Tornow, D., Buchholz, P., Riemann, A., Wagner, M., 2009. Assessing the long-term supply risks for mineral raw materials—a combined evaluation of past and future trends. *Resources Policy* 34, 161–175. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2009.07.001>
- Rota, K., Thierry, C., Bel, G., 2001. La maîtrise des flux (coordonateur: JP Campagne): Chapitre 5" Gestion des flux dans les chaînes logistiques (Supply Chain Management)", Ouvrage Hermès: Traité Systèmes pour l'ingénieur. Hermès 16.
- Roux-Dufort, C., 2015. Continuité, anticipation et résilience. *Sécurité et stratégie* 18, 5–11. <https://doi.org/10.3917/sestr.018.0005>
- Roy, R.N., 2011. Enhancing Visibility through Supply Chain Mapping: Some Cases from the Hawke's Bay Region of New Zealand, in: 2011 International Conference on Management and Service Science. Presented at the 2011 International Conference on Management and Service Science, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICMSS.2011.5998257>
- Rynhart, G., Chang, J.-H., Huynh, P., 2016. ASEAN in transformation electrical and electronics: on and off the grid. International Labour Organization.
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., Kim, H., 2021. Multi-tool methodology to evaluate action levers to close the loop on critical materials – Application to precious metals used in catalytic converters. *Sustainable Production and Consumption* 26, 999–1010. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.01.010>
- Saint-Aubin, P., 2019. La dépendance aux métaux stratégiques: quelles solutions pour l'économie? Paris, Journal officiel de la République Française.

- Samuel, K.E., 2013. Concevoir des supply chains résilientes : simple évolution du management des risques ou mutation stratégique majeure ? *Logistique & Management* 21, 33–45. <https://doi.org/10.1080/12507970.2013.11517015>
- Schei, A., Tuset, J., Tveit, H., 1998. Production of High Silicon Alloys.
- Schellens, M.K., Gisladottir, J., 2018. Critical Natural Resources: Challenging the Current Discourse and Proposal for a Holistic Definition. *Resources* 7, 79. <https://doi.org/10.3390/resources7040079>
- Schnebele, E., Jaiswal, K., Luco, N., Nassar, N.T., 2019. Natural hazards and mineral commodity supply: Quantifying risk of earthquake disruption to South American copper supply. *Resources Policy* 63, 101430. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101430>
- Scholz-Reiter, B., Frazzon, E.M., Makuschewitz, T., 2010. Integrating manufacturing and logistic systems along global supply chains. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Sustainable Development of Manufacturing Systems* 2, 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.03.003>
- Schrijvers, D., Hool, A., Blengini, G.A., Chen, W.-Q., Dewulf, J., Eggert, R., van Ellen, L., Gauss, R., Goddin, J., Habib, K., Hagelüken, C., Hirohata, A., Hofmann-Antenbrink, M., Kosmol, J., Le Gleuher, M., Grohol, M., Ku, A., Lee, M.-H., Liu, G., Nansai, K., Nuss, P., Peck, D., Reller, A., Sonnemann, G., Tercero, L., Thorenz, A., Wäger, P.A., 2020. A review of methods and data to determine raw material criticality. *Resources, Conservation and Recycling* 155, 104617. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104617>
- Servi, I.S., Beggs, S., Katrak, F.E., Jaffee, R.I., 1984. Critical Metals Used by the Electric Power Companies: An assessment of Risks and Strategies. *JOM* 36, 44–48. <https://doi.org/10.1007/BF03338587>
- Seshadri Seetharaman, 2013. *Treatise on Process Metallurgy, Volume 3: Industrial Processes*. Newnes.
- Sethurajan, M., Hullebusch, E.D. van, Fontana, D., Akcil, A., Deveci, H., Batinic, B., Leal, J.P., Gasche, T.A., Kucuker, M.A., Kuchta, K., Neto, I.F.F., Soares, H.M.V.M., Chmielarz, A., 2019. Recent advances on hydrometallurgical recovery of critical and precious elements from end of life electronic wastes - a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 49, 212–275. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1540760>
- Shahbaz, M.S., RM, R.Z., Bin, M.F., Rehman, F., 2017. What is Supply Chain Risk Management? A Review. *Advanced Science Letters* 23, 9233–9238. <https://doi.org/10.1166/asl.2017.10061>
- Sharma, A., Pathak, S., Borah, S.B., Adhikary, A., 2020. Is it too complex? The curious case of supply network complexity and focal firm innovation. *Journal of Operations Management* 66, 839–865. <https://doi.org/10.1002/joom.1067>
- Shin-Etsu, 2023. Major Bases of Operation / Worldwide Network. Shin-Etsu Chemical Co., Ltd. URL <https://www.shinetsu.co.jp/en/company/worldwide/> (accessed 1.31.23).
- Sibley, S.F., 1980. Cobalt: A Strategic and Critical Resource for Industrialized Nations, Supplied by Developing Nations. *Natural Resources Forum* 4, 403–413. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.1980.tb00998.x>
- Sievers, H., Tercero, L., 2012. Limits to the critical raw materials approach. *Proceedings of the ICE - Waste and Resource Management* 165, 201-208(7). <https://doi.org/10.1680/warm.12.00010>
- Silberglitt, R., Bartis, J.T., Chow, B.G., An, D.L., Brady, K., 2013. Concentration of Production of Critical Raw Materials, in: *Critical Materials, Present Danger to U.S. Manufacturing*. RAND Corporation, pp. 5–10.
- Siltronic AG, 2022a. Siltronic – Factbook, Investor Relations.

- Siltronic AG, 2022b. Siltronic annual report 2021.
- Siltronic AG, 2020. Siltronic – a leading producer of silicon wafers.
- Silvestri, L., Forcina, A., Silvestri, C., Traverso, M., 2021. Circularity potential of rare earths for sustainable mobility: Recent developments, challenges and future prospects. *Journal of Cleaner Production* 292, 126089. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126089>
- Simangunsong, E., Hendry, L.C., Stevenson, M., 2012. Supply-chain uncertainty: a review and theoretical foundation for future research. *International Journal of Production Research* 50, 4493–4523. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.613864>
- Simcao, 2020. Silicon metal company of Australia [WWW Document]. Simcoa. URL <https://www.simcoa.com.au/company> (accessed 8.25.23).
- Simchi-Levi, D., 2003. Designing and managing the supply chain : concepts, strategies, and case studies / [WWW Document].
- Simoes, S., Fortes, P., Dias, L., Seixas, J., 2015. Assessing critical metal needs for a low carbon energy system in 2050, in: 2015 12th International Conference on the European Energy Market (EEM). Presented at the 2015 12th International Conference on the European Energy Market (EEM), pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/EEM.2015.7216780>
- Simon, B., Ziemann, S., Weil, M., 2014. Criticality of metals for electrochemical energy storage systems – Development towards a technology specific indicator. *Metall. Res. Technol.* 111, 191–200. <https://doi.org/10.1051/metal/2014010>
- sina news, 2021. 国投创业领投电子级多晶硅领先企业鑫华半导体 [WWW Document]. URL <https://finance.sina.cn/tech/2021-03-10/detail-ikkntiak7184700.d.html> (accessed 8.23.23).
- Sinrat, S., Atthirawong, W., 2013. A Conceptual Framework of an Integrated Fuzzy ANP and TOPSIS for Supplier Selection Based on Supply Chain Risk Management, in: 2013 Ieee International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (Ieem 2013). Ieee, New York, pp. 1607–1611.
- SK Siltron, 2022. SK Siltron- Company-offices [WWW Document]. URL <https://www.sksiltron.com/en/company/office01.do> (accessed 1.31.23).
- Slijkerman, J.F., 2022. EU Chips Act to boost Europe’s technological prowess and strengthen economy [WWW Document]. ING Think. URL <https://think.ing.com/articles/eu-chips-act-to-strengthen-europes-economy/> (accessed 8.21.23).
- Slovic, P., 1999. Trust, Emotion, Sex, Politics, and Science: Surveying the Risk-Assessment Battlefield. *Risk Anal* 19, 689–701. <https://doi.org/10.1023/A:1007041821623>
- Slowinski, G., Latimer, D., Mehlman, S., 2013. Dealing with Shortages of Critical Materials. *Research-Technology Management* 56, 18–24. <https://doi.org/10.5437/08956308X5605139>
- Société Chimique de France, n.d. Silicium. L’Élémentarium. URL <https://lelementarium.fr/element-fiche/silicium/> (accessed 8.25.23).
- Sodhi, M.S., Lee, S., 2007. An analysis of sources of risk in the consumer electronics industry. *Journal of the Operational Research Society* 58, 1430–1439. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602410>
- Sodhi, M.S., Son, B.-G., Tang, C.S., 2012. Researchers’ Perspectives on Supply Chain Risk Management. *Prod. Oper. Manag.* 21, 1–13. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2011.01251.x>
- Sodhi, M.S., Tang, C.S., 2019. Research Opportunities in Supply Chain Transparency. *Production and Operations Management* 28, 2946–2959. <https://doi.org/10.1111/poms.13115>
- So-in, K., 2021. SK Siltron’s investment in OCI start to bear fruit [WWW Document]. 더벨뉴스. URL

- <http://www.thebell.co.kr/free/content/ArticleView.asp?key=202104211347167600104289&lcode=00> (accessed 8.22.23).
- Son, C.E., 2018. Supply Chain Risk Management: A Review of Thirteen Years of Research. *American Journal of Industrial and Business Management* 08, 2294. <https://doi.org/10.4236/ajibm.2018.812154>
- Son, J.Y., Orchard, R.K., 2013. Effectiveness of policies for mitigating supply disruptions. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 43, 684–706. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-04-2012-0109>
- Sonderegger, T., Pfister, S., Hellweg, S., 2015. Criticality of Water: Aligning Water and Mineral Resources Assessment. *Environ. Sci. Technol.* 49, 12315–12323. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02982>
- Song, J., Yan, W., Cao, H., Song, Q., Ding, H., Lv, Z., Zhang, Y., Sun, Z., 2019. Material flow analysis on critical raw materials of lithium-ion batteries in China. *Journal of Cleaner Production* 215, 570–581. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.081>
- Speirs, J., McGlade, C., Slade, R., 2015. Uncertainty in the availability of natural resources: Fossil fuels, critical metals and biomass. *Energy Policy* 87, 654–664. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.02.031>
- Sprecher, B., Reemeyer, L., Alonso, E., Kuipers, K., Graedel, T.E., 2017. How “black swan” disruptions impact minor metals. *Resources Policy* 54, 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.08.008>
- Stadtler, H., 2015. Supply Chain Management: An Overview, in: Stadtler, H., Kilger, C., Meyr, H. (Eds.), *Supply Chain Management and Advanced Planning: Concepts, Models, Software, and Case Studies*, Springer Texts in Business and Economics. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 3–28. https://doi.org/10.1007/978-3-642-55309-7_1
- Stadtler, H., 2005. Supply chain management and advanced planning—basics, overview and challenges. *European journal of operational research* 163, 575–588.
- Steinlechner, S., Antrekowitsch, J., 2015. Potential of a Hydrometallurgical Recycling Process for Catalysts to Cover the Demand for Critical Metals, Like PGMs and Cerium. *JOM* 67, 406–411. <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1263-x>
- Sterman, J., 2000. *Instructor’s Manual to Accompany Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill.
- Sturgeon, T., Kawakami, M., 2010. Global value chains in the electronics industry: Was the crisis a window of opportunity for developing countries? *The World Bank, Policy Research Working Paper Series*.
- Suarez-Barraza, M.F., Miguel-Davila, J.-Á., Vasquez-García, C.F., 2016. Supply chain value stream mapping: a new tool of operation management. *International Journal of Quality & Reliability Management* 33, 518–534. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-11-2014-0171>
- Sumco, 2019. Sumco Corporation CSR Report.
- Sumco, 2010. SUMCO Phoenix Corporation, Electronic-grade silicon wafers for the semiconductor industry [WWW Document]. URL https://www.sumcousa.com/about_facilities.htm (accessed 8.22.23).
- Sun, X., Hao, H., Hartmann, P., Liu, Z., Zhao, F., 2019. Supply risks of lithium-ion battery materials: An entire supply chain estimation. *Materials Today Energy* 14, 100347. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2019.100347>
- Sun, Z., Cao, H., Xiao, Y., Sietsma, J., Jin, W., Agterhuis, H., Yang, Y., 2017. Toward Sustainability for Recovery of Critical Metals from Electronic Waste: The Hydrochemistry Processes. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 5, 21–40. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00841>

