

Fiche technique : Indice de Criticité de Substituabilité (ICS)

Version	Date	Commentaire
1.0	2025-04-22	Version initiale

Document généré avec FabNum par Stéphan Peccini

Licence : CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Utilisation non commerciale - Pas d'Œuvre dérivée

Contexte et objectif

La criticité a pour objectif de pondérer une part de marché qui se trouve sur un chemin critique de la chaîne d'approvisionnement. À titre d'exemple, un minerai utilisé dans le numérique et dont le traitement est réalisé à 95% par un acteur, mais dont la criticité est faible aura un moindre impact qu'un autre minerai à 80% de part de marché pour un acteur, mais avec une forte criticité.

Mode de calcul

Sur la base des 3 axes suivants, le calcul de l'ICS se fait sous la forme suivante :

$$ICS = 40\% \times F_{tech} + 30\% \times D_{impl} + 30\% \times I_{eco}$$

(où F_{tech} = faisabilité technique, D_{impl} = délai d'implémentation, I_{eco} = impact économique).

Paramètres

Score	Faisabilité technique (40 %)	Délai d'implémentation (30 %)	Impact économique (30 %)
1.0	Aucun substitut connu	Impossible à court/moyen terme (>10 ans)	Coût prohibitif (>5x)
0.7	Substituts théoriques en recherche fondamentale	Long terme (5-10 ans)	Augmentation significative des coûts (2-5x)
0.5	Substituts en développement (TRL 4-6)	Moyen terme (2-5 ans)	Augmentation modérée des coûts (1.5-2x)
0.2	Substituts disponibles mais sous-optimaux	Court terme (6-24 mois)	Légère augmentation des coûts (<1.5x)
0.0	Substituts équivalents disponibles	Immédiat (<6 mois)	Coût équivalent ou inférieur

La déclinaison de cette méthode par relation donnée ci-dessous se base sur des sources, mais aussi sur des estimations qui resteront à vérifier.

Seuils d'interprétation

Indice	Vert	Orange	Rouge
ICS	< 0.3	0.3 – 0.6	> 0.6

Criticité par couple Composant -> Minerai

Audio -> Antimoine - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- Alternative existante:

- **Lesquelles:** Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou le phosphore, modifications des procédés de dopage pour utiliser d'autres éléments.
- **Quel impact:** Modification des caractéristiques électriques des semi-conducteurs analogiques, notamment en termes de mobilité des porteurs et de comportement thermique, potentiellement critique pour les applications analogiques de précision.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouvelles structures de semi-conducteurs utilisant d'autres matériaux ou approches de dopage, technologies basées sur des matériaux bidimensionnels.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances analogiques acceptables mais avec des défis concernant l'intégration dans les procédés de fabrication existants.

Délai d'implémentation: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des profils de dopage alternatifs possible dans un délai de 2-4 ans, incluant les phases de qualification et de validation pour les applications sensibles.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et industrialisation des approches alternatives estimés à 4-7 ans avant adoption à grande échelle dans la production de wafers analogiques.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 15-25% avec les dopants alternatifs, principalement due à des besoins accrus en optimisation des procédés et en contrôle de qualité.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux significatifs pour développer de nouvelles approches, avec une incertitude sur l'impact à long terme sur les coûts de production des wafers analogiques.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

Audio -> Dysprosium - Coefficient: 0.70

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante :**
 - Lesquelles : Aimants samarium-cobalt (SmCo) comme substitut partiel dans les haut-parleurs et écouteurs. Aimants alnico (aluminium-nickel-cobalt) pour certaines applications audio spécialisées.
 - Quel impact : Réduction de 20-30% des performances magnétiques par rapport aux aimants NdFeB (néodyme-fer-bore) dopés au dysprosium, entraînant une perte de sensibilité acoustique et une réduction de la miniaturisation possible des composants audio.
- **Alternative théorique :**
 - Lesquelles : Aimants composites à base de fer-nitrure (Fe-N) actuellement en recherche fondamentale. Aimants nanostructurés à échange-couplé permettant de réduire la quantité de dysprosium nécessaire.
 - Quel impact : Potentiellement comparable aux performances actuelles mais nécessite des avancées significatives en science des matériaux. Les prototypes actuels montrent une stabilité thermique insuffisante pour les applications audio de haute qualité.

