

Chaîne de fabrication du numérique

Faiblesses et impacts

STÉPHAN PECCINI

Email: `stephan-pro@peccini.fr`

29 avril 2025

Version : 0.7


Licence : CC BY-NC-ND 4.0  (voir section [10](#))

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DE FIGURES	3
1. INTRODUCTION	4
1.1. Contexte et manques	4
1.2. Proposition méthodologique	5
1.3. Technique employée : Graphviz (DOT) et structure modulaire	5
1.4. Ambitions et contributions	6
2. MÉTHODOLOGIE - TROIS INDICES POUR ÉVALUER LES RISQUES	7
2.1. Indice de Herfindahl-Hirschmann (IHH)	7
2.1.1. Évolution nécessaire	8
2.2. Indice de Vulnérabilité Concurrentielle (IVC)	8
2.3. Indice de Criticité de Substituabilité (ICS)	9
2.4. Apports du modèle par rapport aux analyses de criticité existantes	10
2.4.1. Rappel des approches « classiques » de criticité	11
2.4.2. Limites des analyses existantes pour le secteur numérique	11
2.4.3. Apports du modèle combiné (IHH + IVC + Criticité Substitution)	11
2.4.4. Exemple concret : le lithium vs le cuivre	12
2.4.5. Impact sur la stratégie industrielle et politique	12
2.4.6. Conclusion : vers un modèle plus opérationnel	12
3. ARTICULATION GLOBALE DU MODÈLE	13
3.1. Graphe principal vs sous-graphes	14
3.1.1. Apport d'une structure hiérarchique dans le graphe principal	14
3.2. Évaluation des impacts et compréhension des relations	15
3.3. Données et sources	17
4. RÉSULTATS ET DISCUSSION	18
4.1. Le cas du Lithium	19
4.2. Le cas du Hafnium	19
4.3. Analyse d'ensemble	19
4.3.1. Exemples d'analyse	20
5. VULNÉRABILITÉS FACE À LA POLYCRISE	24
5.1. Logistique et transports	25
5.2. Aléas climatiques	25
5.3. Énergie et eau	25
5.4. Conclusion	26
6. PLAN D'ACTION POUR UN MODÈLE COMPLET ET ROBUSTE	26
6.1. Structurer et harmoniser les données sources	27
6.2. Développer la logique modulaire et les sous-graphes	27
6.3. Intégrer la dimension historique et les scénarios	27
6.4. Approfondir la notion de polycrise	28

6.5. Tester et valider le modèle sur des cas concrets	28
6.6. Mettre en œuvre un workflow de mise à Jour et d'évolution	28
6.7. Conclusion	29
7. CONCLUSION GLOBALE	29
8. RÉFÉRENCES	30
9. GLOSSAIRE DES TERMES TECHNIQUES	31
10. LICENCE	32
Vous êtes autorisé à :	34
Selon les conditions suivantes :	34
Notes:	34

LISTE DE FIGURES

Impacts et rétroactions sur la chaîne de fabrication	4
Positionnement des indices sur la chaîne de fabrication	7
Modélisation de la chaîne de fabrication du numérique	14
Chaîne de fabrication du smartphone – impact de la France	16
Chaîne de fabrication du smartphone – zoom sur le manganèse	17
Concentration des minerais et des réserves, pondérée par l'IVC	20
L'assemblage des produits finaux avec les IHH	21
La fabrication des composants avec les IHH	21
Le traitement des minerais avec les IHH et pondération par la criticité de substitution	22
L'extraction des minerais avec les IHH et pondération par la criticité de substitution	22
Détail des IHH pour l'assemblage et la fabrication	23
L'ensemble des indices pour les minerais	23

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte et manques

La chaîne de fabrication du numérique, qui s'étend de l'extraction des matières premières à l'assemblage final, joue un rôle central dans les activités économiques et sociétales.

Pourtant, cette chaîne reste insuffisamment étudiée dans son entièreté. De nombreuses analyses existantes portant sur la « criticité » des minerais ne vont pas au-delà d'une approche macroéconomique, souvent focalisée sur la seule rareté d'un métal ou sur le degré de concentration de sa production^{[3][12]}.

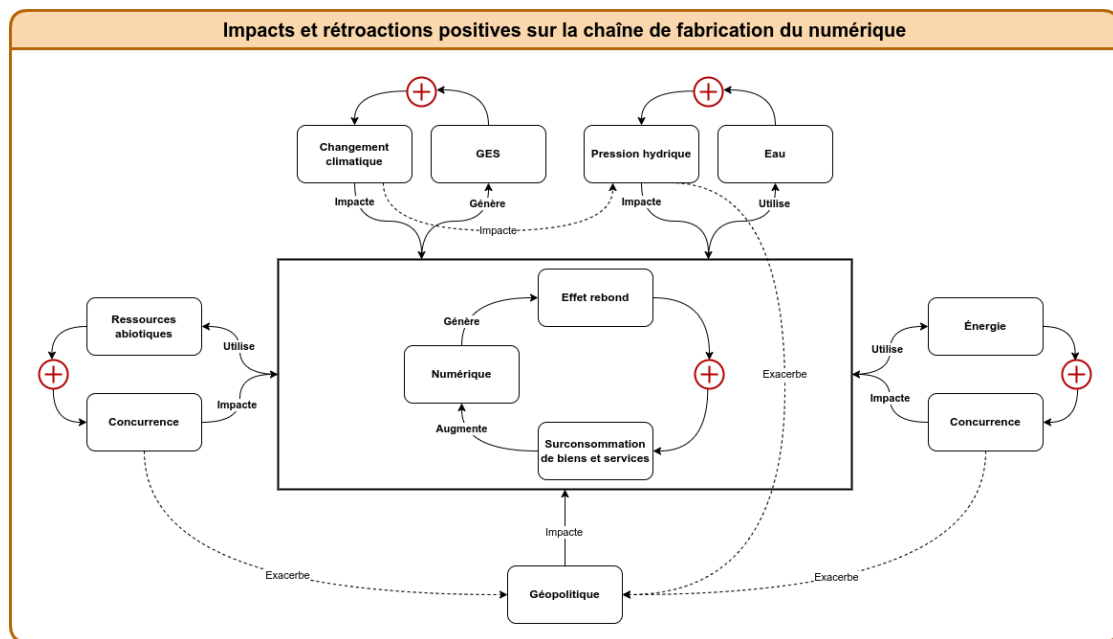


Figure 1. Impacts et rétroactions sur la chaîne de fabrication

Or, dans le contexte actuel de « polycrise globale », marqué par des tensions géopolitiques, des aléas climatiques et une croissance rapide de la demande hors numérique (transition énergétique, défense, etc.), voir schéma ci-dessus, ces approches généralistes révèlent leurs limites^[8].

En effet, elles ont du mal à évaluer l'incidence concrète sur les divers éléments du domaine numérique, tout comme à prendre en compte la possibilité de la concurrence potentielle que d'autres secteurs génèrent pour une même ressource^[5].

Dans le secteur électronique, certains métaux deviennent stratégiques non pas uniquement parce qu'ils sont rares, mais parce qu'ils sont difficiles à substituer dans tel ou tel élément, ou parce que d'autres industries, particulièrement dynamiques, peuvent en capter la majeure partie avant même que l'électronique n'y ait accès^[10].

Par ailleurs, l'accent est souvent mis sur l'extraction et le raffinage, alors que la concentration peut être tout aussi problématique dans les étapes de fabrication de composants (fondeurs, par exemple) ou d'assemblage final (assembleurs majeurs)^[11].

Cette diversité de maillons et de risques justifie de mettre en place une approche plus fine, tenant compte à la fois des dynamiques industrielles, de la concurrence intersectorielle et de la substituabilité effective des ressources dans un composant précis^{[3][20]}.

1.2. Proposition méthodologique

Pour répondre à ces manques, nous proposons un modèle s'appuyant sur quatre indicateurs :

- l'Indice de Herfindahl-Hirschmann (IHH)[⁹],
- l'Indice de Vulnérabilité Concurrentielle (IVC)
- l'Indice de Criticité de Substituabilité (ICS)
- et l'Indice de Stabilité Géopolitique (ISG)

L'IHH n'est plus cantonné aux seules étapes minières : il s'applique aux phases d'extraction, de traitement, mais aussi de fabrication et d'assemblage, afin de quantifier la concentration des acteurs ou des pays impliqués à chaque maillon[⁹]. Il s'applique aussi aux réserves de minerais pour évaluer les impacts futurs au regard des impacts géopolitiques.

De même, l'IVC mesure à quel point d'autres secteurs captent la ressource dans un marché plus ou moins contraint, ce qui permet de faire apparaître des tensions souvent ignorées lorsqu'on évalue isolément la « rareté »[⁵][⁶].

L'ICS est ici envisagée sous l'angle d'un composant particulier : on ne se contente pas de dire « cette ressource est substituable ou non », mais on qualifie la faisabilité technique (voire le niveau de maturité), le délai d'implémentation et l'impact économique de cette substitution dans le cas précis du composant utilisant le minerai, comme une batterie, un boîtier ou une carte mère, par exemple[¹⁰][¹⁹].

L'ISG, basé sur 3 indicateurs reconnus permet de pondérer à la hausse ou à la baisse les évaluations de risque issues des 3 indices précédents.

Grâce à ce croisement méthodologique, nous dépassons les grilles de criticité classiques qui se limitent souvent à deux axes principaux (importance économique et risque d'approvisionnement)[²⁰].

Notre approche met l'accent sur la logique d'usage : un minerai peut être considéré comme étant très concentré (IHH élevé) et faire l'objet d'une forte concurrence (IVC élevé), sans pour autant être inquiétant si l'on sait le substituer facilement.

Inversement, un matériau apparemment peu problématique peut se révéler critique dans un segment précis du numérique dès lors que la substitution s'avère complexe, coûteuse ou trop lente[³].

1.3. Technique employée : Graphviz (DOT) et structure modulaire

Afin de décrire concrètement cette chaîne complexe, nous avons choisi de recourir à une modélisation sous forme de graphe orienté, en utilisant la syntaxe DOT de Graphviz. Ce choix permet d'explicitier chaque flux, de l'extraction jusqu'à la production de composants et l'assemblage final, au sein d'une représentation visuelle.

Nous y ajouterons des **sous-graphes** thématiques (logistique, ressources communes, outillage critique, etc.) qui viennent se connecter de manière indépendante, et sur lesquels nous reportons également les trois indices (IHH, IVC et ICS).

Dans cette configuration, un nœud « fonderie » ou « assembleur » peut, lui aussi, présenter un IHH élevé si quelques entreprises ou pays se partagent la quasi-totalité du marché^[14]. De la même façon, un module « ressource eau » ou « logistique maritime » peut être relié à une opération, signalant un risque de tension indirect^[12].

L'utilisation de Graphviz facilite la mise à jour et l'extension du modèle, en autorisant l'ajout de nouveaux nœuds ou de nouvelles relations dès lors qu'on doit prendre en compte un secteur connexe ou une ressource transversale (énergie, par exemple).