- Suppes, R., Heuss-Abbichler, S., 2021. How to Identify Potentials and Barriers of Raw Materials Recovery from Tailings? Part I: A UNFC-Compliant Screening Approach for Site Selection. *Resources* 10, 26. <https://doi.org/10.3390/resources10030026>
- Sykes, J.P., Wright, J.P., Trench, A., 2016a. Discovery, supply and demand: From Metals of Antiquity to critical metals. *Applied Earth Science* 125, 3–20. <https://doi.org/10.1080/03717453.2015.1122274>
- Sykes, J.P., Wright, J.P., Trench, A., Miller, P., 2016b. An assessment of the potential for transformational market growth amongst the critical metals. *Applied Earth Science* 125, 21–56. <https://doi.org/10.1080/03717453.2015.1104055>
- Tang, C.S., 2006. Perspectives in supply chain risk management. *International Journal of Production Economics* 103, 451–488. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.12.006>
- Tang, C.S., Zimmerman, J.D., Nelson, J.I., 2009. Managing New Product Development and Supply Chain Risks: The Boeing 787 Case. *Supply Chain Forum: An International Journal* 10, 74–86. <https://doi.org/10.1080/16258312.2009.11517219>
- Tang, O., Nurmaya Musa, S., 2011. Identifying risk issues and research advancements in supply chain risk management. *International Journal of Production Economics, Leading Edge of Inventory Research* 133, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.06.013>
- Tayur, S., Ganeshan, R., Magazine, M., 1999. *Quantitative models for supply chain management*. Boston : Kluwer Academic Publishers.
- Teer, J., Bertolini, M., Ritoe, J.A., Heyster, S., Sweijts, T., de Wijk, R., Vlaskamp, M., Patrahau, I., Thompson, J., Kim, S., Minicozzi, R., Meszaros, A., Cisco, G., Gorecki, M., 2022. The semiconductor and critical raw material ecosystem at a time of great power rivalry Full version.
- Tercero Espinoza, L., Schrijvers, D., Chen, W.-Q., Dewulf, J., Eggert, R., Goddin, J., Habib, K., Hagelüken, C., Hurd, A.J., Kleijn, R., Ku, A.Y., Lee, M.-H., Nansai, K., Nuss, P., Peck, D., Petavratzi, E., Sonnemann, G., van der Voet, E., Wäger, P.A., Young, S.B., Hool, A., 2020. Greater circularity leads to lower criticality, and other links between criticality and the circular economy. *Resources, Conservation and Recycling* 159, 104718. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104718>
- Tercero Espinoza, L.A., 2021. Critical appraisal of recycling indicators used in European criticality exercises and circularity monitoring. *Resources Policy* 73, 102208. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102208>
- Theodore Farris, M., 2010. Solutions to strategic supply chain mapping issues. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 40, 164–180. <https://doi.org/10.1108/09600031011035074>
- Thierry, C., 2003. *Gestion de chaînes logistiques: Modèles et mise en oeuvre pour l'aide à la décision à moyen terme*. Accreditation to supervise research. University of Toulouse II.
- Thiéart, R.-A., 2014. *Méthodes de recherche en management-4ème édition*. Dunod.
- Thomas, alsop, 2021. Global wafer producers market share 2020 [WWW Document]. Statista. URL <https://www.statista.com/statistics/895360/global-wafer-producers-market-share/> (accessed 1.26.23).
- Thomé, A.M.T., Scavarda, L.F., Scavarda, A.J., 2016. Conducting systematic literature review in operations management. *Production Planning & Control* 27, 408–420. <https://doi.org/10.1080/09537287.2015.1129464>
- Tikito, I., Souissi, N., 2019. Meta-analysis of Systematic Literature Review Methods. *International Journal of Modern Education and Computer Science* 11, 17–25. <https://doi.org/10.5815/ijmecs.2019.02.03>
- Tjørhom, B.B., 2010. Risk governance within aviation. *Risk Management* 12, 256–284.
- Tkaczyk, A.H., Bartl, A., Amato, A., Lapkovskis, V., Petranikova, M., 2018. Sustainability evaluation of essential critical raw materials: cobalt, niobium, tungsten and rare earth

- elements. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 51, 203001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aaba99>
- Tokuyama, 2022a. Tokuyama report 2022.
- Tokuyama, 2022b. Business Sites in Japan | Business Locations | About Tokuyama | Tokuyama [WWW Document]. URL <https://www.tokuyama.co.jp/eng/company/address/japan.html> (accessed 8.24.23).
- Toma, S.-V., Chiriță, M., Șarpe, D., 2012. Risk and Uncertainty. *Procedia Economics and Finance, International Conference Emerging Markets Queries in Finance and Business, Petru Maior University of Tîrgu-Mures, ROMANIA, October 24th - 27th, 2012* 3, 975–980. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(12\)00260-2](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(12)00260-2)
- Tran, T.H., Dobrovnik, M., Kummer, S., 2018a. Supply chain risk assessment: a content analysis-based literature review. *International Journal of Logistics Systems and Management* 31, 562–591. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2018.096088>
- Tran, T.H., Dobrovnik, M., Kummer, S., 2018b. Supply chain risk assessment: a content analysis-based literature review. *International Journal of Logistics Systems and Management* 31, 562–591. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2018.096088>
- Trkman, P., McCormack, K., 2009. Supply chain risk in turbulent environments—A conceptual model for managing supply chain network risk. *International Journal of Production Economics* 119, 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.03.002>
- trsilicon, 2018. Shaanxi Non-Ferrous Tian Hong REC Silicon Materials Co., Ltd. [WWW Document]. URL <https://www.trsilicon.com/en/about/900/about> (accessed 8.24.23).
- TSMC, 2021. TSMC Presents 2021 Excellent Performance Award to Outstanding Suppliers [WWW Document]. Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Limited. URL <http://pr.tsmc.com/english/news/2898> (accessed 8.22.23).
- Tsuda, K., 2014. Explosion At Mitsubishi Materials [WWW Document]. *Semiconductor Engineering*. URL <https://semiengineering.com/explosion-at-mitsubishi-materials/> (accessed 8.27.23).
- Tummala, R., Schoenherr, T., 2011. Assessing and managing risks using the Supply Chain Risk Management Process (SCRMP). *Supply Chain Management: An International Journal* 16, 474–483. <https://doi.org/10.1108/13598541111171165>
- Tunsu, C., Menard, Y., Eriksen, D.Ø., Ekberg, C., Petranikova, M., 2019. Recovery of critical materials from mine tailings: A comparative study of the solvent extraction of rare earths using acidic, solvating and mixed extractant systems. *Journal of Cleaner Production* 218, 425–437. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.312>
- UNIDO, 2018. *Global Value Chains and Industrial Development: Lessons from China, South-East and South Asia*. UNIDO Vienna, Austria.
- United States Geological Survey, 2020. *Mineral commodity summaries 2020*. 06.02. 2020, Reston, VA; <https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2020>.
- Urciuoli, V., Crenca, G., 1989. *Risk management: strategie e processi decisionali nella gestione dei rischi puri d'impresa*. Istituto studi bancari e aziendali.
- U.S. Department of Commerce, 2022. GlobalWafers Selects Sherman, Texas for New Semiconductor Silicon Wafer Site [WWW Document]. U.S. Department of Commerce. URL <https://www.commerce.gov/news/press-releases/2022/06/globalwafers-selects-sherman-texas-new-semiconductor-silicon-wafer-site> (accessed 8.22.23).
- U.S. Department of Energy, 2022. *Solar Photovoltaics Supply Chain Deep Dive Assessment*.
- US DoS (US Department of State), 2012. Washington, undated. **CRITICAL IMPORTED MATERIALS: STUDY OF AD HOC GROUP ESTABLISHED BY NSSM 197/CIEPSM 33**.
- USGS, 2020. *Silicon Statistics and Information* | U.S. Geological Survey.

- Vallet, F., Eynard, B., Millet, D., Mahut, S.G., Tyl, B., Bertoluci, G., 2013. Using eco-design tools: An overview of experts' practices. *Design Studies* 34, 345–377. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2012.10.001>
- van den Brink, S., Kleijn, R., Sprecher, B., Tukker, A., 2020. Identifying supply risks by mapping the cobalt supply chain. *Resources, Conservation and Recycling* 156, 104743. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104743>
- Van Eygen, E., De Meester, S., Tran, H.P., Dewulf, J., 2016. Resource savings by urban mining: The case of desktop and laptop computers in Belgium. *Resources, Conservation and Recycling* 107, 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.032>
- Vanany, I., Zailani, S., Pujawan, N., 2009. Supply Chain Risk Management: Literature Review and Future Research. *IJISCM* 2, 16–33. <https://doi.org/10.4018/jissem.2009010102>
- Velmuradova, M., 2004. Epistémologies et méthodologies de la recherche en Sciences de gestion. Note de synthèse (Other). USTV. <https://doi.org/10.13140/2.1.2429.2648>
- Verbano, C., Venturini, K., 2013. Managing Risks in SMEs: A Literature Review and Research Agenda. *Journal of technology management & innovation* 8, 186–197. <https://doi.org/10.4067/S0718-27242013000400017>
- Verbano, C., Venturini, K., 2011. Development paths of risk management: approaches, methods and fields of application. *Journal of Risk Research* 14, 519–550. <https://doi.org/10.1080/13669877.2010.541562>
- Véronneau, S., Pasin, F., Roy, J., 2008. L'information dans la chaîne logistique. *Revue française de gestion* 186, 149–161. <https://doi.org/10.3166/rfg.186.149-161>
- Viebahn, P., Soukup, O., Samadi, S., Teubler, J., Wiesen, K., Ritthoff, M., 2015. Assessing the need for critical minerals to shift the German energy system towards a high proportion of renewables. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49, 655–671. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.070>
- Vilko, J., Ritala, P., Edelmann, J., 2014. On uncertainty in supply chain risk management. *The International Journal of Logistics Management* 25, 3–19. <https://doi.org/10.1108/IJLM-10-2012-0126>
- Wacker, 2021. wacker fact book.
- Wacker, 2010. Acquisition Silicon-Metal [WWW Document]. URL <https://www.wacker.com/cms/en-us/about-wacker/investor-relations/ad-hoc-disclosures/detail-101683.html> (accessed 8.25.23).
- Wagner, S.M., Bode, C., 2008. An Empirical Examination of Supply Chain Performance Along Several Dimensions of Risk. *Journal of Business Logistics* 29, 307–325. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2008.tb00081.x>
- Wagner, S.M., Bode, C., Koziol, P., 2009. Supplier default dependencies: Empirical evidence from the automotive industry. *European Journal of Operational Research* 199, 150–161. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.11.012>
- Wall, F., Rollat, A., Pell, R.S., 2017. Responsible Sourcing of Critical Metals. *Elements* 13, 313–318. <https://doi.org/10.2138/gselements.13.5.313>
- Wang, P., Chen, L.-Y., Ge, J.-P., Cai, W., Chen, W.-Q., 2019a. Incorporating critical material cycles into metal-energy nexus of China's 2050 renewable transition. *Applied Energy* 253, 113612. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113612>
- Wang, P., Chen, L.-Y., Ge, J.-P., Cai, W., Chen, W.-Q., 2019b. Incorporating critical material cycles into metal-energy nexus of China's 2050 renewable transition. *Applied Energy* 253, 113612. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113612>
- Wang, P., Kara, S., 2019. Material Criticality and Circular Economy: Necessity of Manufacturing Oriented Strategies. *Procedia CIRP*, 26th CIRP Conference on Life Cycle Engineering (LCE) Purdue University, West Lafayette, IN, USA May 7-9, 2019 80, 667–672. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.056>