Délai d'implémentation: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Transition vers les aimants SmCo estimée à 5-8 ans pour un déploiement industriel à grande échelle, incluant la reconfiguration des chaînes de production et la requalification des produits.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des technologies émergentes comme les aimants Fe-N prévue dans un horizon de 7-10 ans selon les projections des laboratoires de recherche.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Surcoût de 180-250% pour les aimants SmCo par rapport aux aimants NdFeB traditionnels, principalement en raison du coût élevé du cobalt et des procédés de fabrication plus complexes.
- **Alternative théorique:**
 - Estimation d'un premium de prix de 200-300% durant les premières années de commercialisation des nouvelles technologies d'aimants, avant que les économies d'échelle ne réduisent progressivement ce différentiel.

Sources

- [1] - Binnemans, K., et al. (2018). "Rare Earths and the Balance Problem: How to Deal with Changing Markets?", *Journal of Sustainable Metallurgy*, 4(1), 126-146.
- [2] - Pavel, C.C., et al. (2017). "Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines", *Resources Policy*, 52, 349-357.
- [3] - Skokov, K. P., & Gutfleisch, O. (2018). "Heavy rare earth free, free rare earth and rare earth free magnets - Vision and reality", *Scripta Materialia*, 154, 289-294.
- [4] - European Commission. (2023). "Study on the Critical Raw Materials for the EU", Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy.
- [5] - Poudyal, N., & Liu, J. P. (2013). "Advances in nanostructured permanent magnets research", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(4), 043001.

Audio -> Gallium - Coefficient: 0.47

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Arséniure de silicium (SiAs), phosphure d'indium (InP).
 - **Quel impact:** Performances inférieures en fréquence (> 30% de perte) et rendement énergétique réduit. Coûts de production augmentés de 15-25% pour compensation des pertes.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Semi-conducteurs à base de germanium dopé, composites 2D (ex. graphène/h-BN).
 - **Quel impact:** Potentiel de performances équivalentes mais nécessite des avancées majeures en ingénierie quantique. Problèmes de stabilité thermique persistants.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Transition partielle vers InP réalisable en 1-3 ans pour applications non critiques.
- **Alternative théorique:**
 - Technologies émergentes estimées à 4-6 ans pour validation industrielle (R&D intensive en cours).

Impact coût: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Surcoût opérationnel de 20-35% pour maintien des spécifications techniques avec substituts.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements R&D initiaux > 200M€ pour l'industrie européenne. Réduction à 50-70% des coûts à horizon 2030.

Sources

- 1] - Ambacher, O. (2018). "GaN technology for RF applications", *Compound Semiconductors Magazine*.
- 2] - European Commission (2024). "Critical Raw Materials Resilience Dashboard".
- 3] - Yole Développement (2023). "RF GaN Market Report".

Audio -> Germanium - Coefficient: 0.64

Faisabilité technique: 0.64

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Silicium-germanium (SiGe) avec teneur réduite en germanium, silicium dopé fortement pour certaines applications analogiques, matériaux III-V pour des applications spécifiques.
 - **Quel impact:** Réduction des performances en termes de mobilité des porteurs de charge et de fonctionnement à haute fréquence. Le germanium offre des avantages uniques pour les circuits analogiques de haute performance.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Graphène et autres matériaux bidimensionnels, nouveaux composés semiconducteurs.
 - **Quel impact:** Potentiel de dépasser les performances du germanium pour certaines applications spécifiques, mais avec des défis majeurs concernant la fabrication à l'échelle industrielle.