L'objectif demeure de rendre lisible et évolutif un schéma qui pourrait, sans cela, se transformer en un « spaghetti » illisible.

1.4. Ambitions et contributions

Cette recherche poursuit deux objectifs majeurs :

1. Le premier est de **sensibiliser** l'ensemble des décideurs, du monde industriel, politique ou territorial, à la nécessité de considérer la chaîne du numérique comme un ensemble de maillons interdépendants, allant de l'extraction de minerai jusqu'à l'assemblage final, en passant par la logistique et les infrastructures critiques^{[7][8]}.

Il ne suffit pas de constater qu'un certain métal est « rare » : il faut déterminer si la demande automobile ou aéronautique en détourne l'essentiel, si la substitution est praticable, et si la production n'est pas concentrée chez un unique acteur ou dans une seule région soumise à risque géopolitique^{[4][20]}.

2. Le second objectif est d'**outiller** la prise de décision stratégique. En combinant les indices (IHH, IVC, ICS et ISG), les acteurs du numérique pourront hiérarchiser leurs actions. Si un minerai ou un composant présente un IHH élevé, un IVC également élevé et une Criticité forte, alors un programme de diversification des approvisionnements, de stockage ou de R&D substitutive devient prioritaire^[18].

Au contraire, si l'un de ces critères est modéré, l'urgence s'en trouve nuancée. Ainsi, nous proposons un diagnostic plus opérationnel que les matrices de criticité traditionnelles, car il précise où, comment et pour quels usages la tension peut réellement se cristalliser^{[3][20]}.

La suite de cet article montrera d'abord en détail le fonctionnement des trois indices et la manière dont ils se combinent.

Nous expliquerons ensuite la construction progressive du graphe et sa logique modulaire à base de sous-graphes.

Enfin, nous illustrerons cette approche à travers plusieurs exemples de ressources clés, afin de démontrer l'intérêt pratique de croiser la concentration industrielle, la concurrence intersectorielle et la substituabilité effective au niveau du composant.

2. MÉTHODOLOGIE - QUATRE INDICES POUR ÉVALUER LES RISQUES

La robustesse de la chaîne du numérique peut difficilement se comprendre à travers un seul indicateur.

En effet, on constate que la simple évaluation de la rareté d'un métal, ou de la concentration d'un marché, ne suffit pas à trancher la question de savoir si ce minerai, voire la ressource au sens large, s'avère réellement critique pour le secteur électronique^[12].

Dans cette optique, le modèle présenté ici repose sur quatre indices distincts qui se complètent mutuellement : l'Indice de Herfindahl-Hirschmann (IHH), l'Indice de Vulnérabilité Concurrentielle (IVC), l'Indice de Criticité de Substituabilité (ICS) et l'Indice de Stabilité Géopolitique (ISG) – voir leur positionnement dans la figure ci-après.

Leur combinaison vise à offrir une vue d'ensemble, depuis la concentration géographique ou industrielle, jusqu'aux possibilités concrètes de remplacer un matériau dans un composant donné^[3], le tout pondéré par la stabilité des pays producteurs.

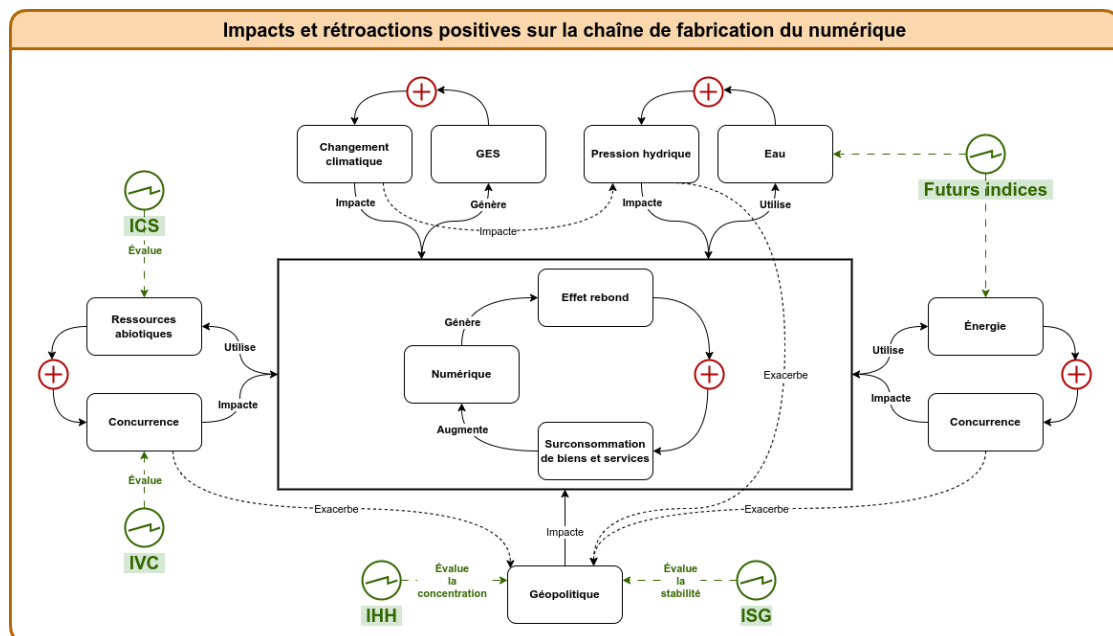


Figure 2. Positionnement des indices sur la chaîne de fabrication

2.1. Indice de Herfindahl-Hirschmann (IHH)

Le premier indicateur, l'IHH, s'appuie sur un principe largement reconnu en économie : il consiste à sommer les parts de marché au carré pour évaluer la concentration d'une industrie ou d'une zone géographique^[9].

Plus l'IHH est faible (typiquement en dessous de 15), plus le secteur considéré est diversifié en acteurs ou en pays producteurs ; plus il est élevé (au-delà de 25), plus on se rapproche d'une situation de quasi-monopole ou de forte dépendance, qu'elle soit géopolitique ou industrielle ; un IHH de 100 indique un monopole^[9].

$$IHH = \frac{\sum_{i=1}^N s_i^2}{100}$$

où :

- N : Nombre total d'acteurs ou d'entités considérées.
- s_i : Part relative de l'acteur i , exprimée en proportion mondiale (entre 1 et 100).

L'intérêt de l'IHH dans la chaîne du numérique va toutefois au-delà de l'évaluation de l'extraction minière.

Dans ce modèle, l'IHH s'applique en effet à toutes les étapes : l'extraction, les réserves, le traitement, mais aussi la fabrication de composants et l'assemblage final^[14]. Savoir si la ressource brute (minerai) est concentrée entre quelques pays ne suffit pas. Il faut également comprendre si, lors du raffinage ou de la production de pièces électroniques clés, une poignée d'acteurs se partagent l'essentiel du marché^{[4][20]}.

Cette extension de l'IHH à la fabrication avancée et à l'assemblage est capitale pour appréhender les risques réels. Un minerai peut se révéler abondant, mais, si un acteur unique (fondeur, assembleur) gère la majeure partie de ses applications critiques, la chaîne reste vulnérable à toute rupture chez cet acteur^{[14][18]}.

2.1.1. Évolution nécessaire

Cet IHH pour les entreprises qui opèrent devra être complété. En effet, actuellement, la structure des relations ne prend en compte que l'acteur qui opère dans un pays sans regroupement industriel ; la raison est de permettre d'identifier précisément le caractère local d'une opération et faire interagir avec les aléas.

Toutefois, pour mieux évaluer le risque industriel – à un niveau comparable au risque géopolitique lié à un pays –, il faut que chaque acteur (quel que soit le pays où ils opèrent, quelle que soit l'opération qu'il réalise) soit relié au groupe industriel dont il dépend.

Cela passera par l'ajout d'un niveau, sûrement 98 pour être cohérent avec les pays géographiques et d'un calcul, encore à définir ; a minima, le calcul se fera au niveau de l'opération concernée par un calcul similaire à celui des acteurs, mais ramené au niveau des groupes industriels.

2.2. Indice de Vulnérabilité Concurrentielle (IVC)

Le second indicateur, l'IVC, vise à quantifier la pression qu'exercent d'autres secteurs, hors numérique, sur la même ressource. On observe souvent l'absence de cette dimension dans les grilles de criticité classiques, qui se concentrent sur l'éventuel monopole ou la rareté géologique, mais négligent la concurrence intersectorielle^{[5][10]}.

Or, dans un monde où le besoin de batteries (véhicules électriques, stockage d'énergie) ou de matériaux pour l'aéronautique ou la défense explose, il n'est pas rare que les usages numériques peinent à accéder à la ressource si d'autres secteurs captent l'essentiel de l'offre^{[6][15]}.

La formule simplifiée de l'IVC traduit cette idée en combinant quatre facteurs :

- le ratio des croissances annuelles (concurrents vs numérique),
- la comparaison des parts de consommation,
- la tension sur le marché (excès de demande par rapport à la capacité de production)
- et la pondération en fonction de l'abondance géologique^[10].

$$IVC = \left(\frac{\text{Croissance}_{\text{concurrents}}}{\text{Croissance}_{\text{numérique}}} \right) \times \left(\frac{\text{Part}_{\text{concurrents}}}{\text{Part}_{\text{numérique}}} \right) \times \text{Tension}_{\text{marché}} \times \text{Pondération}_{\text{réserves}}$$

où :

- $\text{Croissance}_{\text{concurrents}}$: Taux de croissance de la demande *hors numérique* pour la ressource.
- $\text{Croissance}_{\text{numérique}}$: Taux de croissance des usages *numériques finaux*.
- $\text{Part}_{\text{concurrents}}$: Part de la consommation totale par les secteurs concurrents (inclut le numérique embarqué).
- $\text{Part}_{\text{numérique}}$: Part de la consommation numérique finale.
- $\text{Tension}_{\text{marché}}$: Sur-demande exprimée par $\max(0, \% \text{Demande} - \% \text{Capacité})$.
- $\text{Pondération}_{\text{réserves}}$: Coefficient reflétant l'abondance des réserves mondiales (entre 1.0 et 1.8).

Selon les valeurs retenues, on peut repérer des cas de vulnérabilité très forte ($IVC > 60$), où le numérique pourrait se trouver en difficulté face à des secteurs concurrents, même si le minerai se révèle abondant géologiquement^{[5][19]}.

2.3. Indice de Criticité de Substituabilité (ICS)

Le troisième élément du modèle, l'ICS, complète de manière décisive les informations fournies par l'IHH et l'IVC.

Plus encore que la concurrence ou la concentration, la possibilité de remplacer un minerai ou un composant dans un usage spécifique peut transformer un « métal apparemment critique » en « risque maîtrisable »^{[3][12]}.