- Watari, T., McLellan, B.C., Giurco, D., Dominish, E., Yamasue, E., Nansai, K., 2019. Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity. *Resources, Conservation and Recycling* 148, 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.015>
- Watari, T., McLellan, B.C., Ogata, S., Tezuka, T., 2018. Analysis of Potential for Critical Metal Resource Constraints in the International Energy Agency's Long-Term Low-Carbon Energy Scenarios. *Minerals* 8, 156. <https://doi.org/10.3390/min8040156>
- Watari, T., Nansai, K., Nakajima, K., 2020. Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements. *Resources, Conservation and Recycling* 155, 104669. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104669>
- Weiser, A., Lang, D.J., Schomerus, T., Stamp, A., 2015. Understanding the modes of use and availability of critical metals – An expert-based scenario analysis for the case of indium. *Journal of Cleaner Production* 94, 376–393. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.079>
- Wentker, M., Greenwood, M., Asaba, M.C., Leker, J., 2019. A raw material criticality and environmental impact assessment of state-of-the-art and post-lithium-ion cathode technologies. *Journal of Energy Storage* 26, 101022. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101022>
- Werner, Timothy T., Mudd, G.M., Jowitt, S.M., 2017. The world's by-product and critical metal resources part II: A method for quantifying the resources of rarely reported metals. *Ore Geology Reviews* 80, 658–675. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.08.008>
- Werner, T. T., Mudd, G.M., Jowitt, S.M., 2017. The world's by-product and critical metal resources part III: A global assessment of indium. *Ore Geology Reviews* 86, 939–956. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.015>
- Wichmann, P., Brintrup, A., Baker, S., Woodall, P., McFarlane, D., 2020. Extracting supply chain maps from news articles using deep neural networks. *International Journal of Production Research* 58, 5320–5336. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1720925>
- Wieland, A., 2013. Selecting the right supply chain based on risks. *Journal of Manufacturing Technology Management* 24, 652–668. <https://doi.org/10.1108/17410381311327954>
- Wieland, A., Marcus Wallenburg, C., 2012. Dealing with supply chain risks: Linking risk management practices and strategies to performance. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 42, 887–905. <https://doi.org/10.1108/09600031211281411>
- Williams, E., 2000. Global Production Chains and Sustainability: The case of high-purity silicon and its applications in IT and renewable energy. <https://doi.org/10.13140/2.1.2705.0562>
- Worldbank, 2023. Trade Logistics in the global economy. The World Bank, Washington, D.C.
- Worldbank, 2022. WGI 2022 Interactive > Interactive Data Access [WWW Document]. URL <https://info.worldbank.org/governance/wgi/Home/Reports> (accessed 8.28.23).
- Xakalashé, B., Tangstad, M., 2011. Silicon processing: from quartz to crystalline silicon solar cells.
- YAMAZAKI, M., 2019. National Survey Report of PV Power Applications in JAPAN. New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).
- Yan, T., Choi, T.Y., Kim, Y., Yang, Y., 2015. A Theory of the Nexus Supplier: A Critical Supplier From A Network Perspective. *Journal of Supply Chain Management* 51, 52–66. <https://doi.org/10.1111/jscm.12070>
- Ylä-Mella, J., Pongrácz, E., 2016. Drivers and Constraints of Critical Materials Recycling: The Case of Indium. *Resources* 5, 34. <https://doi.org/10.3390/resources5040034>
- Yokota, H., 2020. Tokuyama Corporation (4043) . BridgE Report 29.

- Yuan, Y., Yellishetty, M., Muñoz, M.A., Northey, S.A., 2019. Toward a dynamic evaluation of mineral criticality: Introducing the framework of criticality systems. *Journal of Industrial Ecology* 23, 1264–1277. <https://doi.org/10.1111/jiec.12920>
- Zhang, K., Kleit, A.N., Nieto, A., 2017. An economics strategy for criticality – Application to rare earth element Yttrium in new lighting technology and its sustainable availability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77, 899–915. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.127>
- Zhang, S., Ding, Y., Liu, B., Chang, C.-C., 2017. Supply and demand of some critical metals and present status of their recycling in WEEE. *Waste Manag* 65, 113–127. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.003>
- Zheshang, securities, 2022. L'équilibre serré du polysilicium se poursuit, leader en matière de technologie et de coûts pour renforcer la compétitivité de base—Rapport détaillé de Daqo Energy (No. 688303). Institut de recherche sur les valeurs mobilières de Zheshang.
- Zhou, K., Xun, H., 2018. Intelligent decision method for supplier selection. *The Journal of Engineering* 2018, 1682–1687. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8321>
- Zhou, Y., Li, J., Rechberger, H., Wang, G., Chen, S., Xing, W., Li, P., 2020. Dynamic criticality of by-products used in thin-film photovoltaic technologies by 2050. *Journal of Cleaner Production* 263, 121599. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121599>
- Zhou, Y., Li, J., Wang, G., Chen, S., Xing, W., Li, T., 2019. Assessing the short-to medium-term supply risks of clean energy minerals for China. *Journal of Cleaner Production* 215, 217–225. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.064>
- Zimmermann, T., Gößling-Reisemann, S., 2014. Recycling Potentials of Critical Metals-Analyzing Secondary Flows from Selected Applications. *Resources* 3, 291–318. <https://doi.org/10.3390/resources3010291>
- Zimmermann, Y.-S., Niewersch, C., Lenz, M., Kül, Z.Z., Corvini, P.F.-X., Schäffer, A., Wintgens, T., 2014. Recycling of Indium From CIGS Photovoltaic Cells: Potential of Combining Acid-Resistant Nanofiltration with Liquid–Liquid Extraction. *Environ. Sci. Technol.* 48, 13412–13418. <https://doi.org/10.1021/es502695k>
- Zsidisin, G.A., Smith, M.E., 2005. Managing Supply Risk with Early Supplier Involvement: A Case Study and Research Propositions. *Journal of Supply Chain Management* 41, 44–57. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2005.04104005.x>
- Zylberberg, E., 2016. Redefining Brazil's role in information and communication technology global value chains. MIT-IPC Working Paper No. 16–003.

Table des matières

Remerciements	1
Résumé	3
Sommaire	4
1 Introduction générale.....	6
1.1 Cadre de la recherche	6
1.2 Contexte.....	7
1.2.1 Les chaînes d’approvisionnement aujourd’hui	7
1.2.2 Importance de l’industrie électronique.....	8
1.2.3 Vulnérabilités liées à l’approvisionnement en métaux.....	9
1.3 Importance de la recherche.....	11
1.4 Objectif de l’étude	11
1.5 Question de recherche et méthodologie de recherche	12
1.6 Positionnement épistémologique.....	18
1.7 Justification de l’approche de recherche.....	19
1.8 Structure de la thèse.....	20
2 Contextualisation de la recherche.....	23
2.1 Description de la chaîne d’approvisionnement	24
2.1.1 Définition de la chaîne d’approvisionnement	24
2.1.2 Les structures de la chaîne d’approvisionnement.....	26
2.1.3 Les sous-systèmes de la chaîne d’approvisionnement	28
2.1.4 Les dimensions de la chaîne d’approvisionnement.....	28
2.1.5 Analyser la chaîne d’approvisionnement comme un système complexe.....	29
2.1.6 La mondialisation de la chaîne d’approvisionnement.....	31
2.1.7 La visibilité dans la chaîne d’approvisionnement	32
2.1.8 Le management de la chaîne d’approvisionnement	33
2.1.9 Les décisions dans la chaîne d’approvisionnement.....	34
2.1.10 Conclusion.....	35
2.2 Description du contexte industriel.....	37
2.2.1 Présentation de l’industrie électronique	37
2.2.2 Modularité et mondialisation de la chaîne de valeur.....	37
2.2.3 La chaîne de valeur mondiale de l’industrie électronique.....	38
2.2.4 Les acteurs de l’industrie électronique	41
2.2.4.1 Premier modèle	41
2.2.4.2 Second modèle	44
2.2.5 Les industries qui dépendent des métaux.....	44

2.2.6	Conclusion.....	47
2.3	Le concept de risque et la gestion des risques	48
2.3.1	Définition du risque.....	48
2.3.2	Définition de l'incertitude	50
2.3.3	La gestion des risques	51
2.3.3.1	Plusieurs types de management des risques.....	52
2.3.3.2	Processus de gestion des risques.....	53
2.3.4	Conclusion.....	55
2.4	Conclusion de la partie N° 1	55
3	Phase Exploratoire sur la gestion des risques dans les chaînes d'approvisionnement	56
3.1	Introduction	56
3.2	Exploration du domaine de la gestion des risques dans les chaînes d'approvisionnement.....	57
3.2.1	Introduction	57
3.2.2	Méthode de recherche	57
3.2.3	Définition des concepts clés.....	59
3.2.3.1	L'incertitude dans la chaîne d'approvisionnement	59
3.2.3.2	Les risques dans la chaîne d'approvisionnement.....	60
3.2.4	La gestion des risques de la chaîne d'approvisionnement (SCRM).....	62
3.2.4.1	L'importance du SCRM	62
3.2.4.2	Les définitions du SCRM.....	63
3.2.5	Le processus de management des risques dans la chaîne d'approvisionnement	65
3.2.6	Les étapes du processus SCRM	67
3.2.6.1	Identification des risques	67
3.2.6.2	Estimation du risque	71
3.2.6.3	L'évaluation des risques.....	74
3.2.6.4	L'atténuation des risques.....	75
3.2.6.5	La surveillance des risques	76
3.2.7	Les outils utilisés dans le processus SCRM.....	77
3.2.8	Les secteurs industriels.....	79
3.2.9	Discussion	79
3.2.10	Conclusion.....	80
3.3	Exploration du SCRM dédiés aux industries qui dépendent des métaux	82
3.3.1	Introduction	82
3.3.2	Méthode de recherche	82
3.3.3	Les méthodologies de gestion des risques.....	83
3.3.3.1	Les méthodologies dédiées à la chaîne d'approvisionnement	83

3.3.3.2	Méthodologies dédiées au réseau d’approvisionnement.....	83
3.3.3.3	Méthodologies dédiées aux fournisseurs	84
3.3.4	L’étape de l’identification des risques	85
3.3.4.1	L’identification des risques liés à l’ensemble de la chaîne d’approvisionnement.....	86
3.3.4.2	L’identification des risques liés aux fournisseurs	87
3.3.4.3	L’identification des risques liés au réseau d’approvisionnement.....	88
3.3.5	L’étape d’atténuation des risques	89
3.3.6	Les outils de SCRM dans les industries qui dépendent des métaux	90
3.3.7	La cartographie du réseau d’approvisionnement	92
3.3.8	Discussion	93
3.3.9	Conclusion.....	95
3.4	Conclusion de la deuxième partie.....	96
4	Phase exploratoire relative à l’approvisionnement en métaux.....	98
4.1	Introduction	98
4.2	Exploration des crises liées à l’approvisionnement en métaux	99
4.2.1	Introduction	99
4.2.2	Méthode de recherche	99
4.2.3	Analyse des crises dans la chaîne d'approvisionnement en métaux : vulnérabilités et Solutions	100
4.2.3.1	La crise du cobalt (1977-1979).....	100
4.2.3.2	La crise du palladium.....	104
4.2.3.3	La crise des terres rares.....	106
4.2.3.4	Discussion	109
4.2.3.5	Evaluation de la criticité des matières premières : une nouvelle approche proactive face aux crises	110
4.2.3.5.1	L’émergence des études de criticité des matières premières.....	110
4.2.3.6	Les initiatives gouvernementales liées à la criticité des matières premières 112	
4.2.3.6.1	La criticité des matières premières : l’initiative américaine	113
4.2.3.6.2	La criticité des matières premières : l’initiative de la commission européenne.....	119
4.2.3.6.3	Conclusion	124
4.2.3.7	L’importance de la criticité en tant que concept-clé pour la gestion des risques d’approvisionnement.....	124
4.3	Revue de littérature systématique sur les matières critiques et le concept de criticité 128	
4.3.1	Introduction	128
4.3.2	Méthodologie de recherche : revue de littérature systématique.....	128

4.3.3	Analyse descriptive : profils et tendances dans la recherche sur la criticité des matières	131
4.3.3.1	Évolution temporelle de la littérature.....	131
4.3.3.2	Répartition des articles par revue scientifique	131
4.3.3.3	Auteurs et communautés de recherche.....	132
4.3.3.4	Répartition géographique des auteurs : un aperçu mondial	134
4.3.4	Analyse thématique : cartographie et analyse des sujets.....	135
4.3.4.1	Classification des sujets de recherche sur les matières critiques	135
4.3.4.2	Analyse des sujets de recherche sur les matières critiques	137
4.3.4.2.1	Cadre conceptuel de la criticité.....	137
4.3.4.2.2	Evaluation de la criticité	141
4.3.4.2.3	Les stratégies d'atténuation de la criticité.....	153
4.3.4.2.4	Les acteurs et les parties prenantes qui influencent la criticité.....	157
4.3.5	Discussion et conclusion de la revue de littérature systématique	158
4.3.5.1	L'analyse descriptive.....	158
4.3.5.2	L'analyse thématique	159
4.3.5.2.1	Le cadre conceptuel	159
4.3.5.2.2	L'évaluation de la criticité.....	159
4.3.5.2.3	Stratégies d'atténuation de la criticité.....	160
4.3.5.2.4	Les parties prenantes qui influencent la criticité.....	162
4.4	Conclusion de la partie N°4.....	163
5	Élaboration d'une méthodologie pour la sécurisation de l'approvisionnement des métaux	168
5.1	Introduction	168
5.2	La perte de visibilité comme obstacle et vecteur pour une approche de gestion des risques.....	170
5.2.1	La visibilité et la gestion des risques.....	170
5.2.2	La cartographie des flux : outil clé pour améliorer la visibilité	171
5.2.2.1	Caractéristiques des outils de cartographie.....	171
5.2.2.2	Les approches de la cartographie	172
5.2.2.3	Les méthodes de cartographie.....	173
5.2.2.4	Éléments d'informations de base pour la cartographie.....	174
5.2.2.5	Hierarchie des systèmes d'approvisionnement pour l'identification de l'unité d'analyse	174
5.2.2.6	Sources de données pour la cartographie.....	176
5.2.2.7	La cartographie indispensable mais difficile à réaliser	177
5.2.3	La visibilité comme vecteur de la conception de la méthodologie	178