Délai d'implémentation: 0.64

- **Alternative existante:**
 - Adoption d'alternatives à base de silicium estimée à 2-4 ans, avec des compromis importants sur les performances qui nécessiteraient une reconception des circuits analogiques.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des technologies émergentes estimée à 5-8 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.64

- **Alternative existante:**
 - Impact variable selon l'alternative : potentielle réduction des coûts avec des solutions purement à base de silicium, mais compensée par des besoins accrus en optimisation de conception.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une trajectoire de réduction de coûts incertaine à moyen terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

Audio -> Manganese - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages d'aluminium à haute capacité d'amortissement, matériaux composites spécialisés, et certains alliages cuivre-zinc à propriétés vibrationnelles améliorées.
 - **Quel impact:** Réduction de 30-40% des capacités d'amortissement des vibrations par rapport aux alliages manganèse-cuivre, particulièrement dans les plages de fréquences critiques pour l'audio (0,01 Hz à 10 MHz), entraînant une dégradation de la qualité sonore due aux résonances parasites.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouvelles structures métalliques à cristaux jumeaux (twin crystals) sans manganèse, matériaux nanostructurés avec des propriétés d'amortissement améliorées.
 - **Quel impact:** Potentiellement comparable aux performances actuelles mais nécessite des développements significatifs en science des matériaux pour reproduire l'effet d'amortissement créé par le mouvement entre les frontières martensitiques des alliages manganèse-cuivre.

Délai d'implémentation: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des alliages alternatifs estimée à 2-5 ans pour les applications audio haut de gamme, incluant la reformulation des composants et la validation acoustique des nouvelles solutions.

- **Alternative théorique:**
 - Développement des nouveaux matériaux nanostructurés prévu dans un horizon de 5-7 ans pour atteindre des performances d'amortissement similaires dans toute la plage de fréquences requise.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Surcoût estimé de 150-200% pour les alliages spécialisés de remplacement, principalement en raison de procédés de fabrication plus complexes et de volumes de production plus faibles.
- **Alternative théorique:**
 - Estimation d'une augmentation de prix de 200-250% pour les nouveaux matériaux nanostructurés pendant la phase initiale de commercialisation, avec potentiel de réduction à moyen terme grâce aux économies d'échelle.

Sources

- [1] - Carbide Audio (2024). "TwinDampTM: Improving the Damping Capacity of Manganese-Copper", .
- [2] - Publications Office of the European Commission (2016). "Substitution of critical raw materials in low-carbon technologies", .
- [3] - Midwestaudio.club (2020). "Manganese - New Deck Speakers - MAC/DIY", .
- [4] - Cho SY, et al. (2018). "Effect of Manganese Oxide over Cu-Mn-Based Oxygen Carriers for Chemical Looping Combustion", .
- [5] - Small Caps (2024). "Manganese: the next hot battery metal", .

Audio -> Neodyme - Coefficient: 0.47

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Aimants en ferrite (céramique), aimants alnico (aluminium-nickel-cobalt), aimants samarium-cobalt (SmCo).
 - **Quel impact:** Réduction significative des performances dans les haut-parleurs, notamment pour la reproduction des hautes fréquences et des transitoires. Les aimants ferrite requièrent une taille 5-10 fois plus grande pour obtenir une force magnétique équivalente, compromettant la miniaturisation et l'efficacité des systèmes audio.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nanocomposites magnétiques utilisant moins de terres rares, aimants MnGa (manganèse-gallium), aimants en nitrure de fer (Iron Nitride).
 - **Quel impact:** Le nitrure de fer promet des performances compétitives avec une meilleure tolérance aux températures élevées. Les nanocomposites pourraient offrir une force magnétique similaire tout en utilisant moins de terres rares, mais leur production industrielle reste à prouver.

Délai d'implémentation: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Transition vers les aimants en ferrite nécessitant une réingénierie complète des haut-parleurs, estimée à 2-3 ans pour maintenir un niveau de qualité acceptable. Les fabricants sont déjà contraints d'explorer cette option en raison des tensions d'approvisionnement.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation du nitrure de fer initialement prévue pour 2023, mais toujours en phase de développement pour une production à grande échelle. Les nanocomposites magnétiques pourraient nécessiter 5-7 ans avant d'être disponibles pour les applications audio commerciales.