Il ne s'agit pas seulement de savoir si un substitut théorique existe, mais bien d'évaluer dans la mise en œuvre de ce substitut :

$$ICS = 0,4 \times \text{Faisabilité technique} + 0,3 \times \text{Délai d'implémentation} + 0,3 \times \text{Impact économique}$$

où :

- **Faisabilité technique** : Capacité à remplacer le matériau par un autre techniquement viable (note entre 0 et 1).
- **Délai d'implémentation** : Temps estimé pour déployer une solution de substitution à l'échelle industrielle.
- **Impact économique** : Surcoût ou perte économique liée à la substitution.

avec :

- **Faisabilité technique** → poids = 40%
 - **1.0** : Aucun substitut connu
 - **0.7** : Substituts théoriques en recherche fondamentale
 - **0.5** : Substituts en développement (TRL 4-6)
 - **0.2** : Substituts disponibles mais sous-optimaux
 - **0.0** : Substituts équivalents disponibles

- **Délai d'implémentation** → poids = **30%**
 - **1.0** : Impossible à court/moyen terme (> 10 ans)
 - **0.7** : Long terme (5-10 ans)
 - **0.5** : Moyen terme (2-5 ans)
 - **0.2** : Court terme (6-24 mois)
 - **0.0** : Immédiat (< 6 mois)
- **Impact économique** → poids = **30%**
 - **1.0** : Coût prohibitif (> 5x)
 - **0.7** : Augmentation significative des coûts (2-5x)
 - **0.5** : Augmentation modérée des coûts (1.5-2x)
 - **0.2** : Légère augmentation des coûts (< 1.5x)
 - **0.0** : Coût équivalent ou inférieur

Ce score, qui va de 0.0 (substitution immédiate) à 1.0 (aucun substitut connu), est volontairement appliqué au **couple minerais-composant**^{[10][19]}.

Autrement dit, on ne raisonne pas à un niveau macro (« Le cobalt est-il substituable ? »), mais à celui d'une application précise : une batterie de smartphone, une carte mère, un boîtier. L'expérience montre que certains métaux s'avèrent incomparables en électronique haut de gamme, alors qu'ils se remplacent facilement dans d'autres applications^[10].

Cette granularité s'avère essentielle pour prioriser les travaux de R&D et distinguer les usages où la substitution reste envisageable (donc vulnérabilité moindre), de ceux où nous jugeons l'utilisation du métal concerné irremplaçable à court ou moyen terme (donc vulnérabilité forte)^{[15][19]}.

2.4. Indice de Stabilité Géopolitique (ISG)

Cet indicateur synthétise trois bases reconnues :

- **WGI** (World Bank, “Political Stability & Absence of Violence”),
- **FSI** (Fragile States Index)
- et **ND-GAIN** (Climat & capacité d'adaptation)

afin de mesurer, pour chaque pays, la probabilité qu'un choc politique, social ou climatique perturbe la chaîne d'approvisionnement.

$$ISG = \left(0,5 \times \frac{2,5 - WGI}{5}\right) + \left(0,3 \times \frac{FSI}{120}\right) + \left(0,2 \times \frac{100 - NDGAIN}{100}\right)$$

- **Normalisation 0 (extrêmement stable) → 1 (extrêmement instable) :**
 - WGI est inversé : +2,5 = pays très stable → 0 ; -2,5 = pays très instable → 1.
 - FSI va de 0 (très solide) à 120 (état en faillite) → 1.

- ND-GAIN est inversé : 100 = résilient \rightarrow 0 ; 0 = très vulnérable \rightarrow 1.
- **Pondérations (50% / 30% / 20%)** : reflètent l'importance prépondérante de la gouvernance politique, tout en laissant place à la fragilité socio-économique et au risque climatique. Elles peuvent être ajustées dans un scénario de stress particulier (ex. crise climatique \rightarrow + climat).

ISG	Lecture
$\leq 0,30$	Pays très stable
$0,30 - 0,60$	Stabilité intermédiaire
$\geq 0,60$	Instabilité forte

2.5. Apports du modèle par rapport aux analyses de criticité existantes

2.5.1. Rappel des approches « classiques » de criticité

Les institutions comme l'Union européenne ou le Département de l'Énergie américain ont développé des matrices qui évaluent la « criticité » d'un métal en fonction de son importance économique et de son risque d'approvisionnement^{[4][20]}.

Ce double axe, certes précieux, reste généralement au niveau macro : on identifie, par exemple, que le gallium ou le néodyme revêtent une importance critique pour l'économie. Mais rien n'est dit sur la spécificité de l'usage dans l'automobile ou dans l'électronique, ni sur la présence d'un acteur dominant au stade du traitement ou de l'assemblage^{[3][10]}.

Certaines analyses se limitent, de plus, à un seul critère, comme la concentration géographique ou le ratio réserves/consommation. Cela permet certes de repérer un monopole potentiel, mais cela ne renseigne pas sur le fait qu'une autre filière pourrait reléguer le numérique au second plan, ni sur la possibilité de trouver un matériau de rechange ou un contournement technologique^{[5][12]}.

2.5.2. Limites des analyses existantes pour le secteur numérique

Le secteur numérique se distingue par la variété des composants (du boîtier à la puce) et la multiplicité des acteurs (fondeurs, assembleurs, fournisseurs de services).

Les approches classiques omettent souvent cette complexité. Elles ne spécifient pas, par exemple, en quoi la « criticité de l'or pour l'assemblage de circuits » peut s'avérer bien plus pressante que pour la bijouterie, ou inversement^{[3][12]}.

De même, la concurrence que d'autres industries exercent est rarement chiffrée. L'essor des véhicules électriques peut créer une pression énorme sur le lithium, le cobalt ou certains minerais de terres rares, au point que les fabricants d'électronique portables pâtissent soudain d'une pénurie, alors même que les analyses globales affirmaient que la production mondiale restait « suffisante »^{[5][6]}.

Enfin, la notion de « substitution », souvent évoquée de façon générique, n'est pas reliée aux contraintes concrètes d'une application donnée. Les ingénieurs savent que remplacer l'étain dans certaines soudures s'avère plus simple que de trouver un équivalent au hafnium dans l'électronique avancée. Cette hiérarchie reste invisible si l'on ne relie pas la criticité à l'usage précis^{[15][19]}.

2.5.3. Apports du modèle combiné (IHH + IVC + ICS + ISG)

Le modèle proposé entend justement dépasser ces lacunes. L'IHH, d'abord, se décline non seulement sur l'extraction, mais également sur les réserves et le traitement, ainsi que sur les niveaux de fabrication et d'assemblage. Cela éclaire l'existence de « goulets » industriels capables de bloquer la chaîne tout entière, malgré une apparente diversité au stade minier^{[14][18]}.

Ensuite, l'IVC (Vulnérabilité Concurrentielle) fournit le chaînon manquant : il montre que, même si la ressource existe en quantité suffisante et même si le marché n'est pas trop concentré, le numérique peut disparaître du paysage si d'autres secteurs en pleine croissance s'emparent de la quasi-totalité de la production. C'est particulièrement éclairant lorsque l'on considère, par exemple, la rivalité avec les énergies renouvelables ou le marché du véhicule électrique^{[5][6]}.

Puis, l'ICS, appliqué à la relation « minerais-composant », apporte la dimension technico-économique qui manquait. On peut ainsi discerner les scénarios où un métal apparemment abondant reste néanmoins vital pour la chaîne, faute d'alternative à l'échelle industrielle, et ceux où un métal plus rare peut, en réalité, être remplacé à coût raisonnable dans les applications numériques^{[10][19]}.

Enfin l'ISG permet de pondérer le risque combiné en l'aggravant ou le diminuant selon sa valeur.

2.5.4. Exemple concret : le lithium vs le cuivre

On voit ainsi, dans certains cas, que le lithium, bien qu'il ne soit pas fortement concentré (IHH modéré), souffre d'un IVC très élevé, car les véhicules électriques pèsent fortement sur la disponibilité de ce métal^{[5][15]}.

Ajoutons à cela un ICS plutôt fort pour les batteries de smartphones ou d'ordinateurs portables : on se retrouve avec une vulnérabilité élevée pour l'électronique^[19].

À l'inverse, le cuivre, pourtant très utilisé, dispose d'une plus grande diversité d'acteurs (IHH faible), d'un recyclage développé et d'une concurrence intersectorielle moins aiguë (IVC bas)^[5].

S'il s'avère nécessaire, on peut le substituer, notamment dans certains câblages, par de l'aluminium. L'ensemble s'avère donc moins préoccupant pour le numérique, même si le cuivre reste un matériau fondamental^[2].

2.5.5. Impact sur la stratégie industrielle et politique

En pratique, cette lecture triple offre un outil de hiérarchisation. Lorsqu'un métal cumule un IHH géographiquement extrême, un IVC élevé et une criticité forte, il entre dans la catégorie « priorité absolue ». Il convient alors de mettre en place une politique de diversification d'approvisionnement, de soutien à la recherche pour des substituts, voire de constitution de stocks stratégiques^{[3][4]}.

À l'inverse, on évite d'engager des actions trop coûteuses sur des métaux globalement moins problématiques, même s'ils figurent parfois sur les listes de « ressources critiques » à un niveau macro. De la même manière, les pouvoirs publics peuvent adapter leurs financements, en ciblant plus précisément les projets R&D sur les minerais combinant la plus haute Criticité de Substitution à un IVC et un IHH déjà alarmants^{[4][10]}.

2.5.6. Conclusion : vers un modèle plus opérationnel

En définitive, l'association de l'IHH, de l'IVC et de l'ICS, avec une granularité s'appliquant au composant, vient combler des lacunes que la plupart des matrices de criticité ne comblent pas. Au lieu de pointer simplement que certains métaux se font rares ou que leur production est concentrée, on identifie où, comment et pourquoi ils peuvent peser sur la chaîne du numérique, et quelle marge de manœuvre (substitution, recyclage, etc.) s'avère disponible^[3]^[20].

Cette démarche ouvre ainsi la voie à une analyse plus fine et plus pertinente pour les industriels et les pouvoirs publics, offrant une possibilité de prioriser les actions selon des critères objectivés^[4]^[10].

Les prochaines étapes consistent, d'une part, à rendre ce modèle encore plus dynamique (intégration de l'historisation, de la logistique, des stocks, du délai de propagation dans la chaîne, de la capacité d'extraction actuelle pour compléter la notion de réserve) et, d'autre part, à relier ces ressources à d'autres enjeux, par exemple, la disponibilité énergétique ou la géopolitique, afin de pousser plus avant la dimension « polycrise » qu'affronte aujourd'hui le secteur numérique^[8]^[14].

3. ARTICULATION GLOBALE DU MODÈLE

L'élaboration d'un diagnostic fiable sur la vulnérabilité du secteur numérique repose non seulement sur la **sélection d'indices** (IHH, IVC, Criticité), mais également sur la manière dont on **cartographie** l'ensemble des flux et des maillons de la chaîne^[14].

Il ne suffit plus de dresser une liste de métaux avec des niveaux de criticité. Il est essentiel de comprendre le circuit de ces ressources, qui les transforme et à quels moments le numérique entre en concurrence avec d'autres usages^[3]^[6].