5.2.4	Méthodologie pour cartographier la partie invisible de la chaîne d'approvisionnement d'une ressource X.....	180
5.2.4.1	Les étapes de la démarche de cartographie.....	180
5.2.4.2	Qualité des données secondaires.....	182
5.2.5	Conclusion.....	183
5.3	La complexité comme vecteur d'approche pour la gestion des risques	183
5.3.1	La complexité du système réseau d'approvisionnement.....	184
5.3.2	Stratégie de décomposition du système complexe.....	185
5.3.3	Décomposition du système complexe	187
5.3.3.1	Le système fournisseur	187
5.3.3.2	Le système « structure du réseau »	190
5.3.3.3	Le système ressource	190
5.3.3.4	Interconnexion des systèmes fournisseurs, structure du réseau et ressource	192
5.4	Estimation et évaluation des risques.....	193
5.4.1	Estimation et évaluation autonomes.....	193
5.4.2	Estimation et évaluation basées sur des données externes.....	194
5.4.2.1	Le risque pays du fournisseur (système fournisseur).....	194
5.4.2.2	Risques réglementaires (système structure du réseau).....	196
5.4.2.3	Les risques logistiques (système structure du réseau)	197
5.4.2.4	Risque de concentration (interconnexion des trois systèmes)	198
5.4.2.5	L'indice d'épuisement (système ressource)	199
5.4.2.6	La dépendance au sous-produit (système ressource)	199
5.4.2.7	La croissance de la demande.....	199
5.4.2.8	La dépendance à la production primaire (système ressource)	200
5.4.2.9	Le risque naturel (système fournisseur).....	200
5.5	Analyse des résultats	201
5.5.1	Analyse horizontale du réseau d'approvisionnement.....	201
5.5.2	L'analyse verticale du réseau d'approvisionnement.....	202
5.5.3	Analyse des risques liés à la ressource.....	203
5.6	Traitement des risques	203
5.7	Proposition d'une méthodologie pour la gestion des risques	205
5.8	Conclusion	208
6	Application de la méthodologie au cas de la fabrication des plaquettes de silicium (Raw wafers).....	210
6.1	Introduction	210
6.2	Etape N° 1 : l'importance des Raw wafers	211
6.2.1	Chaîne de valeur de l'industrie des semi-conducteurs.....	212

6.2.2	Importance des semi-conducteurs	215
6.2.3	La substitution du Raw wafer.....	217
6.3	Etape N° 2 : Cartographie du réseau d’approvisionnement du Raw wafer	218
6.3.1	Description du processus de production du Raw wafer	218
6.3.1.1	Production du silicium-métal de qualité métallurgique (MGS).....	219
6.3.1.2	Production du polysilicium de qualité électronique (EGP)	221
6.3.1.3	Fabrication du Raw wafer	222
6.3.1.4	Processus industriels de la fabrication du Raw wafer.....	223
6.3.2	Identification des industries	224
6.3.3	Identification des acteurs clés et des liaisons	225
6.3.3.1	Les producteurs du Raw wafer	225
6.3.3.2	Les producteurs de polysilicium électronique (EGP)	229
6.3.3.3	Les producteurs du silicium-métal.....	233
6.3.4	Construction de la cartographie.....	237
6.4	Etape N° 3 : Estimation et évaluation des risques	240
6.4.1	Les risques naturels	241
6.4.2	Les risques pays	242
6.4.3	Les risques réglementaires	243
6.4.4	Risques logistiques.....	244
6.4.5	Risques liés à la ressource	246
6.4.6	Risque de concentration	247
6.4.6.1	La concentration de la production du silicium-métal.....	247
6.4.6.2	Concentration de la production de l’EGP	248
6.4.6.3	Concentration de la production du Raw wafer.....	248
6.5	Etape N° 4 : Analyse des risques	249
6.5.1	Analyse horizontale du réseau d’approvisionnement.....	249
6.5.2	Analyse verticale du réseau d’approvisionnement.....	253
6.5.2.1	Production du silicium-métal	253
6.5.2.2	Production de l’EGP	255
6.5.2.3	Production du Raw wafer.....	257
6.5.3	Analyse des risques liés à la ressource	258
6.5.4	Synthèse de l’analyse des risques dans le réseau d’approvisionnement	259
6.6	Etape N° 5 : Mitigation des risques	260
6.6.1	Stratégies basées sur l’analyse verticale.....	260
6.6.2	Stratégies basées sur l’analyse horizontale	261
6.6.3	Stratégies de mitigation basées sur l’analyse à long terme du système ressource	261

6.7	Conclusion	261
7	Discussion et conclusion	264
7.1	Rappel de la question de recherche	264
7.2	Synthèse des résultats	264
7.3	Contributions de la recherche	267
7.3.1	Contributions théoriques	267
7.3.2	Contribution managériale	268
7.4	Limites de la recherche	269
7.5	Orientation pour les futures recherches	270
	Références	271
	Table des matières	304
	Liste des figures	311
	Liste des tableaux	313
	Annexes	315
	Annexe N°1 : Tableau des définitions de la chaîne d’approvisionnement.....	315
	Annexe N°2 : Tableau des catégories de risques liés à la chaîne d’approvisionnement	317
	Annexe N° 3 : Analyse synthétique des contributions de la recherche en SCRM dans les industries qui dépendent des métaux.....	319
	Annexe N°4 : synthèse de la revue de littérature systématique sur domaine de la criticité des matière et matières critiques	325

Liste des figures

Tableau 1 : Les plus grandes entreprises leaders dans l'industrie électronique.....	42
Tableau 2 : Les grandes entreprises sous contrat dans l'industrie électronique	43
Tableau 3 : Synthèse des études sélectionnées et leurs principales contributions.....	58
Tableau 4 : Les définitions du risque lié à la chaîne d'approvisionnement	61
Tableau 5 : Synthèse des définitions du SCRM	64
Tableau 6: L'évaluation semi-quantitative.....	73
Tableau 7 : La matrice de criticité des risques	74
Tableau 8 : Éléments sélectionnés pour le cadre de classification de l'étude.....	136
Tableau 9 : Evaluation de la criticité des matières dédiée à GE.....	142
Tableau 10 : Caractéristique de la métrologie de la criticité des matières proposée par (Graedel et al., 2012).....	143
Tableau 11 : Les facteurs du risque d'approvisionnement	150
Tableau 12 : Revue de littérature sur les facteurs du risque d'approvisionnement.....	151
Tableau 13 : Les études spécifiques à un facteur de criticité	151
Tableau 14 : Les études sur la future demande.	153
Tableau 15 : Impact de la restriction d'une ressource pour GE	170
Tableau 16 : Risques internes du système "fournisseur"	188
Tableau 17 : Risques relationnels du système "fournisseur"	189
Tableau 18 : Risques externes du système "fournisseur"	189
Tableau 19 : Risques du système "structure du réseau"	190
Tableau 20 : les niveaux de risque.....	194
Tableau 21 : Evaluation des indicateurs de gouvernance.....	196
Tableau 22 : Evaluation des risques réglementaires.....	197
Tableau 23 : Evaluation des composants de l'indice de performance logistique.....	197
Tableau 24 : Estimation et évaluation du risque de concentration	198
Tableau 25 : Evaluation de l'indicateur WRI et ses dimensions.....	201
Tableau 26 : Les fabricants majeurs du Raw wafer.....	227
Tableau 27 : Les fabricants du polysilicium (EGP)	233
Tableau 28 : Les producteurs du silicium métal.....	237
Tableau 29 : Synthèse des risques, indicateurs et base de données.....	240
Tableau 30 : Estimation et évaluation des risques naturels pour l'étape de production du Silicium-métal	241
Tableau 31 : Estimation et évaluation des risques naturels pour l'étape de production de l'EGP	241
Tableau 32 : Estimation et évaluation des risques naturels pour l'étape de production du Raw wafer.....	242
Tableau 33 : Estimation et évaluation des risques pays pour l'étape de production du Silicium- métal	242
Tableau 34 : Estimation et évaluation des risques pays pour l'étape de production de l'EGP	243
Tableau 35 : Estimation et évaluation des risques pays pour l'étape de production du Raw wafer.....	243
Tableau 36 : Présence de Sanctions économiques et financières	244
Tableau 37 : Estimation et évaluation de la performance logistique pour l'étape de production du silicium-métal.....	245
Tableau 38 : Estimation et évaluation de la performance logistique pour l'étape de production du EGP	245

Tableau 39 : Estimation et évaluation de la performance logistique pour l'étape de production du Raw wafer	246
Tableau 40 : Evaluation des risques liés à la ressource	246
Tableau 41 : Estimation et évaluation du risque de concentration dans les trois industries (silicium-métal, EGP et Raw wafer)	249
Tableau 42 : Synthèse des niveaux de risques pour la production du silicium-métal	250
Tableau 43 : Synthèse des niveaux de risques pour la production de l'EGP	250
<i>Tableau 44 : Synthèse des niveaux de risques pour la production du Raw wafer</i>	<i>250</i>
Tableau 45 : Estimation des risques pour le chemin Russie-Chine-Italie	252
Tableau 46 : Les trois chemins les plus critiques	252
Tableau 47 : les composants des possibilités des chemins les moins critiques	252

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les plus grandes entreprises leaders dans l'industrie électronique.....	42
Tableau 2 : Les grandes entreprises sous contrat dans l'industrie électronique	43
Tableau 3 : Synthèse des études sélectionnées et leurs principales contributions.....	58
Tableau 4 : Les définitions du risque lié à la chaîne d'approvisionnement	61
Tableau 5 : Synthèse des définitions du SCRM	64
Tableau 6: L'évaluation semi-quantitative.....	73
Tableau 7 : La matrice de criticité des risques	74
Tableau 8 : Éléments sélectionnés pour le cadre de classification de l'étude.....	136
Tableau 9 : Evaluation de la criticité des matières dédiée à GE.....	142
Tableau 10 : Caractéristique de la métrologie de la criticité des matières proposée par (Graedel et al., 2012).....	143
Tableau 11 : Les facteurs du risque d'approvisionnement	150
Tableau 12 : Revue de littérature sur les facteurs du risque d'approvisionnement.....	151
Tableau 13 : Les études spécifiques à un facteur de criticité	151
Tableau 14 : Les études sur la future demande.	153
Tableau 15 : Impact de la restriction d'une ressource pour GE	170
Tableau 16 : Risques internes du système "fournisseur"	188
Tableau 17 : Risques relationnels du système "fournisseur"	189
Tableau 18 : Risques externes du système "fournisseur"	189
Tableau 19 : Risques du système "structure du réseau"	190
Tableau 20 : les niveaux de risque.....	194
Tableau 21 : Evaluation des indicateurs de gouvernance.....	196
Tableau 22 : Evaluation des risques réglementaires.....	197
Tableau 23 : Evaluation des composants de l'indice de performance logistique.....	197
Tableau 24 : Estimation et évaluation du risque de concentration	198
Tableau 25 : Evaluation de l'indicateur WRI et ses dimensions.....	201
Tableau 26 : Les fabricants majeurs du Raw wafer.....	227
Tableau 27 : Les fabricants du polysilicium (EGP)	233
Tableau 28 : Les producteurs du silicium métal.....	237
Tableau 29 : Synthèse des risques, indicateurs et base de données.....	240
Tableau 30 : Estimation et évaluation des risques naturels pour l'étape de production du Silicium-métal	241
Tableau 31 : Estimation et évaluation des risques naturels pour l'étape de production de l'EGP	241
Tableau 32 : Estimation et évaluation des risques naturels pour l'étape de production du Raw wafer.....	242
Tableau 33 : Estimation et évaluation des risques pays pour l'étape de production du Silicium- métal	242
Tableau 34 : Estimation et évaluation des risques pays pour l'étape de production de l'EGP	243
Tableau 35 : Estimation et évaluation des risques pays pour l'étape de production du Raw wafer.....	243
Tableau 36 : Présence de Sanctions économiques et financières	244
Tableau 37 : Estimation et évaluation de la performance logistique pour l'étape de production du silicium-métal.....	245
Tableau 38 : Estimation et évaluation de la performance logistique pour l'étape de production du EGP	245