Impact coût: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Les aimants en ferrite sont significativement moins chers (environ 75-90% moins chers) que les aimants au néodyme, mais les coûts globaux de production augmentent en raison de la réingénierie nécessaire des produits.

- Augmentation de prix de 5-10% au détail pour les produits audio utilisant du néodyme, avec une tendance à la hausse.
- **Alternative théorique:**
 - Le nitrate de fer et les autres matériaux innovants promettent des coûts inférieurs à long terme, mais nécessiteront des investissements initiaux importants pour le développement et l'industrialisation.

Sources

- [1] - DioDIY (2024).“Neodymium vs. Ferrite Magnets in Tweeter Drivers.”,
- [2] - Connected Magazine (2019).“How the depletion of neodymium could affect your business.”,
- [3] - audioXpress (n.d.).“Next-Generation Rare-Earth-Free Magnets Are Coming.”,
- [4] - Magfine (2025).“What Magnets Are Used in Speakers?”,
- [5] - Tritton Audio (2023).“The Role of Neodymium Speaker Drivers in Audio Devices.”,
- [7] - DIY Audio (2005).“If neodymium is all that great... ”,

Audio -> Phosphore - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou l'antimoine, modifications des procédés de dopage pour optimiser l'utilisation du phosphore.
 - **Quel impact:** Modification modérée des caractéristiques électriques des composants analogiques, notamment en termes de niveaux de dopage et de profils de diffusion.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouvelles approches de dopage utilisant des composés moléculaires, techniques de dopage sélectif avancées.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir ou d'améliorer les performances tout en réduisant la dépendance au phosphore élémentaire.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Substitution par d'autres dopants possible dans un délai de 1-3 ans, les techniques de dopage alternatives étant déjà en développement dans l'industrie des semi-conducteurs.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des nouvelles approches de dopage estimés à 3-5 ans avant adoption industrielle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Augmentation limitée des coûts (5-15%) pour les dopants alternatifs, principalement due à des ajustements de procédés.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux modérés pour les nouvelles techniques de dopage, avec un potentiel de réduction des coûts à moyen terme grâce à l'amélioration de l'efficacité des procédés.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

Audio -> Praseodyme - Coefficient: 0.41

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Aimants en ferrite, aimants alnico (aluminium-nickel-cobalt), et aimants samarium-cobalt qui ne contiennent pas de praseodyme.

- **Quel impact:** Réduction des performances magnétiques et augmentation de la taille nécessaire des composants. Les aimants sans praséodyme offrent généralement une densité d'énergie magnétique inférieure, ce qui affecte la miniaturisation et l'efficacité des haut-parleurs et écouteurs.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Aimants NdFeB avec teneur réduite en praséodyme, nanocomposites magnétiques utilisant d'autres compositions métalliques.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances similaires tout en réduisant la dépendance au praséodyme, mais encore au stade de recherche pour les applications audio commerciales.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des aimants sans praséodyme possible dans un délai de 1-3 ans, nécessitant une réingénierie des composants audio et une adaptation des chaînes de production.
- **Alternative théorique:**
 - Développement d'alternatives viables estimé à 4-6 ans pour des applications commerciales, incluant la phase de recherche, d'industrialisation et de qualification pour les standards audio.

Impact coût: 0.30

- **Alternative existante:**
 - Les aimants en ferrite sont considérablement moins chers, mais nécessitent des tailles plus grandes et des coûts de reconception.
 - Les aimants samarium-cobalt sont plus coûteux mais offrent de meilleures performances que les ferrites.
- **Alternative théorique:**
 - Coûts initiaux élevés pour la recherche et le développement, potentiellement compensés par des coûts à long terme plus bas une fois les procédés industrialisés.