C'est dans cet esprit que nous avons construit un **graphe principal** assorti de **sous-graphes** thématiques, afin de rendre lisible la complexité des interactions et de préparer une mise à jour ou une extension du modèle dès lors que de nouvelles données apparaissent.

3.1. Graphe principal vs sous-graphes

Le **graphe principal** suit la logique traditionnelle de la chaîne de fabrication dans le numérique : depuis l'extraction (où la ressource est issue de la mine ou du gisement) jusqu'à l'assemblage final, en passant par le raffinage et la fabrication de composants^[14].

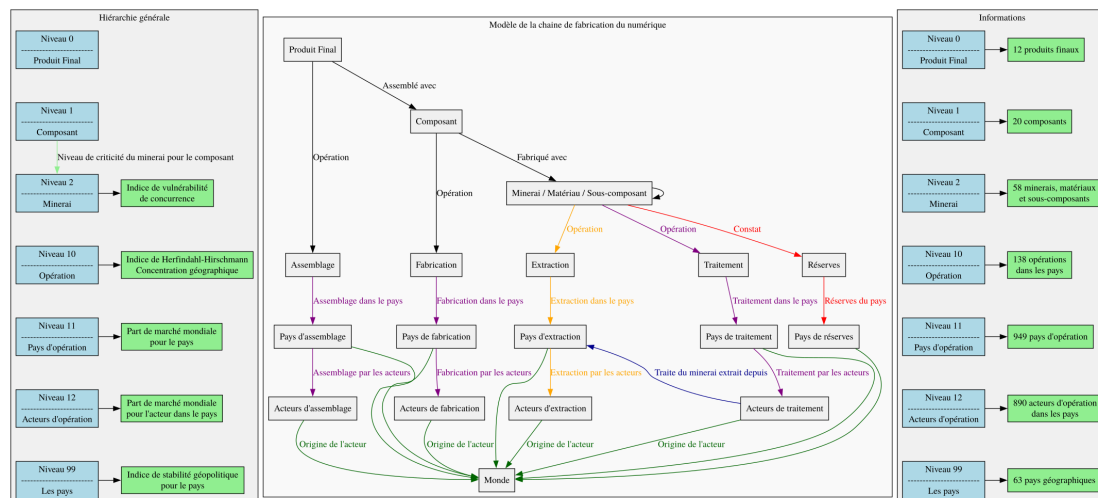


Figure 3. Modélisation de la chaîne de fabrication du numérique

Cette vue linéaire : Extraction → Raffinage → Composants → Assemblage → Produit final, demeure très utile pour avoir un aperçu global du trajet d'un minéral (ou de toute autre matière) vers l'objet qui sort en bout de chaîne (smartphone, serveur, équipement connecté, etc.). Chaque nœud de ce flux peut être étiqueté par les **valeurs** IHH, IVC et Criticité de Substitution correspondant aux ressources qu'il manipule^[7].

Cependant, le numérique ne peut être réduit à un flux linéaire : il est façonné par des **dimensions transversales** qui méritent d'être traitées à part.

C'est pourquoi nous introduisons des **sous-graphes** thématiques.

- L'un d'eux traite par exemple de la **logistique** et des transports : un minerai peut être abondant, mais, si son acheminement repose sur un canal maritime unique ou quelques transporteurs majeurs (IHH élevé en logistique), la chaîne reste vulnérable^[7]^[16].
- Un autre sous-graphe met en lumière l'**outillage critique**, comme les machines de lithographie qui, même si elles ne consomment pas directement un minerai particulier, conditionnent la production de composants^[11].
- Il en va de même pour les **ressources communes** (eau, énergie) : leur rareté ou leur usage concurrent par d'autres industries (ex. agriculture, production d'hydrogène) peut soudain bloquer la disponibilité pour la fonderie ou l'assemblage de produits électroniques^[17].
- Enfin, un sous-graphe spécifique « aléas » (inondations, tensions géopolitiques, instabilité politique) aide à modéliser des événements susceptibles de perturber ponctuellement ou durablement la chaîne^[8]^[18].

En pratique, chacun de ces sous-graphes se **connecte** au graphe principal par un « nœud ancre » ou par des liens vers les nœuds impactés : on montre ainsi que la production de composants dépend de la logistique, qu'elle-même peut être affectée par un aléa climatique, etc.^[7]^[14]

L'**IHH**, l'**IVC**, l'**ICS** et l'**ISG** demeurent pertinents dans ces modules annexes. Par exemple, la logistique peut être fortement concentrée (IHH élevé si trois grandes compagnies de fret se partagent 80 % des flux), ou l'énergie peut être captée par d'autres secteurs (IVC élevé si la demande industrielle est trop forte)^[16].

Le modèle s'apparente donc à une **structure modulaire**, extensible au besoin.

3.1.1. Apport d'une structure hiérarchique dans le graphe principal

Bien qu'un graphe puisse représenter une suite de processus et de flux de manière plus ou moins libre, il est souvent précieux d'y introduire une **hiérarchie explicite**.

Dans notre modèle, cela signifie que chaque nœud se voit positionné à un certain **niveau** (ou « couche ») représentant une étape précise de la chaîne.

Cette **organisation hiérarchique** présente plusieurs avantages :

1. **Visibilité immédiate des étapes** Le simple fait de placer l'extraction en amont et l'assemblage en aval rend le parcours d'une ressource beaucoup plus clair.
Si un métal particulier doit passer par deux ou trois étapes de traitement, on voit immédiatement où se situe chacun de ces maillons dans la hiérarchie.
2. **Localisation fine des indices** Chaque nœud (ou groupe de nœuds) correspondant à un niveau précis se voit rattacher des valeurs IHH, IVC et Criticité qui **dépendent** de l'étape concernée.

Par exemple, l'IHH mesuré au niveau de l'extraction (pour la concentration géographique) peut être très différent de l'IHH au niveau de la fabrication (pour la concentration des fondeurs ou assembleurs).

De même, la Criticité de Substitution appliquée au « niveau 2 » (ex. composants) peut être plus aiguë que dans un stade d'assemblage où plusieurs alternatives existent.

Grâce à la hiérarchie, on **cible** l'analyse sur le bon niveau, au lieu d'avoir un « seul » indice IHH ou Criticité pour toute la chaîne.

3. **Identification rapide des points de rupture** Lorsqu'un IHH ou un IVC est élevé à un niveau donné, l'impact sur la suite de la chaîne (niveaux en aval) devient aussitôt visible : si l'approvisionnement en composants (niveau 2) est concentré chez un unique acteur, le **niveau 3** (assemblage final) dépend fortement de ce goulot.

La hiérarchie sert de **repère visuel** pour voir jusqu'où remonte ou descend la vulnérabilité.

4. **Gestion modulaire des sous-graphes** Dans certains cas, l'utilisateur du modèle peut zoomer sur un niveau précis (par exemple, le **niveau 1** dédié au raffinage) afin d'approfondir le sous-graphe « traitement & logistique ».

Le principe hiérarchique donne alors un repère : on sait que ce sous-graphe s'attache uniquement à la transition entre l'extraction (niveau 0) et la fabrication (niveau 2). Le fait d'avoir un “rang” ou un “layer” assigné évite de créer un plat de « spaghetti » où tout s'entrecroise de façon indistincte.

5. **Insertion des autres facteurs (logistique, eau, etc.)** Enfin, la hiérarchie peut se combiner avec les **clusters** thématiques. Ainsi, chaque sous-graphe (logistique, eau, énergie...) peut indiquer à quel(s) niveau(x) de la hiérarchie il se rattache.

Si la logistique est surtout cruciale entre le niveau 0 et 1 (exporter la ressource brute) et entre 2 et 3 (transporter les composants finis), on peut l'indiquer par des **arrêtes** en pointillé qui relient, visuellement, deux blocs de rangs différents. Cela clarifie la question : « où intervient la logistique ? » et « quel niveau subit un stress hydrique ? ».

En somme, la **structure hiérarchique** confère au graphe une **lisibilité accrue** et permet une **application fine** des trois indices :

- **IHH** localisé (p. ex. extraction vs. assemblage),
- **IVC** lié aux secteurs concurrents à chaque stade (d'autres industries peuvent rivaliser pour le même métal en amont, ou pour le même composant en aval),
- **Criticité** pouvant varier selon le composant ou la technologie utilisée.

Cette hiérarchie devient donc un **pivot essentiel** : on passe d'un grand schéma unique à un **ensemble de couches** où les indices sont appliqués de façon ciblée. L'analyse s'en trouve **plus opérationnelle**, car on sait précisément “à quel stade de la chaîne” intervient le risque, et sur “quel composant” il repose.

3.2. Évaluation des impacts et compréhension des relations

Avec les éléments décrits ci-dessus, les évaluations des impacts se feront en pointant les interactions des aléas avec le graphe ; à titre d'exemple :

- la géopolitique agira sur les pays, qu'ils soient les pays d'opération (niveau 11), les pays d'origine de minerai (relation « Traite du minerai extrait de », ou les pays d'origine d'un acteur
- les catastrophes climatiques (type inondation) agiront sur les opérations des acteurs dans le pays concerné (niveau 11 et 12)

Ainsi, avec la connaissance de toutes les relations existantes et des parts de marché, la connaissance de ces interactions d'aléas sur la chaîne permettent d'estimer l'impact sur son ensemble.