Tableau 39 : Estimation et évaluation de la performance logistique pour l'étape de production du Raw wafer	246
Tableau 40 : Evaluation des risques liés à la ressource	246
Tableau 41 : Estimation et évaluation du risque de concentration dans les trois industries (silicium-métal, EGP et Raw wafer)	249
Tableau 42 : Synthèse des niveaux de risques pour la production du silicium-métal	250
Tableau 43 : Synthèse des niveaux de risques pour la production de l'EGP	250
<i>Tableau 44 : Synthèse des niveaux de risques pour la production du Raw wafer</i>	<i>250</i>
Tableau 45 : Estimation des risques pour le chemin Russie-Chine-Italie	252
Tableau 46 : Les trois chemins les plus critiques	252
Tableau 47 : les composants des possibilités des chemins les moins critiques	252

Annexes

Annexe N°1 : Tableau des définitions de la chaîne d'approvisionnement

Auteur	Définition
(Hassan, 2006)	Un réseau d'entités formé par des entreprises de divers domaines pour les aider à gérer leurs produits et services
(Mabert and Venkataramanan, 1998).	Selon l'esprit du concept de chaîne de valeur c'est « le réseau d'installations et d'activités qui remplit les fonctions de développement de produits, d'approvisionnement en matériel auprès des fournisseurs, de déplacement de matériel entre les installations, de fabrication de produits, de distribution de produits finis aux clients et de soutien après-vente »
(Borade and Bansod, 2007)	Un réseau d'installations et de canaux de distribution qui englobe l'approvisionnement en matériaux, la production, l'assemblage et la livraison du produit ou du service au client
(Lee and Billington, 1993)	Un réseau d'installations qui effectue les fonctions d'approvisionnement en matières premières, de transformation de ces matières en produits finis et/ou composants, ainsi que la distribution de ces derniers jusqu'aux clients.
(Fiala, 2005)	Un système de fournisseurs, de fabricants, de distributeurs, de détaillants et de clients où les flux matériels, financiers et d'informations relient les participants dans les deux sens
(Genin, 2003)	Un réseau d'organisations ou de fonctions géographiquement dispersées sur plusieurs sites qui coopèrent, pour réduire les coûts et augmenter la vitesse des processus et activités entre les fournisseurs et les clients. Si l'objectif de satisfaction du client est le même, la complexité varie d'une chaîne logistique à l'autre
(Khemiri, 2017)	C'est un ensemble d'organisations géographiquement dispersées coopérant via des flux matériels, informationnels et financiers. Cette coopération assure l'approvisionnement des matières premières, les différents processus de transformation de ces matières premières jusqu'à l'obtention des produits finis, ainsi que la distribution de ces derniers jusqu'aux clients finaux. L'objectif d'une telle organisation correspond bien à la satisfaction du client.
(Mouloua, 2007)	C'est l'ensemble des opérations réalisées pour la fabrication d'un produit ou d'un service allant de l'extraction de la matière première à la livraison au client final, en passant par les étapes de transformation, de stockage, et de distribution
(Tayur et al., 1999)	Un système de sous-traitants, de producteurs, de distributeurs, de détaillants et de clients entre lesquels s'échangent les flux matériels dans le sens des fournisseurs vers les clients, et des flux d'information dans les deux sens.

(Lambert et al., 1998)	Une chaîne logistique est l'ensemble des firmes qui amènent des produits ou des services sur le marché.
(Govil and Proth, 2002)	La chaîne logistique est un réseau global d'organisations qui coopèrent afin d'améliorer les flux des matériels et des informations entre les fournisseurs et les clients au plus bas coût et à la plus grande vitesse. L'objectif de la chaîne logistique est la satisfaction du client.
(Chopra et al., 2007)	Toutes les étapes impliquées directement ou indirectement dans la satisfaction de la requête d'un client. La chaîne logistique inclut non seulement le fabricant et ses fournisseurs, mais aussi les transporteurs, les centres d'entreposage, les détaillants et les clients eux-mêmes.
(Rota et al., 2001)	L'ensemble des entreprises qui interviennent dans les processus de fabrication, de distribution et de vente du produit, du premier des fournisseurs au client ultime.
(Ganeshan and Harrison, 1995)	C'est le réseau des moyens de production et de distribution qui assurent les tâches d'approvisionnement en matières premières, la transformation de ces matières premières en produits semi-finis et en produits finis, et la distribution de ces produits finis aux clients.
(Mrabet et al., 2017)	Un réseau complexe mais maillé d'installations et d'options de distribution qui remplit les fonctions d'approvisionnement en matériaux, de transformation de ces matériaux en produits intermédiaires et finis, et de distribution des produits finis aux clients. Il se caractérise par des interactions dynamiques entre les entreprises et les organisations, et par l'échange de matériaux, de moyens financiers et d'informations.
(Vilko et al., 2014)	Comprend une série d'activités et d'organisations à travers lesquelles les matériaux et les informations sont acheminés vers le client final
(Christopher and Peck, 2004)	Le réseau d'organisations qui participent, par des liens en amont et en aval, aux différents processus et activités qui produisent de la valeur sous la forme de produits et de services dans les mains du consommateur final.

Annexe N°2 : Tableau des catégories de risques liés à la chaîne

d'approvisionnement

Auteurs	Types de sources/facteurs de risques
(Harland et al., 2003b)	Stratégiques, opérationnels, d'approvisionnement, liés aux clients, d'altération des actifs, concurrentiels, de réputation, financiers, fiscaux, réglementaires et juridiques.
(Chopra and Sodhi, 2004)	Perturbations, de retards, de systèmes, de prévisions, de propriété intellectuelle, d'approvisionnement, de créances clients, de stocks et de capacité.
(Christopher and Peck, 2004)	Extérieur au réseau : risque environnemental Externe à l'entreprise mais interne au réseau de la chaîne d'approvisionnement : risques liés à la demande et à l'offre Interne à l'entreprise : risques liés au processus et au contrôle
(Tang, 2006)	Risques opérationnels : demande incertaine des clients, offre incertaine et coût incertain Risques de perturbation : tremblements de terre, inondations, ouragans, attaques terroristes, crises économiques.
(Manuj and Mentzer, 2008b)	Risques liés à l'offre, à la demande, aux opérations et autres
(Trkman and McCormack, 2009)	Risques endogènes : turbulences du marché et de la technologie Risques exogènes : événements discrets (par exemple, attaques terroristes, maladies contagieuses, grèves des travailleurs) et risques continus (par exemple, taux d'inflation, variations de l'indice des prix à la consommation)
(Tang and Nurmaya Musa, 2011)	Risques liés aux flux de matières, aux flux financiers et aux flux d'informations
(Tummala and Schoenherr, 2011)	Risques liés à la demande, aux retards, aux perturbations, aux stocks, aux pannes de fabrication (processus), aux installations physiques (capacité), à l'approvisionnement, aux systèmes, à la souveraineté et au transport.
(Ho et al., 2015b)	Le risque macroéconomique, le risque lié à la demande, le risque lié à la fabrication, le risque lié à l'approvisionnement et le risque lié aux infrastructures

	(risque lié à l'information, risque lié au transport et risque financier)
<i>(Rao and Goldsby, 2009)</i>	Risque environnemental (politique, social, macroéconomique), risque de l'industrie (marché des intrants)
<i>(Hudnurkar et al., 2017)</i>	Caractéristiques des produits, processus de gestion de la chaîne d'approvisionnement, infrastructure de la chaîne d'approvisionnement, environnement externe, ressources humaines
<i>(Kleindorfer and Saad, 2005)</i>	Éventualités opérationnelles (y compris les défaillances d'équipement et les défaillances systémiques), risques naturels (tremblements de terre, ouragans et tempêtes), terrorisme et instabilité politique
<i>(Kiser and Cantrell, 2006)</i>	Risques internes (risques liés à la fabrication, aux activités, à la planification et au contrôle, à l'atténuation et aux mesures d'urgence) et risques externes (risques liés à la demande, à l'offre, à l'environnement, aux activités et aux installations physiques)
<i>(Wagner and Bode, 2008)</i>	Côté demande, côté offre, réglementaire, juridique et bureaucratique, infrastructure et catastrophique
<i>(Qazi et al., 2015)</i>	Risques organisationnels, risques de réseau, risques externes

Annexe N° 3 : Analyse synthétique des contributions de la recherche en SCRM dans les industries qui dépendent des métaux

Industrie	Auteur	Contribution	Outils SCRM	Risques
Automobile	(Blackhurst et al., 2008)	Méthodologie d'évaluation des risques Fournisseurs et risques pièces	Evaluation : analyse multicritère	Les risques étudiés dans la phase test : <i>Perturbations/catastrophes</i> (Tremblement de terre, incendies, inondations, disponibilité de la main-d'œuvre, conflit au travail, problèmes politiques, faillite d'un fournisseur, guerre et terrorisme). <i>Qualité</i> (Défauts/million, Facilité de résolution des problèmes, Complexité du produit, Délais des actions correctives, Valeur du produit)
	(Ceryno et al., 2015)	Identification des facteurs de risques, des sources de risques et d'événements de risque Établissement de profil de risque pour l'industrie automobile	Identification : analyse des risques réels manifestés le long de différentes chaînes d'approvisionnement.	Facteurs de risques : concentration des fournisseurs Sources de risques : environnementale, industriels, réseaux d'approvisionnement Événements de risque : crise économique, réforme, fluctuations de la demande, incapacité fournisseur,
	(Kull and Talluri, 2008)	Méthodologie d'évaluation fournisseurs sur la base des risques liés à la chaîne d'approvisionnement	Évaluation : processus de hiérarchie analytique (AHP) et de programmation des objectifs (GP)	Les risques d'approvisionnement : les risques d'approvisionnement pour une entreprise sont principalement associés aux défaillances de livraison, de coût, de qualité, de flexibilité et de confiance générale
	(Trkman and McCormack, 2009)	Evaluation des risques liés au fournisseur Basé sur les caractéristiques SC, sa structure et les attributs et performances d'un fournisseur, facteurs de risques	Un modèle conceptuel	Risques d'approvisionnement Incertitudes endogènes (turbulences du marché, turbulences technologiques) Incertitude exogène (risque continu, événements discrets)

	(Wagner et al., 2009)	Étudier le risque du défaut financier des fournisseurs et déterminer les conséquences pour les stratégies d'approvisionnement des entreprises acheteuses.		Le défaut financier des fournisseurs
	(Alitosa and Kusumah, 2019)	Méthodologie pour identifier, analyser et atténuer les risques	Identification : le modèle SCOR Evaluation : modèle "House of Risk" (HOR)	Planification, Approvisionnement, Création, Livraison et Retours Atténuation : supervision des subordonnés, améliorer la performance production et procédure de contrôle des stocks, , programmation de la maintenance, modifier contrat fournisseurs, gestion de la qualité total et audit des fournisseurs)
Électronique/automobile	(Blos et al., 2009)	Identifier les risques de la chaîne d'approvisionnement dans les industries automobile et électronique.	Identification : chaîne d'approvisionnement vulnerability map	Vulnérabilités (financières, stratégiques, dangers, opérations)
Électronique	(Chen and Wu, 2013)	Méthodologie d'évaluation des risques Fournisseurs pour la sélection des fournisseurs	Evaluation : méthode d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets modifiée (MFMEA) Processus hiérarchique analytique (AHP) pour définir le poids des critères	Les risques de défaillances : Critères (coût, qualité, faisabilité, technologie, productivité, service)
	(Jansson and Norrman, 2004)	Décrire l'organisation, les processus et les outils de SCRM dans l'entreprise Ericsson	Evaluation fournisseur : (ERMET) Ericsson Supplier Relationship Management Tool	

		Identification et évaluation des risques, évaluation des fournisseurs atténuation des risques la gestion de la continuité d'activité		
	(Sodhi and Lee, 2007)	Identification des risques et des stratégies d'atténuation des risques liés à la chaîne d'approvisionnement dans l'entreprise Samsung électroniques		<p>Risques liés à l'offre (risques politiques, fusions et acquisitions, catastrophes naturelles et guerres, terrorisme, risques liés à la capacité, propriété intellectuelle, approvisionnement unique, retards des fournisseurs, qualité de la production, stocks)</p> <p>Risques liés à la demande (réputation, technologie et concurrence, changements dans les préférences des clients, risques liés aux prévisions, possibilité d'une récession mondiale, risques liés aux créances)</p> <p>Risques contextuels (différences culturelles,</p> <p>Risques environnementaux et coûts de mise en conformité, respect des réglementations, risques financiers liés aux taux de change, risques liés aux systèmes).</p> <p>Stratégies d'atténuation :</p> <p>Relations étroites avec les fournisseurs, y compris l'intégration de l'information, Usines et fournisseurs sur plusieurs sites, Recherche au Samsung Economic Research Institute, Investissement massif en R&D, Fabrication interne pour toutes les technologies de base; Relations étroites avec les fournisseurs, Mesures incitatives pour les fournisseurs et les gestionnaires; Visibilité mondiale</p>