Sources

- [1] - MineralInfo (2014). "Panorama 2014 du marché des Terres Rares", .
- [2] - France Minéraux (n.d.). "Praséodyme - Élément atomique n°59 - Symbole Pr", .
- [3] - ADEME (n.d.). "Etude des besoins en métaux dans le secteur numérique", .

Audio -> Silicium - Coefficient: 0.90

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Germanium pour certaines applications spécifiques, matériaux III-V comme l'arséniure de gallium (GaAs) pour les applications haute fréquence.
 - **Quel impact:** Augmentation significative des coûts et complexification des procédés de fabrication. Limitations en termes d'intégration et de compatibilité avec les technologies existantes basées sur le silicium.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux bidimensionnels comme le graphène, nouveaux composés semiconducteurs, approches hybrides combinant différents matériaux.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement supérieures pour des applications spécifiques, mais avec des défis majeurs concernant la fabrication à grande échelle et l'intégration dans les chaînes de production existantes.

Délai d'implémentation: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Adoption limitée d'alternatives pour des applications de niche possible dans un délai de 3-5 ans, mais remplacement complet du silicium non envisageable à court ou moyen terme.
- **Alternative théorique:**

- Développement et commercialisation des technologies alternatives estimés à 10-15 ans avant qu'elles puissent potentiellement concurrencer le silicium à grande échelle.

Impact coût: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Augmentation drastique des coûts (2-10x) avec les matériaux alternatifs actuels, rendant ces solutions économiquement viables uniquement pour des applications à très haute valeur ajoutée.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements colossaux nécessaires pour développer des chaînes de production complètes basées sur de nouveaux matériaux, avec une incertitude significative sur la viabilité économique à long terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

Audio -> Tungstène - Coefficient: 0.61

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages de molybdène, de titane, carbures cémentés alternatifs sans tungstène, alliages aluminium-nickel-cobalt (Alnico), matériaux composites à matrice métallique (Cermet).
 - **Quel impact:** Diminution de 25-35% des performances en termes de résistance à l'usure et à la chaleur dans les filaments et bobines acoustiques. Réduction de la durabilité des composants soumis à des contraintes mécaniques et thermiques élevées.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nitrure de bore cubique (cBN), céramiques avancées comme l'alumine (Al_2O_3) et le carbure de silicium (SiC), polymères à haute performance.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement comparables mais avec des limitations en environnements à haute température et contraintes mécaniques élevées. Durabilité réduite dans des conditions d'utilisation intensive.

Délai d'implémentation: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des alliages sans tungstène réalisable dans un délai de 2-4 ans, nécessitant des ajustements dans les procédés de fabrication et des tests de validation acoustique.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des matériaux céramiques avancés et composites spécialisés estimée à 4-7 ans avant déploiement à grande échelle dans l'industrie audio.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Augmentation des coûts de 50-100% pour les alliages de substitution, principalement en raison de procédés de fabrication plus complexes et d'une durée de vie potentiellement réduite des composants.
- **Alternative théorique:**
 - Majoration estimée à 75-150% pour les matériaux céramiques avancés pendant la phase initiale d'adoption, avec perspective de réduction progressive des coûts avec l'échelle de production.

Sources

- [1] - Kindle-Tech. (2024).“Par Quoi Remplacer Le Carbure De Tungstène ? Explorez Les alternatives.”,
- [2] - MineralInfo. (2022).“Fiche de criticité, Tungstène – W.”,

Batterie -> Antimoine - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou le phosphore, modifications des procédés de dopage pour utiliser d'autres éléments.
 - Quel impact: Modification des caractéristiques électriques des semi-conducteurs analogiques, notamment en termes de mobilité des porteurs et de comportement thermique, potentiellement critique pour les applications analogiques de précision.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Nouvelles structures de semi-conducteurs utilisant d'autres matériaux ou approches de dopage, technologies basées sur des matériaux bidimensionnels.
 - Quel impact: Potentiel de maintenir des performances analogiques acceptables mais avec des défis concernant l'intégration dans les procédés de fabrication existants.