Pour comprendre le principe, prenons l'exemple de la chaîne complète entre la France et le smartphone. La voici dans son intégralité ; elle est extrêmement simple :

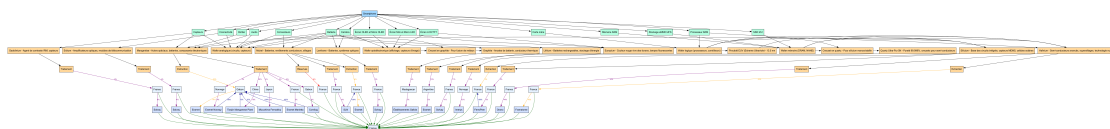


Figure 4. Chaîne de fabrication du smartphone – impact de la France

Le zoom sur le manganèse permet de comprendre les impacts potentiels :

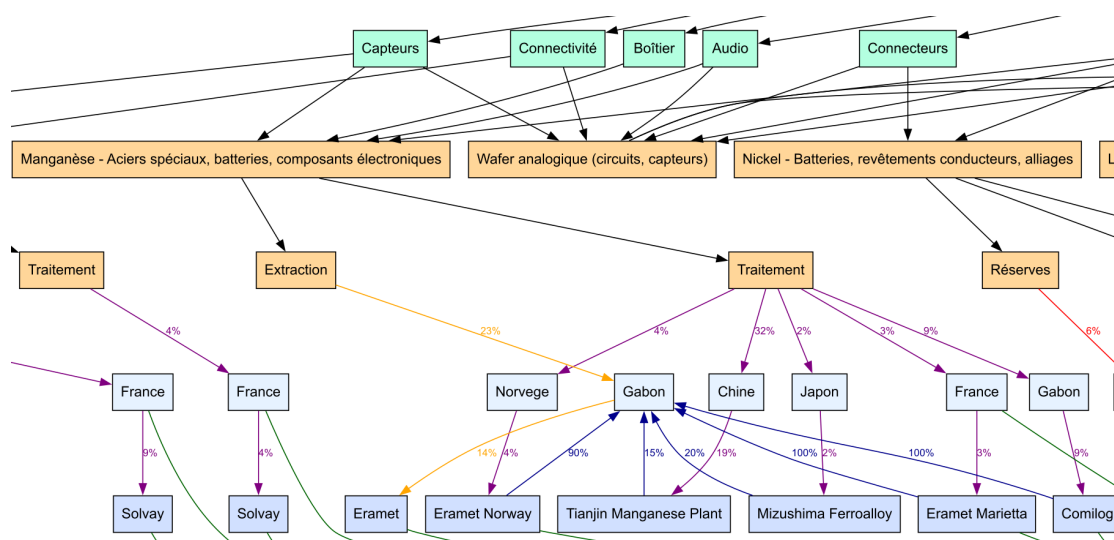


Figure 5. Chaîne de fabrication du smartphone – zoom sur le manganèse

- 23% de l'extraction mondiale du manganèse se fait au Gabon
 - 14% de l'extraction mondiale est réalisée par Eramet au Gabon
 - Eramet Norway importe 90% de son manganèse depuis le Gabon et réalise 4% du traitement mondial du minerai en Norvège, soit la totalité du traitement réalisé dans ce pays
- Respectivement, 3% et 9% du traitement mondial du manganèse sont réalisés en France et au Gabon par Eramet Marietta et Comilog, dont 100% du minerai provient du Gabon

Une inondation ou un éboulement d'une mine au Gabon se traduit par un impact sur un ou plusieurs acteurs d'extraction avec un pourcentage de baisse d'activité à répercuter sur la chaîne.

Les manques identifiés sur les stocks et les délais de propagation et qui seront corrigés dans une prochaine version permettront de mieux évaluer l'impact réel. Par exemple, la mine de Spruce Pine aux États-Unis concentre environ 80% du quartz ultra pur nécessaire à la fabrication des creusets ; les stocks permettent de compenser 3 mois d'arrêt de l'extraction.

3.3. Données et sources

L'intérêt principal de cette construction réside dans la **qualité des données** utilisées pour établir ces indices.

Nous nous appuyons, dans un premier temps, sur des bases reconnues :

- Les publications du **USGS** (U.S. Geological Survey) fournissent des informations détaillées sur la production, les réserves et la localisation des ressources minérales. Elles servent de référence privilégiée pour calculer ou estimer l'IHH dans sa dimension extraction ou réserves^[12].
- Les rapports de l'**IEA**, de la **WSTS** (World Semiconductor Trade Statistics) et d'**IDC** (International Data Corporation) offrent des projections sur la croissance de la demande numérique, qu'il s'agisse de semi-conducteurs, de dispositifs ou de services.
Leur intérêt est double : d'une part, on y puise des estimations de croissance nécessaires au calcul de l'IVC, d'autre part, on peut comparer ces chiffres avec les autres secteurs en croissance (automobile, énergies renouvelables, etc.)^{[5][6]}.
- Les listes de la **Commission européenne** relatives aux matières premières critiques (EU CRM) viennent consolider l'appréciation macro du risque, et permettent de pointer les minerais souvent jugés « sensibles »^{[4][20][21]}.
- Enfin, divers **rapports industriels**, citons par exemple BloombergNEF ou Benchmark Minerals, complètent la vision sur des points précis, comme les tensions récentes sur le cobalt, le lithium ou le hafnium, et fournissent parfois des projections sur l'évolution de la demande et la répartition des acteurs^[6].

Dans le cadre de l'article, nous avons sélectionné un ensemble de **ressources critiques** (lithium, cobalt, hafnium, etc.) pour en illustrer l'évaluation à travers les trois indices. Nous explicitons leurs évolutions probables en fonction des tendances sectorielles, en soulignant à chaque fois la dimension « concurrence intersectorielle » (IVC), la concentration (IHH) et la substituabilité réelle (Criticité)^{[10][19]}.

Cela permet de **concrétiser** la valeur ajoutée de cette méthodologie : au lieu de se limiter à dire « tel métal est sur la liste de l'UE », on montre exactement **où** se situe le risque (extraction, traitement ?), et **comment** le numérique peut ou non y faire face, compte tenu des substitutions possibles et de la compétition imposée par d'autres domaines^{[4][20]}.

Cette articulation, un **graphe principal** soulignant le flux standard, renforcé par des **sous-graphes** pour les problématiques transversales, aboutit à une cartographie robuste et évolutive : on peut imaginer, à l'avenir, y adjoindre un sous-graphe « dynamique des prix » ou « stocks stratégiques »^{[14][18]}.

La granularité ainsi acquise donne les clés pour mieux prioriser les actions et, idéalement, pour anticiper une polycrise qui affecterait simultanément l'approvisionnement, la logistique et la production de composants avancés^{[8][18]}.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les premiers résultats de l'application de notre méthodologie se révèlent particulièrement éclairants. Pour illustrer son fonctionnement, nous présentons quelques exemples de ressources critiques en examinant à chaque fois les trois indices (IHH, IVC, Criticité) et en soulignant les conséquences concrètes pour le secteur numérique.

4.1. Le cas du Lithium

Le lithium illustre parfaitement le rôle déterminant que la concurrence intersectorielle peut jouer, au-delà des seuls problèmes de concentration.

En effet, si l'Indice de Herfindahl-Hirschmann (IHH) au niveau des acteurs d'extraction demeure relativement faible, plusieurs grandes sociétés minières se partageant le marché, la concentration géographique reste très marquée : l'essentiel de la production mondiale provient d'un petit nombre de régions (principalement l'Amérique du Sud, l'Australie et la Chine)^{[4][20]}. Cet état de fait crée un risque non négligeable de dépendance aux tensions géopolitiques ou logistiques.

Plus frappant encore, l'Indice de Vulnérabilité Concurrentielle (IVC) se situe autour de 45, signalant une vulnérabilité très forte du secteur numérique face à d'autres filières, au premier rang desquelles figurent les véhicules électriques et le stockage d'énergie stationnaire^{[5][6]}.

Dans la pratique, cela signifie que la demande massive de lithium pour les batteries automobiles pourrait capter une grande partie de l'offre disponible, renchérissant d'autant le coût de production des batteries nécessaires aux smartphones, tablettes et ordinateurs portables^{[15][19]}.

L'ICS vient toutefois modérer légèrement ce constat. Avec un score de 0,51, le lithium bénéficie d'alternatives partielles, sous la forme de batteries sodium-ion ou de chimies LFP (lithium fer phosphate). Toutefois, ces solutions impliquent une perte de densité énergétique et peuvent s'avérer moins attractives pour certaines applications exigeant légèreté et autonomie maximale^[15].

Pour le secteur numérique, l'implication se présente sous deux aspects : outre une hausse potentielle des coûts de production, on assiste à un risque de pénuries ou de retards d'approvisionnement, susceptibles de freiner la fabrication de nouveaux appareils^{[6][19]}.

4.2. Le cas du Hafnium

À l'inverse du lithium, dont le marché est relativement disputé, le hafnium apparaît comme un métal ultra-concentré, avec un IHH très élevé qui laisse deviner un quasi-monopole. On recense en effet un ou deux producteurs majeurs dans le monde, ce qui crée une vulnérabilité structurelle^{[4][10]}.

L'IVC, quant à lui, atteint 126, un niveau critique : en plus de ses usages dans l'aéronautique ou le nucléaire, le hafnium s'avère essentiel à la microélectronique de pointe (transistors haute performance, alliages à haute température). Le secteur numérique pourrait dès lors subir de plein fouet toute tension géopolitique ou économique entourant ce métal^[11].

L'ICS se révèle très fort dans ce cas, car peu de matériaux sont capables d'égaler les propriétés du hafnium pour les processeurs avancés ou les composants ultra-haute température^[10].

On se retrouve ici face à un risque de « guerre techno-économique », dans la mesure où la maîtrise du hafnium pourrait conférer un avantage stratégique majeur en termes de compétitivité industrielle et de souveraineté technologique^{[4][8]}.

Les implications pour le numérique sont donc considérables : un blocage d'approvisionnement pourrait freiner l'évolution de l'informatique de pointe, voire pénaliser les entreprises souhaitant innover dans ce domaine^[11].

4.3. Analyse d'ensemble

Les exemples de lithium et de hafnium représentent seulement deux cas emblématiques d'un panorama plus vaste. Au cours de cette étude, nous avons constaté que plusieurs autres métaux, comme le néodyme, le dysprosium, le praséodyme ou le cobalt, présentaient des IVC supérieurs à 30, témoignant d'un risque élevé de concurrence intersectorielle^{[5][10]}.

Les fortes tensions mondiales sur le cobalt, par exemple, s'expliquent à la fois par la croissance rapide des batteries pour véhicules électriques et par l'usage intensif qu'en fait l'électronique portable^{[15][19]}.

D'autre part, l'analyse combinée des divers segments de la chaîne (extraction, raffinage, fabrication de composants, assemblage) confirme une tendance générale à la concentration géographique. Des pays comme la Chine, la République Démocratique du Congo ou le Chili se retrouvent, pour certaines ressources, en position clé^{[4][20]}.

Cette situation génère naturellement une fragilité géopolitique qui peut se traduire par des fluctuations des prix ou des politiques restrictives d'exportation^{[4][8]}.

Enfin, l'ICS joue un rôle d'ajustement : dans certains cas (étain, silicium), la possibilité de recourir à un autre matériau ou à une autre technologie réduit l'urgence perçue, tandis que dans d'autres (hafnium, dysprosium), l'absence de substituts fiables aggrave la vulnérabilité^{[10][19]}.

Au-delà du constat général, chaque acteur du numérique doit donc évaluer précisément ces trois facteurs (IHH, IVC, Criticité) pour la ressource concernée, afin de décider si des mesures telles que la diversification des sources, le stockage stratégique ou la recherche de technologies alternatives s'avèrent prioritaires^{[3][14]}.

Dans l'ensemble, ces résultats confirment la nécessité de dépasser les analyses partielles et d'examiner conjointement la concentration industrielle, la pression concurrentielle exercée par d'autres filières et la faisabilité de la substitution technologique^[10].

Ce n'est qu'à l'intersection de ces trois dimensions que se révèlent les véritables zones de fragilité, et, par conséquent, les mesures les plus efficaces pour y remédier^{[3][18]}.

4.3.1. Exemples d'analyse

La première analyse permet de positionner la concentration géographique actuelle des minerais, par rapport à celle des réserves mondiales, en pondérant les points par la vulnérabilité à la concurrence. Elle donne ainsi une vision moyen – long terme de chacun des minerais et des risques

encourus en fonction des composants qui les utilisent. Elle doit être complétée par l'analyse de criticité de substitution pour évaluer plus finement le risque.