	(Archie Lockamy III, 2017)	Identifier et évaluer les risques externes pour les principaux fournisseurs de la société Apple Inc. Création de profil de risque fournisseur	Evaluation : les réseaux bayésiens	Les risques externes Risque pays, risque lié au climat des affaires, risque commercial, risque logistique, risque de corruption
	(Harland et al., 2003a)	Processus SCRM dédié aux risques des réseaux d'approvisionnement		Types de pertes (financières, de performance, physiques, sociales, psychologiques, temporelles)
	(Basole and Bellamy, 2014b)	Visualisation des réseaux d'approvisionnement pour la visibilité Analyse des dépendances et les flux complexes au sein du réseau d'approvisionnement.	Cartographie : analyse de réseau et visualisation de l'information. Logiciel Gephi	Risque financier, Risque opérationnel
	(K.T. et al., 2020)	Méthodologie pour évaluer les risques globaux liés à l'approvisionnement et leur interrelation dans la chaîne d'approvisionnement électronique en inde	Evaluation : L'approche DEMATEL (Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory) et l'ANP (analytical network process)	Risque environnemental, risque produit, risque fournisseur, performance fournisseur, risque relationnel, risques liés aux réseau)
	(Basole et al., 2016)	Identifier les risques et déterminer les voies potentielles de leur diffusion dans le réseau d'approvisionnement mondial Déterminer l'influence de la visibilité du réseau	Modèle de simulation informatique Évaluation Modèle de Markov Cartographie : logiciel Gephi,	Risques liés aux réseaux d'approvisionnement (risque Financier)

		d'approvisionnement sur la diffusion des risques		
	(Zhou and Xun, 2018)	Méthodologie d'évaluation des risques Fournisseurs pour la sélection des fournisseurs Analysant la relation entre les facteurs de risque	Evaluation: Fuzzy analytic network process (ANP) Logiciel MATLAB	Les risques externes : la géographie, la concentration industrielle, la politique et le marché Capacité (flexibilité, rapidité, équipement) , Coût (prix , contrats), Développement (ressources humaines, situation financière, niveau technique de l'entreprise), Performance (qualité , livraison, service), Opportunisme (statut de l'industrie, réputation de l'industrie).
<i>Aéronautique/ Aérospatiale</i>	(Zsidisin and Smith, 2005)	Étude de cas d'intégration du fournisseur dans l'étape de conception		Coûts excessifs, responsabilités juridiques, problèmes de qualité, contraintes de capacité des fournisseurs, allongement des délais de développement des produits, incapacité à gérer les changements de conception des produits, problèmes de leadership organisationnel des fournisseurs.
	(Raj Sinha et al., 2004)	Méthodologie d'évaluation des risques Fournisseurs Atténuation des risques fournisseurs	Cartographie, méthode IDEF0 Identification : remue-méninges Évaluation : analyse des modes de défaillance et des effets	Risques possibles : Normes (conflit dans les métriques utilisées, manque de terminologie commune, conflit dans les exigences des OEM, différence dans les normes de communication) Fournisseur (Dépendance vis-à-vis du fournisseur, manque de disponibilité des matières premières, non-respect des délais de livraison, mauvaise qualité) Technologie (manque de capacité, manque de transparence des informations) Pratiques (Compétition basée sur les coûts, dépendance à l'ingénierie séquentielle, détention excessive d'inventaire, risque lié aux contrats à court terme)

	(Tang et al., 2009)	Identifier les risques et les stratégies d'atténuation des risques dans le cas de développement d'un nouveau produit, cas Boeing		Facteurs de risque : technologie, approvisionnement, processus, gestion, main-d'œuvre, demande (client) Stratégies de mitigation (Acquisition d'unités de partenaires stratégiques pour reprendre le contrôle de la chaîne d'approvisionnement, Envoi de personnel sur les sites de production pour une gestion directe des fournisseurs, Révision du processus de sous-assemblage en réalisant certaines étapes en interne, Nomination d'un responsable spécialisé en gestion de la chaîne d'approvisionnement pour renforcer la coordination.)
--	---------------------	--	--	---

Annexe N°4 : synthèse de la revue de littérature systématique sur domaine de la criticité des matière et matières critiques

Auteur	Titre	Thème de recherche	Système
(Glöser et al., 2015)	<i>“Raw material criticality in the context of classical risk assessment”</i>	Cadre conceptuel	/
(Peck et al., 2015)	<i>“Critical materials from a product design perspective”</i>	Cadre conceptuel	/
(Schellens and Gisladdottir, 2018)	<i>“Critical Natural Resources: Challenging the Current Discourse and Proposal for a Holistic Definition”</i>	Cadre conceptuel	/
(Reller, 2011)	<i>“Criticality of metal resources for functional materials used in electronics and microelectronics”</i>	Cadre conceptuel	/
(Sykes et al., 2016a)	<i>“Discovery, supply and demand: From Metals of Antiquity to critical metals”</i>	Cadre conceptuel	/
(Mueller et al., 2017)	<i>“A framework for evaluating the accessibility of raw materials from end-of-life products and the Earth’s crust”</i>	Cadre conceptuel	/
(Hancock et al., 2018)	<i>“In the lab: New ethical and supply chain protocols for battery and solar alternative energy laboratory research policy and practice”</i>	Cadre conceptuel	/
(Lee et al., 2020)	<i>“Reviewing the material and metal security of low-carbon energy transitions”</i>	Cadre conceptuel	/
(Duclos et al., 2010)	<i>“Design in an era of Constrained Resources”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Enterprise, General Electric
(Giurco et al., 2012)	<i>“Resource Criticality and Commodity Production Projections”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Métaux en Australie (charbon, cuivre, or, fer/acier, lithium, phosphore)
(Graedel et al., 2012)	<i>“Methodology of Metal Criticality Determination”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Global, national, entreprise
(Knašytė et al., 2012)	<i>“Economic Importance, Environmental and Supply Risks on Imported Resources in Lithuanian Industry”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	(Produits chimiques, bois, métal) en Lituanie
(Nassar et al., 2012)	<i>“Criticality of the Geological Copper Family”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Famille de cuivre pour le pays États-Unis, pour l'industrie et pour une entreprise (fictive)
(Nieto et al., 2013)	<i>“Addressing criticality for rare earth elements in petroleum refining: The key supply factors approach”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Criticité des terres rares dans le procédé de craquage catalytique fluide pour les États-Unis

(Nuss et al., 2014)	<i>“Criticality of Iron and Its Principal Alloying Elements”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Le fer et ses principaux éléments d'alliage pour Global et États-Unis
(Roelich et al., 2014)	<i>“Assessing the dynamic material criticality of infrastructure transitions: A case of low carbon electricity”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Néodyme pour l'électricité à faible émission de carbone au Royaume-Uni, en se concentrant sur les éoliennes.
(Simon et al., 2014)	<i>“Criticality of metals for electrochemical energy storage systems – Development towards a technology specific indicator”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Matières premières pour les matières électrochimiques actives utilisées par les batteries lithium-ion (LIB)
(Graedel et al., 2015a)	<i>“Criticality of metals and metalloids”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	62 métaux et métalloïdes pour Global et États-Unis
(Harper et al., 2015a)	<i>“The criticality of four nuclear energy metals”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Quatre métaux d'énergie nucléaire pour les États-Unis et niveau global
(Harper et al., 2015b)	<i>“Criticality of the Geological Zinc, Tin, and Lead Family”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Zinc, Etain, et famille du plomb pour la portée globale et portée pays États-Unis
(Hatayama and Tahara, 2015)	<i>“Criticality Assessment of Metals for Japan's Resource Strategy”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	22 matériaux au Japon en 2012
(Nassar et al., 2015a)	<i>“Criticality of the Rare Earth Elements”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	REE pour les marchés mondiaux, américains et chinois
(Sonderregger et al., 2015)	<i>“Criticality of Water: Aligning Water and Mineral Resources Assessment”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Scores de criticité de l'eau pour 159 pays
(Glöser-Chahoud et al., 2016)	<i>“Taking the Step towards a More Dynamic View on Raw Material Criticality: An Indicator Based Analysis for Germany and Japan”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Matériel pour l'Allemagne et le Japon
(Hallstedt et al., 2016)	<i>“MATERIAL CRITICALITY METHOD-PRODUCT VULNERABILITY FROM A SUSTAINABLE BUSINESS PERSPECTIVE”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Portée produit
(Bortnikov et al., 2016)	<i>“Mineral Resources of High-Tech Metals in Russia: State of the Art and Outlook”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Matériaux en Russie

(Ciacci et al., 2016)	<i>“Metal Criticality Determination for Australia, the US, and the Planet—Comparing 2008 and 2012 Results”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Aluminium, fer, nickel, cuivre, zinc et indium » pour États-Unis Australie 2008 et 2012
(Miehe et al., 2016)	<i>“Criticality of Material Resources in Industrial Enterprises – Structural Basics of an Operational Model”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Entreprise
(Panousi et al., 2016)	<i>“Criticality of Seven Specialty Metals”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Scandium ; strontium ; antimoine ; baryum; mercure; thallium ; et bismuth pour Global et États-Unis
(Bach et al., 2017)	<i>“Enhancing the assessment of critical resource use at the country level with the SCARCE method – Case study of Germany”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Matériaux de l'Allemagne
(Blengini et al., 2017)	<i>“EU methodology for critical raw materials assessment: Policy needs and proposed solutions for incremental improvements”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Portée union européenne
(Hallstedt and Isaksson, 2017)	<i>“Material criticality assessment in early phases of sustainable product development”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Portée produit
(Helbig et al., 2017)	<i>“Benefits of resource strategy for sustainable materials research and development”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	YMnO ₃
(Ioannidou et al., 2017)	<i>“Is gravel becoming scarce? Evaluating the local criticality of construction aggregates”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Criticité du sable et du gravier pour les 27 cantons de Suisse et les 96 départements de France
(McCullough and Nassar, 2017)	<i>“Assessment of critical minerals: updated application of an early-warning screening methodology”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Portée États-Unis
(Daw, 2017)	<i>“Security of mineral resources: A new framework for quantitative assessment of criticality”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Lithium, France entre 2009 et 2014.
(Calvo et al., 2018)	<i>“Thermodynamic Approach to Evaluate the Criticality of Raw Materials and Its Application through a Material Flow Analysis in Europe”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Union européenne (plusieurs matériaux)
(Knobloch et al., 2018)	<i>“From criticality to vulnerability of resource supply: The case of the automobile industry”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Voitures particulières fabriquées dans le monde en 2012

(Kolotzek et al., 2018)	<i>“A company-oriented model for the assessment of raw material supply risks, environmental impact and social implications”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Sélection de condensateur au niveau de l'entreprise
(Malinauskiene et al., 2018)	<i>“Geostrategic Supply Risk and Economic Importance as Drivers for Implementation of Industrial Ecology Measures in a Nitrogen Fertilizer Production Company”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Production d'engrais azotés au niveau de l'entreprise
(Miyamoto et al., 2019a)	<i>“Evaluating Metal Criticality for Low-Carbon Power Generation Technologies in Japan”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Matière première pour la production d'énergie à faible teneur en carbone au Japon
(Song et al., 2019)	<i>“Material flow analysis on critical raw materials of lithium-ion batteries in China”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	9 matériaux contenus dans les batteries lithium-ion en Chine
(Sun et al., 2019)	<i>“Supply risks of lithium-ion battery materials: An entire supply chain estimation”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Batterie lithium-ion (LIB) (lithium (Li), cobalt (Co), nickel (Ni) et manganèse (Mn))
(Ferro and Bonollo, 2019a)	<i>“Materials selection in a critical raw materials perspective”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Fourches pour vélo (alliages de magnésium, alliages de titane, alliages d'aluminium et aciers)
(Ioannidou et al., 2019b)	<i>“Evaluating the risks in the construction wood product system through a criticality assessment framework”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Le bois en France et aux USA
(Martins and Castro, 2019)	<i>“Significance ranking method applied to some EU critical raw materials in a circular economy – priorities for achieving sustainability”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Union européenne
(Yuan et al., 2019)	<i>“Toward a dynamic evaluation of mineral criticality: Introducing the framework of criticality systems”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Platine
(Arendt et al., 2020)	<i>“Criticality assessment of abiotic resource use for Europe– application of the SCARCE method”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	42 ressources abiotiques dans l'UE
(Zhou et al., 2020)	<i>“Dynamic criticality of by-products used in thin-film photovoltaic technologies by 2050”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	Germanium, indium, tellure, sélénium, gallium et cadmium dans les technologies de film mince.
(Helbig et al., 2021b)	<i>“Selecting and prioritizing material resources by criticality assessments”</i>	Approches pour l'évaluation de la criticité	