Délai d'implémentation: 0.50

- Alternative existante:
 - Transition vers des profils de dopage alternatifs possible dans un délai de 2-4 ans, incluant les phases de qualification et de validation pour les applications sensibles.
- Alternative théorique:
 - Développement et industrialisation des approches alternatives estimés à 4-7 ans avant adoption à grande échelle dans la production de wafers analogiques.

Impact coût: 0.70

- Alternative existante:
 - Augmentation potentielle des coûts de 15-25% avec les dopants alternatifs, principalement due à des besoins accrus en optimisation des procédés et en contrôle de qualité.
- Alternative théorique:
 - Investissements initiaux significatifs pour développer de nouvelles approches, avec une incertitude sur l'impact à long terme sur les coûts de production des wafers analogiques.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

Batterie -> Cobalt - Coefficient: 0.57

Faisabilité technique: 0.60

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Batteries lithium-fer-phosphate (LFP) déjà utilisées dans certains appareils électroniques portables, batteries à forte teneur en manganèse ou avec des proportions modifiées de nickel.
 - Quel impact: Réduction de 10-20% de la densité énergétique par rapport aux batteries contenant du cobalt (NMC/NCA), entraînant une autonomie légèrement inférieure pour un même volume de batterie dans les smartphones, tablettes et autres appareils numériques.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Batteries avec cathodes à haute teneur en nickel et manganèse avec cobalt réduit ou éliminé, nouvelles chimies sans cobalt adaptées aux appareils portables.
 - Quel impact: Performances potentiellement équivalentes aux batteries actuelles au cobalt, mais avec des défis en termes de miniaturisation pour les appareils électroniques ultrafins.

Délai d'implémentation: 0.60

- Alternative existante:

- Transition vers des batteries LFP possible mais nécessitant 3-5 ans pour une adoption complète dans les appareils électroniques grand public, avec des adaptations nécessaires pour maintenir une performance satisfaisante dans les formats compacts.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des technologies sans cobalt pour appareils électroniques estimée à 4-7 ans, avec des défis d'industrialisation spécifiques aux exigences des fabricants d'électronique.

Impact coût: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Les alternatives sans cobalt pourraient réduire les coûts des batteries de 5-15%, mais ces économies seraient partiellement compensées par les coûts de R&D et de reconfiguration des chaînes de production pour les appareils électroniques.
- **Alternative théorique:**
 - Les nouvelles technologies pourraient permettre des réductions significatives à long terme, mais nécessiteront des investissements initiaux importants pour adapter les formats aux contraintes des appareils numériques.

Sources

- [1] - National Geographic. (2024). “Pourquoi le cobalt, ce métal essentiel à la technologie, est-il si controversé?”,
- [2] - Forbes. (2023). “Researchers Create Cleaner Alternative To Using Cobalt In Batteries.”,

Batterie -> Gallium - Coefficient: 0.47

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Arséniure de silicium (SiAs), phosphure d'indium (InP).
 - **Quel impact:** Performances inférieures en fréquence (> 30% de perte) et rendement énergétique réduit. Coûts de production augmentés de 15-25% pour compensation des pertes.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Semi-conducteurs à base de germanium dopé, composites 2D (ex. graphène/h-BN).
 - **Quel impact:** Potentiel de performances équivalentes mais nécessite des avancées majeures en ingénierie quantique. Problèmes de stabilité thermique persistants.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Transition partielle vers InP réalisable en 1-3 ans pour applications non critiques.
- **Alternative théorique:**
 - Technologies émergentes estimées à 4-6 ans pour validation industrielle (R&D intensive en cours).

Impact coût: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Surcoût opérationnel de 20-35% pour maintien des spécifications techniques avec substituts.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements R&D initiaux > 200M€ pour l'industrie européenne. Réduction à 50-70% des coûts à horizon 2030.

Sources

- 1] - Ambacher, O. (2018). “GaN technology for RF applications”, *Compound Semiconductors Magazine*.
- 2] - European Commission (2024). “Critical Raw Materials Resilience Dashboard”.
- 3] - Yole Développement (2023). “RF GaN Market Report”.