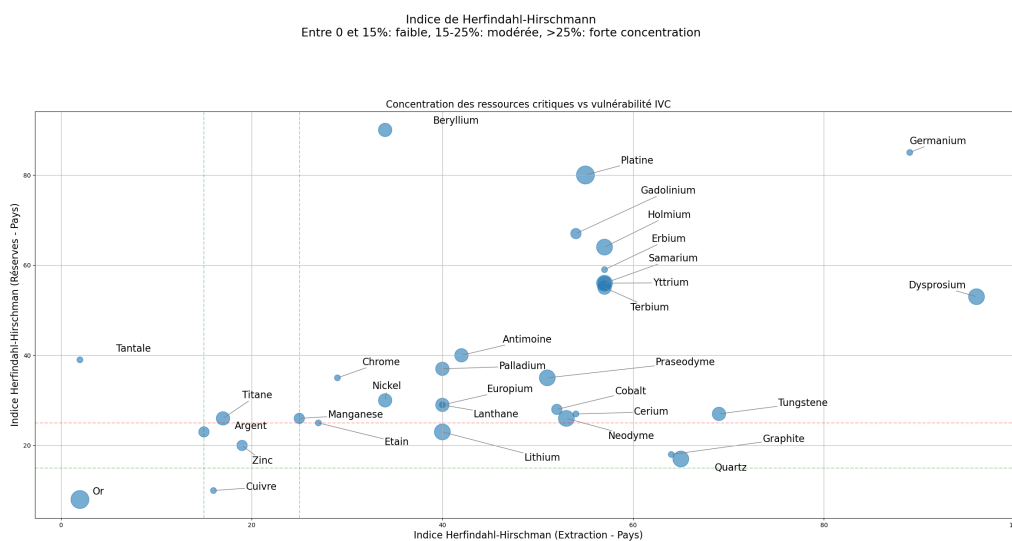


Figure 6. Concentration des minerais et des réserves, pondérée par l'IVC

Les 4 figures suivantes représentent les IHH pays et acteurs pour les opérations d'assemblage, de fabrication, de traitement et d'extraction. Pour ces deux dernières, les points sont pondérés en taille par l'ICS. Les axes verts et rouge horizontaux et verticaux délimitent les seuils de 15% en-dessous duquel la concentration est faible et 25% au-dessus duquel la concentration est forte.

Ainsi dans la figure Fabrication, le processeurs X86 est fortement concentré aussi bien en acteurs qu'en pays.

En Traitement, l'yttrium et le terbium sont fortement concentrés en pays (et modérément en acteurs), avec toutefois, une criticité de substitution globalement plus élevée et donc plus risquée pour le terbium que l'yttrium.

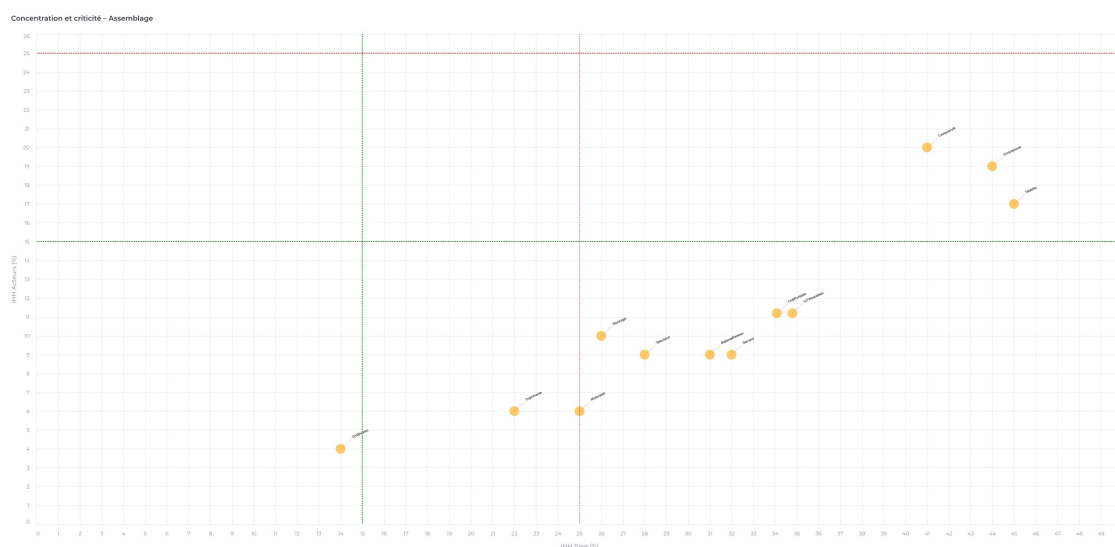


Figure 7. L'assemblage des produits finaux avec les IHH

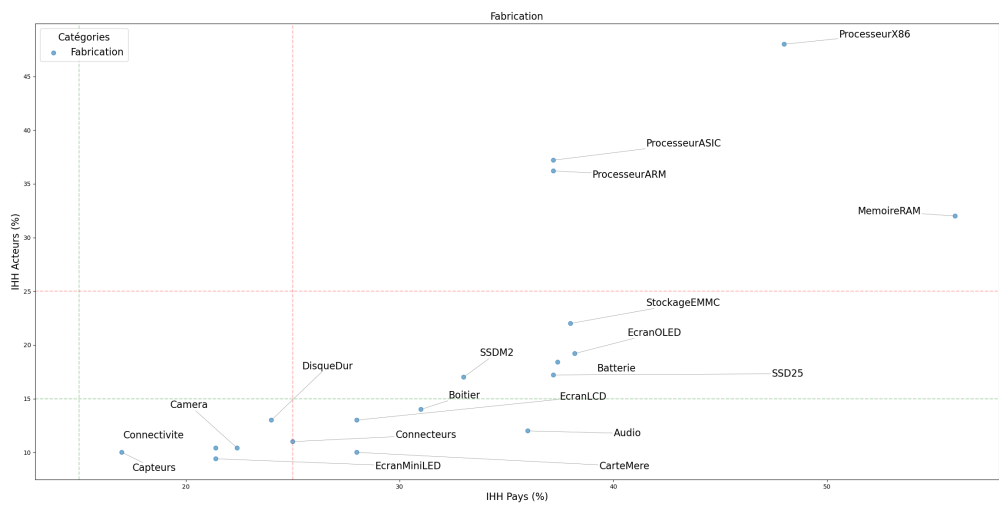


Figure 8. La fabrication des composants avec les IHH

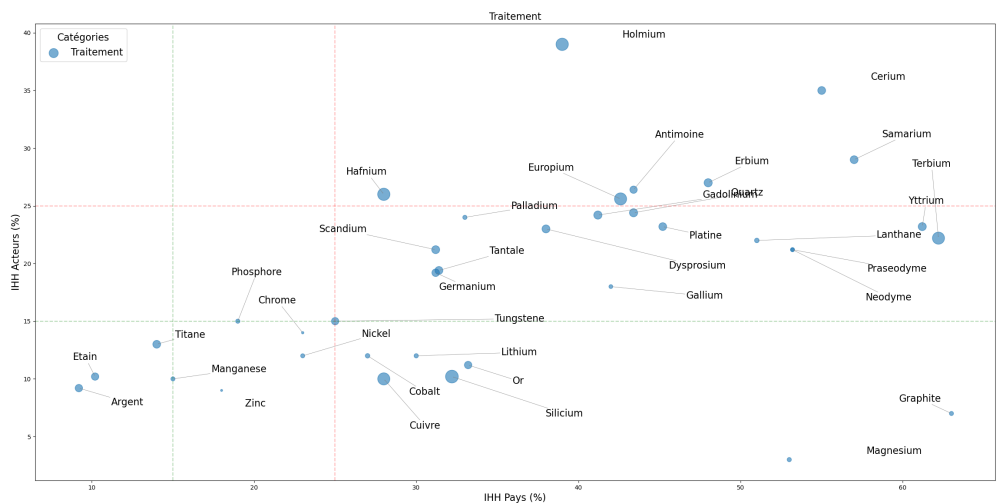


Figure 9. Le traitement des minerais avec les IHH et pondération par la criticité de substitution

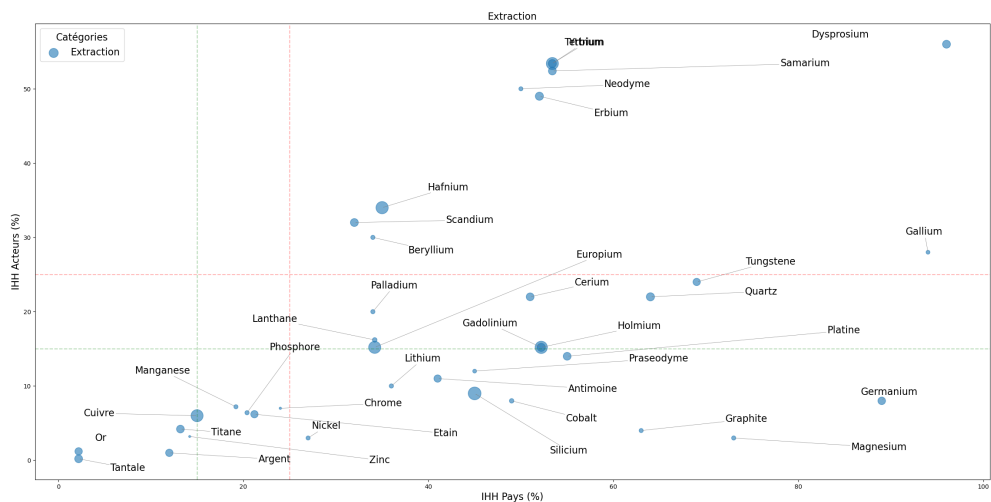


Figure 10. L'extraction des minerais avec les IHH et pondération par la criticité de substitution

Les deux tableaux suivants présentent les IHH pays et acteurs pour les deux opérations d'assemblage de produits finaux et de fabrication de composants.

Assemblage			
IHH	Produit final	Pays	Acteurs
	Casques VR	42	23
	Imprimante	24	10
	IoT / Wearables	36	14
	Matériel IA	27	11
	Matériel Réseau	32	13
	Ordinateur de bureau	16	8
	Ordinateur portable	35	14
	Serveur	34	12
	Smartphone	45	21
	Stockage	28	15
	Tablette	47	19
	Télévision / Écran	30	13
Fabrication			
IHH	Composant	Pays	Acteurs
	Audio	36	12
	Batterie	37	18
	Boitier	31	14
	Caméra	22	10
	Capteurs	17	10
	Carte mère	28	10
	Connecteurs	25	11
	Connectivité	21	10
	Disque dur	24	13
	Écran LCD	28	13
	Écran miniLED	21	9
	Écran OLED	38	19
	Mémoire RAM	56	32
	Processeur ARM	37	36
	Processeur ASIC	37	37
	Processeur X86	48	48
	SSD25	37	17
	SSDM2	33	17
	Stockage EMMC	38	22

Figure 11. Détail des IHH pour l'assemblage et la fabrication

Pour disposer d'une vision globale des minerais et de leurs vulnérabilités, le tableau complet en page suivante propose tous les indices.