(Rosenau-Tornow et al., 2009)	<i>“Assessing the long-term supply risks for mineral raw materials—a combined evaluation of past and future trends”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Cuivre
(Moss et al., 2013)	<i>“The potential risks from metals bottlenecks to the deployment of Strategic Energy Technologies”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Le Plan stratégique pour les technologies énergétiques (SET) de l’Union européenne
(Simoes et al., 2015)	<i>“Assessing critical metal needs for a low carbon energy system in 2050”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Matériaux pour les technologies électriques à faible émission de carbone au Portugal
(Beylot and Villeneuve, 2015)	<i>“Assessing the national economic importance of metals: An Input–Output approach to the case of copper in France”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Le cuivre en France pour l'année 2008
(Bustamante and Gaustad, 2015)	<i>“Price volatility in PV-critical material markets: Perspectives for solar firms, consumers, and policy makers”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Sous-produit sur le marché photovoltaïque
(Kim et al., 2015, p. 27)	<i>“Critical and precious materials consumption and requirement in wind energy system in the EU 27”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Matériaux dans le système d’énergie éolienne dans l’UE 27
(Mayer and Gleich, 2015)	<i>“Measuring Criticality of Raw Materials: An Empirical Approach Assessing the Supply Risk Dimension of Commodity Criticality”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Métaux
(Nansai et al., 2015)	<i>“Global Mining Risk Footprint of Critical Metals Necessary for Low-Carbon Technologies: The Case of Neodymium, Cobalt, and Platinum in Japan”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Cobalt, platine et néodyme au Japon
(Nassar et al., 2015b)	<i>“By-product metals are technologically essential but have problematic supply”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	62 métaux et métalloïdes
(Speirs et al., 2015)	<i>“Uncertainty in the availability of natural resources: Fossil fuels, critical metals and biomass”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	/
(Viebahn et al., 2015)	<i>“Assessing the need for critical minerals to shift the German energy system towards a high proportion of renewables”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Matériaux dans le système énergétique en allemand
(Choi et al., 2016)	<i>“System Dynamics Modeling of Indium Material Flows under Wide Deployment of Clean Energy Technologies”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Indium en LED et PV solaire

(Habib et al., 2016)	<i>“A dynamic perspective of the geopolitical supply risk of metals”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	52 métaux au cours des deux dernières décennies et à l’avenir, soit en 2050
(Helbig et al., 2016a)	<i>“Supply risks associated with CdTe and CIGS thin-film photovoltaics”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Cadmium, Tellure, Cuivre, Indium , Gallium, Sélénium et Molybdène, dans les batteries lithium-ion
(Bertrand et al., 2016)	<i>“Map of Critical Raw Material Deposits in Europe”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Matériaux dans l’UE
(Grandell et al., 2016)	<i>“Role of critical metals in the future markets of clean energy technologies”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Argent, néodyme, praséodyme, dysprosium, terbium, yttrium, lanthane, cérium, europium, cobalt, platine, ruthénium, indium, tellure
(McLellan et al., 2016)	<i>“Critical Minerals and Energy–Impacts and Limitations of Moving to Unconventional Resources”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Indium, tellure, sélénium, cuivre, dysprosium/Néodyme, yttrium et Platine
(Sykes et al., 2016b)	<i>“An assessment of the potential for transformational market growth amongst the critical metals”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	49 matériaux critiques
(Max Frenzel et al., 2017)	<i>“Quantifying the relative availability of high-tech by-product metals – The cases of gallium, germanium and indium”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Gallium, germanium et indium
(Nansai et al., 2017)	<i>“The role of primary processing in the supply risks of critical metals”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Néodyme, cobalt et platine au Japon
(Rabe et al., 2017)	<i>“China’s supply of critical raw materials: Risks for Europe’s solar and wind industries?”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Tellure, gallium, indium et néodyme et dysprosium des terres rares
(Sprecher et al., 2017)	<i>“How “black swan” disruptions impact minor metals</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Sous-produit
(K. Zhang et al., 2017)	<i>“An economics strategy for criticality – Application to rare earth element Yttrium in new lighting technology and its sustainable availability”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Yttrium
(Mudd et al., 2017)	<i>“The world’s by-product and critical metal resources part I: Uncertainties, current reporting practices, implications and grounds for optimism”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Sous-produit

(T. T. Werner et al., 2017)	<i>“The world’s by-product and critical metal resources part III: A global assessment of indium”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Indium
(Timothy T. Werner et al., 2017)	<i>“The world’s by-product and critical metal resources part II: A method for quantifying the resources of rarely reported metals”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Sous-produit
(Hatayama and Tahara, 2018)	<i>“Adopting an objective approach to criticality assessment: Learning from the past”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	/
(Jasiński et al., 2018a)	<i>“Assessing supply risks for non-fossil mineral resources via multi-criteria decision analysis”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	31 matières premières utilisées dans la fabrication automobile
(T. Brown, 2018)	<i>“Measurement of mineral supply diversity and its importance in assessing risk and criticality”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	
(Ku, 2018)	<i>“Anticipating critical materials implications from the Internet of Things (IOT): Potential stress on future supply chains from emerging data storage technologies”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Matériel dans IOT
(Nguyen et al., 2018)	<i>“Analyzing critical material demand: A revised approach”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	/
(Northey et al., 2018)	<i>“Unresolved Complexity in Assessments of Mineral Resource Depletion and Availability”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	/
(Watari et al., 2018)	<i>“Analysis of Potential for Critical Metal Resource Constraints in the International Energy Agency’s Long-Term Low-Carbon Energy Scenarios”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Matériaux dans la technologie à faible teneur en carbone
(Ballinger et al., 2019)	<i>“The vulnerability of electric vehicle deployment to critical mineral supply”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Matériaux pour véhicules électriques
(Fu et al., 2019)	<i>“High-Resolution Insight into Materials Criticality: Quantifying Risk for By-Product Metals from Primary Production”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	42 paires de mines/sous-produits
(Gulley et al., 2019)	<i>“China’s domestic and foreign influence in the global cobalt supply chain”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Cobalt pour la Chine

(Négrel et al., 2019)	<i>“GEMAS: Geochemical background and mineral potential of emerging tech-critical elements in Europe revealed from low-sampling density geochemical mapping”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Antimoine, tungstène, lithium
(Schnebele et al., 2019)	<i>“Natural hazards and mineral commodity supply: Quantifying risk of earthquake disruption to South American copper supply”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Cuivre en Amérique du Sud
(Manhart et al., 2019)	<i>“The environmental criticality of primary raw materials – A new methodology to assess global environmental hazard potentials of minerals and metals from mining”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Fer, or, cuivre, graphite naturel, nickel, tantale et tungstène
(Griffin et al., 2019)	<i>“A framework for firm-level critical material supply management and mitigation”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Entreprise
(Hache et al., 2019)	<i>“Critical raw materials and transportation sector electrification: A detailed bottom-up analysis in world transport”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Le lithium dans les véhicules électriques
(Kim et al., 2019)	<i>“Raw material criticality assessment with weighted indicators: An application of fuzzy analytic hierarchy process”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Matières premières en Corée du sud
(Li et al., 2019)	<i>“Risk Identification and Evaluation of the Long-term Supply of Manganese Mines in China Based on the VW-BGR Method”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Le manganèse en Chine
(Mateus and Martins, 2019)	<i>“Challenges and opportunities for a successful mining industry in the future”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Industrie minière
(Nuss et al., 2019)	<i>“Comparative analysis of metals use in the United States economy”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Portée États-Unis
(Wang et al., 2019b)	<i>“Incorporating critical material cycles into metal-energy nexus of China’s 2050 renewable transition”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Matériaux associés à diverses technologies solaires et éoliennes en Chine
(Watari et al., 2019)	<i>“Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Matériaux dans les secteurs de l’électricité et des transports
(Wentker et al., 2019)	<i>“A raw material criticality and environmental impact assessment of state-of-the-art and post-lithium-ion cathode technologies”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Industrie des batteries lithium-ion (LIB)

(Zhou et al., 2019)	<i>“Assessing the short-to medium-term supply risks of clean energy minerals for China”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Minéraux utilisés dans les technologies d'énergie propre en Chine à court et moyen terme (5 à 10 ans)
(Elshkaki, 2020)	<i>“Long-term analysis of critical materials in future vehicles electrification in China and their national and global implications”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	16 matériaux pour l'électrification des véhicules de tourisme en Chine jusqu'en 2050
(Junne et al., 2020)	<i>“Critical materials in global low-carbon energy scenarios: The case for neodymium, dysprosium, lithium, and cobalt”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Néodyme, dysprosium, lithium et cobalt dans les technologies de production, de stockage et de transport d'électricité
(van den Brink et al., 2020)	<i>“Identifying supply risks by mapping the cobalt supply chain”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	COBALT
(Galos et al., 2021)	<i>“The Role of Poland in the European Union Supply Chain of Raw Materials, Including Critical Raw Materials”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Charbon à coke, cuivre, argent et soufre.
(Reverdiau et al., 2021)	<i>“Will there be enough platinum for a large deployment of fuel cell electric vehicles?”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Platine
(Tercero Espinoza, 2021)	<i>“Critical appraisal of recycling indicators used in European criticality exercises and circularity monitoring”</i>	Évaluation de la criticité (dimension ou facteurs)	Portée europe
(Sibley, 1980)	<i>“Cobalt: a strategic and critical resource of industrialized nations, supplied by developing nations”</i>	Évaluation de la criticité / Mitigation	Cobalt 1978
(Servi et al., 1984)	<i>“Critical Metals Used by the Electric Power Companies: An assessment of Risks and Strategies”</i>	Évaluation de la criticité / Mitigation	Matériaux utilisés par les services publics d'électricité aux États-Unis
(Massari and Ruberti, 2013)	<i>“Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies”</i>	Évaluation de la criticité / Mitigation	Terres rares
(Goe and Gaustad, 2014)	<i>“Identifying critical materials for photovoltaics in the US: A multi-metric approach”</i>	Évaluation de la criticité / Mitigation	Indium; Gallium; Sécurité énergétique ; Tellure; Photovoltaïque en couches minces aux États-Unis
(S. Zhang et al., 2017)	<i>“Supply and demand of some critical metals and present status of their recycling in WEEE”</i>	Évaluation de la criticité / Mitigation	Matériaux contenus dans les équipements électriques et électroniques (EEE)
(Olivetti et al., 2017)	<i>“Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals”</i>	Évaluation de la criticité / Mitigation	Matériaux dans la batterie lithium-ion
(Ku et al., 2018)	<i>“The impact of technological innovation on critical materials risk dynamics”</i>	Évaluation de la criticité / Mitigation	

(Lapko and Trucco, 2018)	<i>“Influence of power regimes on identification and mitigation of material criticality: The case of platinum group metals in the automotive sector”</i>	Évaluation de la criticité / Mitigation	Industrie automobile
(Tkaczyk et al., 2018)	<i>“Sustainability evaluation of essential critical raw materials: cobalt, niobium, tungsten and rare earth elements”</i>	Évaluation de la criticité / Mitigation	Cobalt, niobium, tungstène et éléments de terres rares
(Watari et al., 2020)	<i>“Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements”</i>	Évaluation de la criticité / Mitigation	Plusieurs métaux
(Althaf and Babbitt, 2021a)	<i>“Disruption risks to material supply chains in the electronics sector”</i>	Évaluation de la criticité / Mitigation	40 métaux dans l’industrie électronique
(Kiemel et al., 2021)	<i>“Critical materials for water electrolyzers at the example of the energy transition in Germany”</i>	Évaluation de la criticité / Mitigation	Platine, iridium, titane, scandium et yttrium dans les électrolyseurs à eau en Allemagne
(Köhler et al., 2013)	<i>“Critical materials: a reason for sustainable education of industrial designers and engineers”</i>	Les acteurs et les parties prenantes qui influencent la criticité	/
(Graedel and Nuss, 2014)	<i>“Employing Considerations of Criticality in Product Design”</i>	Les acteurs et les parties prenantes qui influencent la criticité	/
(Graedel and Nassar, 2015)	<i>“The criticality of metals: a perspective for geologists”</i>	Les acteurs et les parties prenantes qui influencent la criticité	/
(Machacek, 2017)	<i>“Constructing criticality by classification: Expert assessments of mineral raw materials”</i>	Les acteurs et les parties prenantes qui influencent la criticité	/
(Hofmann et al., 2018)	<i>“Critical raw materials: A perspective from the materials science community”</i>	Les acteurs et les parties prenantes qui influencent la criticité	/
(Wall et al., 2017)	<i>“Responsible Sourcing of Critical Metals”</i>	Les acteurs et les parties prenantes qui influencent la criticité	/
(Erdmann and Graedel, 2011)	<i>“Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses”</i>	Revue de la littérature	
(Lloyd et al., 2012)	<i>“Recommendations for assessing materials criticality”</i>	Revue de la littérature	
(Sievers and Tercero, 2012)	<i>“Limits to the critical raw materials approach”</i>	Revue de la littérature	
(Achzet and Helbig, 2013)	<i>“How to evaluate raw material supply risks—an overview”</i>	Revue de la littérature	
(Bedder, 2015)	<i>“Classifying critical materials: a review of European approaches”</i>	Revue de la littérature	Approches européennes, Allemagne, Pays-Bas, Royaume-Uni

(Dewulf et al., 2016)	<i>“Criticality on the international scene: Quo vadis?”</i>	Revue de la littérature	
(Graedel and Reck, 2016)	<i>“Six Years of Criticality Assessments: What Have We Learned So Far?”</i>	Revue de la littérature	
(Helbig et al., 2016b)	<i>“How to evaluate raw material vulnerability - An overview”</i>	Revue de la littérature	
(Jin et al., 2016)	<i>“Review of critical material studies”</i>	Revue de la littérature	
(Eggert, 2017)	<i>“Materials, critical materials and clean-energy technologies</i>	Revue de la littérature	Portée : entreprise, nationale et mondiale
(M. Frenzel et al., 2017)	<i>“Raw material `criticality'—sense or nonsense?”</i>	Revue de la littérature	
(Hayes and McCullough, 2018)	<i>“Critical minerals: A review of elemental trends in comprehensive criticality studies”</i>	Revue de la littérature	
(Ioannidou et al., 2019a)	<i>“The future in and of criticality assessments”</i>	Revue de la littérature	
(Schrijvers et al., 2020)	<i>“A review of methods and data to determine raw material criticality”</i>	Revue de la littérature	
(Helbig et al., 2021a)	<i>“An Overview of Indicator Choice and Normalization in Raw Material Supply Risk Assessments”</i>	Revue de la littérature	
(Peck and Bakker, 2012)	<i>“Eco-design opportunities for critical material supply risks”</i>	Mitigation	/
(Chancerel et al., 2013)	<i>“Data availability and the need for research to localize, quantify and recycle critical metals in information technology, telecommunication and consumer equipment”</i>	Mitigation	Industrie électronique (Antimoine, cobalt, gallium, germanium, indium, les terres rares, Tantale)
(Rademaker et al., 2013)	<i>“Recycling as a Strategy against Rare Earth Element Criticality: A Systemic Evaluation of the Potential Yield of NdFeB Magnet Recycling”</i>	Mitigation	Les terres rares
(Busch et al., 2014)	<i>“Managing Critical Materials with a Technology-Specific Stocks and Flows Model”</i>	Mitigation	Lithium, Nickel, Cobalt et Platine dans les batteries catalytiques.
(Zimmermann and Gößling-Reisemann, 2014)	<i>“Recycling Potentials of Critical Metals-Analyzing Secondary Flows from Selected Applications”</i>	Mitigation	Revêtements de barrière thermique (yttrium), cellules photovoltaïques CIGS (indium et gallium), catalyseurs industriels, catalyseurs à roulements PGM, catalyseurs à roulements aux terres rares, catalyseurs à roulements Ge
(Chancerel et al., 2015)	<i>“Estimating the quantities of critical metals embedded in ICT and consumer equipment”</i>	Mitigation	Cobalt, gallium, indium, palladium et éléments des terres rares, ainsi que métaux contenant du tantale et du plomb, étain, or et argent
(Steinlechner and Antrekowitsch, 2015)	<i>“Potential of a Hydrometallurgical Recycling Process for Catalysts to Cover the Demand for Critical Metals, Like PGMs and Cerium”</i>	Mitigation	Métaux du groupe du platine (PGM) et Cérium dans les catalyseurs.
(Weiser et al., 2015)	<i>“Understanding the modes of use and availability of critical metals – An expert-based scenario analysis for the case of indium”</i>	Mitigation	Indium

(Barteková and Kemp, 2016)	<i>“National strategies for securing a stable supply of rare earths in different world regions”</i>	Mitigation	Terres rares
(Van Eygen et al., 2016)	<i>“Resource savings by urban mining: The case of desktop and laptop computers in Belgium”</i>	Mitigation	Matériaux dans les Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques
(Ylä-Mella and Pongrácz, 2016)	<i>“Drivers and Constraints of Critical Materials Recycling: The Case of Indium”</i>	Mitigation	Indium
(D.P et al., 2017)	<i>“Product policy and material scarcity challenges: the essential role of government in the past and lessons for today”</i>	Mitigation	/
(Sun et al., 2017)	<i>“Toward Sustainability for Recovery of Critical Metals from Electronic Waste: The Hydrochemistry Processes”</i>	Mitigation	Matériaux dans les Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques
(Bustamante et al., 2018)	<i>“Comparative Analysis of Supply Risk-Mitigation Strategies for Critical Byproduct Minerals: A Case Study of Tellurium”</i>	Mitigation	Tellure
(He, 2018)	<i>“The trade-security nexus and U.S. policy making in critical minerals”</i>	Mitigation	Les terres rares
(Løvik et al., 2018)	<i>“Improving supply security of critical metals: Current developments and research in the EU”</i>	Mitigation	/
(Marra et al., 2018)	<i>“Separation efficiency of valuable and critical metals in WEEE mechanical treatments”</i>	Mitigation	Matériaux dans les Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques
(Habib, 2019)	<i>“A product classification approach to optimize circularity of critical resources – the case of NdFeB magnets”</i>	Mitigation	Néodyme-fer-bore
(Sethurajan et al., 2019)	<i>“Recent advances on hydrometallurgical recovery of critical and precious elements from end of life electronic wastes - a review”</i>	Mitigation	Les terres rares , Matériaux dans les Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques
(Tunsu et al., 2019)	<i>“Recovery of critical materials from mine tailings: A comparative study of the solvent extraction of rare earths using acidic, solvating and mixed extractant systems”</i>	Mitigation	Terres rares
(Wang and Kara, 2019)	<i>“Material Criticality and Circular Economy: Necessity of Manufacturing Oriented Strategies”</i>	Mitigation	Cobalt et lithium dans les véhicules électriques (VE) australiens
(Ayres and Peiró, 2013)	<i>“Material efficiency: rare and critical metals”</i>	Mitigation	Plusieurs métaux
(Slowinski et al., 2013)	<i>“Dealing with Shortages of Critical Materials”</i>	Mitigation	Portée entreprise
(Ku et al., 2014)	<i>“Addressing Rare-Earth Element Criticality: An Example from the Aviation Industry”</i>	Mitigation	HREE éléments des terres rares lourds (dans les revêtements barrières environnementales)
(Lister et al., 2014)	<i>“Recovery of critical and value metals from mobile electronics enabled by electrochemical processing”</i>	Mitigation	Métaux dans l'électronique mobile

(Graedel et al., 2015b)	<i>“On the materials basis of modern society”</i>	Mitigation	Plusieurs métaux
(Kopacek, 2016)	<i>“Intelligent disassembly of components from printed circuit boards to enable re-use and more efficient recovery of critical metals”</i>	Mitigation	Matériaux dans les circuits imprimés
(Lapko et al., 2016)	<i>“The business perspective on materials criticality: Evidence from manufacturers”</i>	Mitigation	/
(Pavel et al., 2016)	<i>“Critical raw materials in lighting applications: Substitution opportunities and implication on their demand”</i>	Mitigation	Europium, Terbium, Yttrium, Gallium, Germanium et Indium.
(Pavel et al., 2017)	<i>“Role of substitution in mitigating the supply pressure of rare earths in electric road transport applications”</i>	Mitigation	Les terres rares
(S. Zhang et al., 2017)	<i>“Supply and demand of some critical metals and present status of their recycling in WEEE”</i>	Mitigation	Les Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques
(Gaustad et al., 2018)	<i>“Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues”</i>	Mitigation	/
(Lapko et al., 2018)	<i>“In Pursuit of Closed-Loop Supply Chains for Critical Materials: An Exploratory Study in the Green Energy Sector”</i>	Mitigation	/
(Akcil et al., 2019)	<i>“Valorization of waste LCD and recovery of critical raw material for circular economy: A review”</i>	Mitigation	Indium
(Arowosola and Gaustad, 2019)	<i>“Estimating increasing diversity and dissipative loss of critical metals in the aluminum automotive sector”</i>	Mitigation	Aluminium
(Auerbach et al., 2019)	<i>“Critical raw materials – Advanced recycling technologies and processes: Recycling of rare earth metals out of end of life magnets by bioleaching with various bacteria as an example of an intelligent recycling strategy”</i>	Mitigation	Aimants
(Omodara et al., 2019a)	<i>“Recycling and substitution of light rare earth elements, cerium, lanthanum, neodymium, and praseodymium from end-of-life applications - A review”</i>	Mitigation	LREE (éléments de terres rares légères)
(Rahimpour Golroudbary et al., 2019)	<i>“The Life Cycle of Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Critical Minerals Recycling: Case of Lithium-ion Batteries”</i>	Mitigation	LMO, oxyde de lithium et de manganèse ; OCH, oxyde de cobalt-lithium ; LFP, phosphate de fer et de lithium ; NMC, oxyde de lithium nickel manganèse cobalt ; LiNCA, oxyde d'aluminium lithium-nickel-cobalt.
(Andersson, 2020)	<i>“Chinese assessments of “critical” and “strategic” raw materials: Concepts, categories, policies, and implications”</i>	Mitigation	/
(Araya et al., 2020)	<i>“Towards mine tailings valorization: Recovery of critical materials from Chilean mine tailings”</i>	Mitigation	/

(Buechler et al., 2020)	<i>“Comprehensive elemental analysis of consumer electronic devices: Rare earth, precious, and critical elements”</i>	Mitigation	Les Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques
(Charles et al., 2020)	<i>“Towards Increased Recovery of Critical Raw Materials from WEEE–evaluation of CRMs at a component level and pre-processing methods for interface optimisation with recovery processes”</i>	Mitigation	Les Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques
(Grimes and Maguire, 2020)	<i>“Assessment of priorities in critical material recovery from Waste Electrical and Electronic Equipment”</i>	Mitigation	13 matières dans les Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques en Europe
(Tercero Espinoza et al., 2020)	<i>“Greater circularity leads to lower criticality, and other links between criticality and the circular economy”</i>	Mitigation	/
(Cenci et al., 2021)	<i>“Separation and concentration of valuable and critical materials from wasted LEDs by physical processes”</i>	Mitigation	LED
(Gaffuri et al., 2021)	<i>“Potential substitutes for critical materials in white LEDs: Technological challenges and market opportunities”</i>	Mitigation	LED
(Kastanaki and Giannis, 2021)	<i>“Dynamic estimation of future obsolete laptop flows and embedded critical raw materials: The case study of Greece”</i>	Mitigation	Ordinateurs portables en Grèce (2016-2040)
(Lee and Cha, 2021)	<i>“Towards Improved Circular Economy and Resource Security in South Korea”</i>	Mitigation	Corée du sud
(Moats et al., 2021)	<i>“Towards resilient and sustainable supply of critical elements from the copper supply chain: A review”</i>	Mitigation	Sélénium, Tellure, Arsenic, Antimoine et Bismuth
(Palomino et al., 2021)	<i>“Evaluating critical metals contained in spintronic memory with a particular focus on Pt substitution for improved sustainability”</i>	Mitigation	Utilisation du platine dans STT-MRAM
(Saidani et al., 2021)	<i>“Multi-tool methodology to evaluate action levers to close the loop on critical materials – Application to precious metals used in catalytic converters”</i>	Mitigation	Platine des convertisseurs catalytiques
(Silvestri et al., 2021)	<i>“Circularity potential of rare earths for sustainable mobility: Recent developments, challenges and future prospects”</i>	Mitigation	Les terres rares dans l'industrie des batteries de véhicules en Europe
(Suppes and Heuss-Aßbichler, 2021)	<i>“How to Identify Potentials and Barriers of Raw Materials Recovery from Tailings? Part I: A UNFC-Compliant Screening Approach for Site Selection”</i>	Mitigation	Installations de stockage de résidus (TSF) en Allemagne