5. VULNÉRABILITÉS FACE À LA POLYCRISE

Les analyses précédentes, qui combinent trois indices (IHH, IVC et Criticité de Substitution), doivent être examinées à la lumière d'autres facteurs de risque propres à la situation actuelle de « polycrise globale »^[8].

Il ne suffit pas, en effet, de savoir qu'un minerai est disponible et qu'il bénéficie de plusieurs acteurs de traitement pour qu'il soit véritablement à l'abri : des événements exogènes, tels que des blocages logistiques, des catastrophes climatiques ou des tensions sur les ressources en eau et en énergie, peuvent bouleverser radicalement l'équation^[7]^[8].

5.1. Logistique et transports

Lorsque le trafic maritime est entravé, comme ce fut le cas avec le canal de Suez en 2021, ou que la disponibilité des conteneurs est compromise par une crise, il devient difficile, voire impossible, de faire circuler les matériaux critiques^[7].

Même si les métaux ou les composants électroniques sont produits en quantité suffisante, l'impossibilité de les acheminer au bon moment peut entraîner des ruptures de la chaîne d'approvisionnement pour les fabricants du secteur numérique. L'interruption d'une ligne de production entraîne une reprise de la production particulièrement longue^[16].

Cela est d'autant plus vrai que l'industrie maritime elle-même est hautement concentrée, avec seulement quelques armateurs qui contrôlent le transport international. Cela expose l'ensemble du système à un risque systémique en cas de perturbation majeure ou d'augmentation abrupte des tarifs de fret^[7]^[16].

Dans notre schéma conceptuel, il est crucial de prendre en compte une section dédiée aux aspects logistiques. Les points clés incluent les ports stratégiques, les compagnies maritimes et les corridors de marchandises. En effet, un imprévu, tel qu'une interruption soudaine due aux tensions géopolitiques, a le potentiel de perturber significativement l'approvisionnement minéral, bien que l'extraction et la transformation du métal puissent continuer normalement^[7]^[8].

5.2. Aléas climatiques

La composante climatique représente également une importante source de vulnérabilité. Des sécheresses prolongées peuvent, par exemple, fragiliser l'extraction du lithium au Chili, où l'exploitation des salars nécessite une grande quantité d'eau^[5]^[17].

De même, les inondations peuvent anéantir des infrastructures de transport ou de production, ce qui entraîne des interruptions imprévues dans la chaîne de valeur. Dans diverses zones géographiques, la génération d'électricité hydraulique, indispensable au fonctionnement des usines de traitement, est menacée par des précipitations insuffisantes. Cela entraîne non seulement une hausse du coût de l'électricité, mais aussi des restrictions touchant les installations industrielles^[17].

Afin de prendre en compte ces éventualités, l'architecture modulaire doit refléter les interactions entre chaque site et les aléas climatiques potentiels^[8]^[14].

Les indicateurs IHH, IVC et Criticité pourraient se combiner à une quatrième composante, un coefficient d'« Exposition Climatique », qui quantifierait la probabilité et l'impact d'événements extrêmes sur le lieu de production ou de transformation^[8].

Ainsi, il est possible d'identifier non seulement les ressources soumises à la concurrence entre différents secteurs ou à un monopole, mais également celles dont l'approvisionnement dépend des fluctuations climatiques^[5]^[17].

5.3. Énergie et eau

Finalement, l'approvisionnement en énergie et en eau devient un enjeu de plus en plus crucial et contraignant^[17].

Par exemple, les fonderies de semi-conducteurs consomment énormément d'électricité et d'eau ultra-pure. En période de sécheresse, on a vu certaines usines taïwanaises devoir ralentir leur production, alors que la population subissait des restrictions d'eau^[12].

Lorsque d'autres industries, telles que l'agriculture et la chimie, sont soumises aux mêmes contraintes hydriques, une forme de rivalité émerge quant à l'approvisionnement en eau, venant s'ajouter à la compétition pour les ressources minérales elles-mêmes^[17].

Dans ce contexte, la résilience d'un site industriel dépend tout autant de la sécurisation de son approvisionnement en minerai que de la garantie d'un accès continu à l'énergie et à l'eau nécessaire à son fonctionnement^[17].

Les indicateurs traditionnels (IHH, IVC) ne prennent pas en compte spontanément cette dimension. C'est pourquoi notre modèle modulaire prévoit l'existence d'un sous-ensemble de graphes « Ressources partagées », dans lequel le stress hydrique et la disponibilité électrique sont intégrés en tant que facteurs pouvant entraîner des perturbations soudaines dans les activités^[14]^[17].

Ce sont les facteurs imprévisibles et distincts, tels qu'une crise logistique, une sécheresse ou une crise géopolitique, qui peuvent se combiner pour donner lieu à une situation de crise complexe et perturbatrice pour l'ensemble de la chaîne numérique^[8]^[18].

Par conséquent, l'analyse de la logistique, des aléas climatiques et de la concurrence pour les ressources de base met en évidence la nécessité d'une approche encore plus globale^[7]^[8].

5.4. Conclusion

Les trois premiers indicateurs restent essentiels pour comprendre l'architecture du marché (IHH), la rivalité sectorielle (IVC) et le niveau de remplacement (Criticité). Toutefois, il est maintenant nécessaire d'y ajouter une analyse des menaces externes, que ce soit les changements climatiques, les problèmes logistiques, ou encore les questions relatives à l'approvisionnement en eau et en énergie^[8]^[17].

C'est grâce à sa capacité à mettre en évidence tous les liens de dépendance qu'un graphe modulaire tire sa puissance. Il montre comment une perturbation bien placée peut entraîner, par un effet de dominos, un profond bouleversement dans le domaine du numérique^[14]^[18].

6. PLAN D'ACTION POUR UN MODÈLE COMPLET ET ROBUSTE

6.1. Structurer et harmoniser les données sources

Objectif : disposer d'un socle documentaire commun, clair et régulièrement actualisé, pour alimenter les indices (IHH, IVC, ICS, ISG), ainsi que les dimensions logistiques ou climatiques^{[14][18]}.

Consolidation des indicateurs de base

- Établir un **référentiel** listant chaque ressource (minérale ou non), chaque composant concerné, et la façon de calculer IHH, IVC, Criticité (sources, périodicité de mise à jour)^{[7][9]}.
- Clarifier les échelles temporelles (par ex. mises à jour trimestrielles ou semestrielles).

Systématisation du recueil

- Formaliser la collecte (production, réserves, parts de marché, croissance de la demande...) via un pipeline ou un outil de suivi^{[4][12]}.
- Mettre en place un **tableau de bord** pour repérer rapidement les évolutions (fusions-acquisitions, changements de sources minières, etc.)^{[7][18]}.

6.2. Développer la logique modulaire et les sous-graphes

Objectif : rendre le modèle flexible et évolutif, afin d'intégrer progressivement de nouveaux modules (logistique, eau, énergie, outillage critique...)^[14].

Structure du Graphe Principal

- Finaliser la représentation « Extraction → Traitement → Fabrication → Assemblage → Produit final », où chaque nœud intègre les indices (IHH, IVC, ICS, ISG)^[14].
- Veiller à la possibilité de distinguer, pour l'IHH, plusieurs niveaux (extraction, réserves, traitement, fabrication, assemblage)^{[9][14]}.

Sous-graphes thématiques

- Créer des **clusters** séparés pour la logistique (routes, ports, armateurs...) ou les ressources communes (eau, énergie)^{[7][17]}.
- Autoriser la connexion de ces sous-graphes via des liens “dashed” avec le graphe principal, en laissant une **interface** clairement définie (ex. un nœud “usine” reliant à un nœud “fourniture eau”)^[14].

2.3 Maintenir la cohérence globale

- Définir des **règles de nommage** et un style visuel cohérent pour éviter tout chevauchement ou duplication de nœuds^[7].

- Mettre en place un script (Graphviz DOT ou autre) qui génère automatiquement une **version lisible** du graphe et gère l'ajout de nouveaux éléments sans briser la structure existante^[14].

6.3. Intégrer la dimension historique et les scénarios

Objectif : passer d'une vision statique à une vision dynamique, permettant de repérer les tendances et de tester des hypothèses de crise^[18].

Historisation

- Consigner à intervalles réguliers (annuel ou semestriel) les valeurs d'IHH, IVC et Criticité pour chaque ressource/composant^[4]^[18].
- Mettre en place un **historique** simple (par ex. un CSV ou une base de données) pour suivre l'évolution de la concentration, de la demande, etc.^[14].

Simulation de scénarios

- Permettre de simuler des chocs (ex. baisse de 30 % de la production dans une région, ou boom de la demande dans un autre secteur)^[6]^[8].
- Adapter le graphe pour incorporer un *coefficient de crise* sur la production, la logistique ou la Criticité, et observer les répercussions sur l'ensemble du modèle^[7]^[14].

6.4. Approfondir la notion de polycrise

Objectif : enrichir le modèle pour qu'il prenne en compte les aléas logistiques, climatiques et géopolitiques de manière plus fine^[8].

Module aléas

- Introduire un **paramètre “vulnérabilité aux événements extrêmes”** sur chaque site ou région (ex. sécheresse, inondation, instabilité politique, etc.)^[8]^[17].
- Affecter un **coefficient d'aléa** qui, combiné à l'IHH ou à l'IVC, amplifie la vulnérabilité locale^[7]^[8].

Interactions eau/énergie

- Dans le sous-graphe « Ressources communes », ajouter des nœuds « Eau » et « Énergie » reliés aux étapes de la chaîne pour mesurer la sensibilité à une pénurie hydrique ou électrique^[12]^[17].
- Évaluer un **score d'intensité** (consommation, concurrence d'autres secteurs) pour chaque site, de sorte que le modèle révèle immédiatement les points critiques si l'eau ou l'électricité vient à manquer^[17].

6.5. Tester et valider le modèle sur des cas concrets

Objectif : confronter la théorie au terrain et affiner la robustesse du modèle^[14]^[18].

Études de cas ciblées

- Sélectionner 2 ou 3 ressources stratégiques (ex. lithium, cobalt, hafnium) et modéliser toute la chaîne, y compris logistique et polycrise^{[5][6][10]}.
- Comparer les résultats du modèle à des **cas historiques** (crise du canal de Suez, pénurie d'eau à Taïwan, restrictions à l'exportation) pour vérifier que la cartographie révèle bien les vulnérabilités observées^{[7][12]}.

Recueil des retours d'experts

- Solliciter des **industriels** (fonderies, assembleurs), des **fournisseurs logistiques**, des **analystes** (géopolitique, climat) pour évaluer la pertinence du graphe et la fiabilité des données^{[7][18]}.
- Corriger la granularité des nœuds si nécessaire : fusion, scission, ou hiérarchisation plus fine (niveau local vs. national)^[14].

6.6. Mettre en œuvre un workflow de mise à jour et d'évolution

Objectif : institutionnaliser l'actualisation et le suivi du modèle, pour qu'il reste pertinent à moyen et long terme^{[14][18]}.

Pilotage technique

- Définir un **référent** (équipe ou structure) responsable de la maintenance du graphe, de l'intégration des nouvelles données et de la mise en œuvre des scripts Graphviz ou équivalents^{[7][14]}.
- Mettre en place un **système de versionnement** (par ex. Git) pour suivre les modifications du fichier DOT et des données sources^[14].

Calendrier de révision

- Prévoir des “**releases**” du modèle (annuelles ou semestrielles) avec un rapport décrivant les évolutions majeures (nouvelles ressources, nouveaux sous-graphes, changements d'indices)^{[4][18]}.
- Engager une **communauté d'utilisateurs** (chercheurs, décideurs, industriels) pour recueillir des retours, signaler des manques ou proposer des améliorations^{[7][14]}.

6.7. Conclusion

Ce plan d'action, entièrement consacré à la **construction et à l'évolution** du modèle, vise à renforcer sa robustesse et sa pertinence. Depuis la consolidation des données initiales jusqu'à l'historisation des indicateurs et l'intégration de scénarios de polycrise, chaque étape contribue à forger une vision systémique, à la fois plus précise et plus évolutive^{[14][18]}.

En veillant à un workflow de mise à jour régulier et en impliquant les experts de terrain, on peut espérer disposer, à terme, d'un **véritable observatoire** de la vulnérabilité des chaînes du numérique, modulaire et capable de s'adapter aux crises à venir^{[7][8][14]}.

7. CONCLUSION GLOBALE

Le secteur numérique, fondamental dans nos économies interconnectées, se trouve exposé à une variété de vulnérabilités à la fois industrielles, géopolitiques et environnementales^{[4][8]}.

Les approches classiques de « criticité », souvent limitées à deux grands axes (risque d'approvisionnement et importance économique), ne rendent pas compte de la complexité réelle des chaînes de fabrication de l'électronique^{[3][20]}.

C'est pourquoi nous avons proposé un modèle combinant l'Indice de Herfindahl-Hirschmann, l'Indice de Vulnérabilité Concurrentielle, l'indice de Criticité de Substitution et l'Indice de Stabilité Géopolitique, chacun décliné à un niveau de granularité plus fin, intégrant à la fois la concurrence intersectorielle et la faisabilité technique d'une substitution^{[3][9][10]}.

Le recours à un graphe modulaire, construit à l'aide de Graphviz, offre la possibilité de visualiser les flux matériels et de repérer aisément les points névralgiques : un même métal peut se révéler abondant mais quasi-inaccessible au numérique, un acteur de l'assemblage peut, à lui seul, cristalliser une dépendance industrielle disproportionnée, et un aléa logistique ou climatique peut soudain bloquer la fourniture d'eau ou d'électricité indispensable à la production^{[7][8][14]}.

Cet éclairage multi-étapes permet alors de dégager un plan d'action focalisé sur l'amélioration continue du modèle, depuis la consolidation des données jusqu'à l'intégration d'aléas ou d'évolutions de marché, en passant par l'historisation des indicateurs^{[14][18]}.

En dernier ressort, cette démarche vise à outiller les décideurs, tant politiques qu'industriels, pour qu'ils puissent prioriser leurs réponses face à une éventuelle crise d'approvisionnement, en sachant exactement où réside la vulnérabilité : dans la concentration, dans la concurrence avec d'autres secteurs ou dans l'impossibilité technologique de substituer un métal critique dans un composant donné^{[3][4][10]}.

C'est dans cette vision fine et contextualisée que réside la force du modèle proposé : il ne décrit pas seulement la rareté des ressources, mais désigne de façon opérationnelle les leviers d'action et les segments à sécuriser au sein de la chaîne numérique^{[8][14][18]}.

8. RÉFÉRENCES

1. European Commission (2020) – Study on the EU's list of Critical Raw Materials
2. National Research Council (2008) – Minerals, Critical Minerals, and the US Economy
3. European Commission (2023) – Critical Raw Materials Act Proposal (COM(2023) 160 final)
4. International Energy Agency (2021) – The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions
5. BloombergNEF (2022) – New Energy Outlook
6. USGS (annuels) – Mineral Commodity Summaries
7. WSTS (2023) – WSTS Semiconductor Market Forecast
8. Adamas Intelligence (2022) – Rare Earth Magnet Supply Chain Outlook
9. Benchmark Mineral Intelligence (2021) – Lithium-ion Battery Supply Chain Ranking
10. Adeyemi, K. & O'Connor, A. (2020) – Substitution Options and R&D Priorities in Critical Mineral Applications, *Materials Today*, 9(4), 377–385
11. Ellson, J., Gansner, E. & North, S. (2004) – Graphviz—Open Source Graph Drawing Tools in *Graph Drawing Software*, Springer
12. IDC (2022) – Worldwide Semiconductor Market Forecast and Ecosystem Analysis
13. Nikkei Asia (2021) – Taiwan's Water Shortage Hits TSMC
14. Baldwin, R. (2021) – Suez Canal Blockage: A Global Supply Chain Wake-up Call, *VoxEU.org*
15. Köse, K. (2023) – Navigating Polycrisis And Mastering Multipolarity By Redefining Supply Chain Resilience, *Forbes*
16. Eurostat (2022) – Glossaire: Indice Herfindahl-Hirschman (IHH)
17. IRENA (2024) – Constructing a ranking of critical materials for the global energy transition
18. RMIS (2020) – Study on the EU's list of Critical Raw Materials
19. Alam, M., et al. (2023) – Role of information processing and digital supply chain in supply chain resilience through supply chain risk management
20. Ambulkar, S., et al. (2024) – A COVID replication and extension of firms' resilience to supply chain disruptions
21. Bauert, H. & Soesoo, A. (2020) – Estonian Paleozoic shelly phosphorites: a continent-scale resource for phosphorus and potential for rare earth elements
22. Life PlasPLUS (2020) – Study on the EU's list of Critical Raw Materials 2020

9. GLOSSAIRE DES TERMES TECHNIQUES

1. **Indice de Herfindahl-Hirschmann (IHH)** Mesure de concentration économique calculée en sommant les carrés des parts de marché des acteurs d'un secteur.
Un IHH élevé indique une forte concentration (monopole ou oligopole), tandis qu'un IHH faible reflète un marché diversifié. Appliqué à l'extraction, le traitement, la fabrication et l'assemblage dans la chaîne numérique.
2. **Indice de Vulnérabilité Concurrentielle (IVC)** Indice quantifiant la pression exercée par d'autres secteurs sur une ressource partagée.
Combine des facteurs comme le ratio de croissance sectorielle, la tension de marché et l'abondance géologique.
Un IVC > 60 signale un risque élevé de pénurie pour le numérique face à des industries concurrentes.
3. **Indice de Criticité de Substitution (ICS)** Score (0 à 1) évaluant la difficulté à remplacer un matériau dans un composant spécifique.
Prend en compte la faisabilité technique (40 %), le délai de mise en œuvre (30 %) et l'impact économique (30 %).
Une criticité de 1 indique une substitution impossible.
4. **Polycrise** Situation où des crises multiples (géopolitiques, climatiques, logistiques) interagissent et amplifient leurs impacts sur les chaînes d'approvisionnement.
Exemple : combinaison de tensions minières et de perturbations énergétiques.
5. **Graphviz** Outil open source de visualisation de graphes utilisant le langage DOT. Permet de modéliser des flux complexes (extraction → assemblage) et des dépendances transversales (logistique, ressources).
6. **Ressources communes** Éléments partagés entre plusieurs industries (eau, électricité, infrastructures).
Leur rareté ou surexploitation peut bloquer simultanément plusieurs maillons de la chaîne numérique.
7. **Sous-graphes** Modules thématiques indépendants dans Graphviz (ex: logistique, aléas climatiques).
Reliés au graphe principal, ils identifient les risques indirects (ex: dépendance à un corridor maritime).
8. **Fondeurs** Entreprises spécialisées dans la fusion des métaux pour produire des alliages ou des semi-conducteurs.
Maillon critique où la concentration géopolitique (ex: Taïwan) génère des vulnérabilités.
9. **Assembleurs** Acteurs transformant les composants en produits finis (ex: smartphones).
Dominés par quelques géants asiatiques, leur localisation concentrée accroît les risques de rupture[1].
10. **Terres rares** Groupe de 17 métaux critiques (néodyme, dysprosium...) essentiels aux aimants permanents et aux technologies vertes.
Production dominée à 90 % par la Chine, créant des dépendances stratégiques.
11. **Recyclage** Processus de récupération des matériaux en fin de vie. Réduit la pression sur les ressources minières, mais limité par des taux de collecte faibles et des coûts de tri élevés.

12. **Stockage stratégique** Réserves de matériaux critiques constituées par les États ou les entreprises pour anticiper les pénuries.
Pertinent pour les ressources à IHH et IVC élevés (ex: hafnium).
13. **Chaîne d'approvisionnement** Ensemble des étapes depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la livraison du produit final.
Sa résilience dépend de la diversification géographique et de la redondance des fournisseurs.

10. LICENCE

Vous êtes autorisé à :

1. **Partager** , copier, distribuer et communiquer le matériel par tous moyens et sous tous formats
2. L'Offrant ne peut retirer les autorisations concédées par la licence tant que vous appliquez les termes de cette licence.

Selon les conditions suivantes :

1. **Attribution** , Vous devez [créditer](#) l'Œuvre, intégrer un lien vers la licence et [indiquer](#) si des modifications ont été effectuées à l'Œuvre. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens raisonnables, sans toutefois suggérer que l'Offrant vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son Œuvre.
2. **Pas d'Utilisation Commerciale** , Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette Œuvre, tout ou partie du matériel la composant.
3. **Pas de modifications** , Dans le cas où vous effectuez un remix, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'Œuvre originale, vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'Œuvre modifiée.
4. **Pas de restrictions complémentaires** , Vous n'êtes pas autorisé à appliquer des conditions légales ou des [mesures techniques](#) qui restreindraient légalement autrui à utiliser l'Œuvre dans les conditions décrites par la licence.

Notes:

Vous n'êtes pas dans l'obligation de respecter la licence pour les éléments ou matériel appartenant au domaine public ou dans le cas où l'utilisation que vous souhaitez faire est couverte par une [exception](#) .

Aucune garantie n'est donnée. Il se peut que la licence ne vous donne pas toutes les permissions nécessaires pour votre utilisation. Par exemple, certains droits comme [les droits moraux](#), [le droit des données personnelles](#) et [le droit à l'image](#) sont susceptibles de limiter votre utilisation.