Batterie -> Germanium - Coefficient: 0.64

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Silicium-germanium (SiGe) avec teneur réduite en germanium, silicium dopé fortement pour certaines applications analogiques, matériaux III-V pour des applications spécifiques.
 - **Quel impact:** Réduction des performances en termes de mobilité des porteurs de charge et de fonctionnement à haute fréquence. Le germanium offre des avantages uniques pour les circuits analogiques de haute performance.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Graphène et autres matériaux bidimensionnels, nouveaux composés semiconducteurs.
 - **Quel impact:** Potentiel de dépasser les performances du germanium pour certaines applications spécifiques, mais avec des défis majeurs concernant la fabrication à l'échelle industrielle.

Délai d'implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Adoption d'alternatives à base de silicium estimée à 2-4 ans, avec des compromis importants sur les performances qui nécessiteraient une reconception des circuits analogiques.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des technologies émergentes estimée à 5-8 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Impact variable selon l'alternative : potentielle réduction des coûts avec des solutions purement à base de silicium, mais compensée par des besoins accrus en optimisation de conception.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une trajectoire de réduction de coûts incertaine à moyen terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

Batterie -> Graphite - Coefficient: 0.51

Faisabilité technique: 0.60

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Anodes en silicium ou composites silicium-carbone partiellement développées pour appareils électroniques, graphite synthétique comme substitut au graphite naturel.
 - **Quel impact:** Amélioration potentielle de la capacité d'énergie dans les smartphones et ordinateurs portables, le silicium pouvant stocker jusqu'à 10 fois plus d'ions lithium que le graphite, permettant des batteries plus compactes ou plus durables.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Anodes entièrement en silicium, nanostructures avancées pour électronique portable, nouveaux matériaux carbonés.
 - **Quel impact:** Augmentation significative de la densité énergétique, permettant potentiellement de doubler l'autonomie des appareils numériques ou de réduire considérablement leur taille.

Délai d'implémentation: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Adoption progressive du graphite synthétique déjà en cours, mais transition complète estimée à 2-4 ans pour les applications dans l'électronique grand public.
- **Alternative théorique:**

- Commercialisation d'anodes majoritairement en silicium pour appareils électroniques estimée à 3-6 ans, nécessitant encore des solutions pour les problèmes d'expansion volumique durant les cycles de charge/décharge.

Impact coût: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Le graphite synthétique reste plus coûteux que le graphite naturel (15-25% de plus), mais les volumes nécessaires pour les appareils électroniques (5g par smartphone, 15g par ordinateur) limitent l'impact sur le prix final du produit.
- **Alternative théorique:**
 - Les anodes en silicium pourraient à terme réduire les coûts grâce à l'abondance du silicium, mais nécessiteront des investissements initiaux importants en R&D pour les adapter aux contraintes des appareils portables.

Sources

- [3] - Connaissance des Énergies. (2024). “Graphite : un minéral à enjeu d'autonomie stratégique pour la mobilité propre.”,
- [4] - Visual Capitalist. (2023). “Graphite: An Essential Material in the Battery Supply Chain.”,
- [14] - Innovation News Network. (n.d.). “Battery manufacturers must secure their graphite supply chain with resources in ground.”,

Batterie -> Lanthane - Coefficient: 0.54

Faisabilité technique: 0.60

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages hybrides sans lanthane pour batteries NiMH utilisées dans certains appareils électroniques, alliages mischmetal avec proportions réduites de lanthane.
 - **Quel impact:** Réduction de 15-25% de la capacité de stockage d'hydrogène dans les batteries NiMH, affectant la durée de vie et les performances des appareils électroniques utilisant cette technologie.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Batteries au fluorure utilisant d'autres matériaux que le lanthane, nouveaux matériaux composites pour électrodes, technologies alternatives pour les petits appareils électroniques.
 - **Quel impact:** Les batteries au fluorure sans lanthane pourraient potentiellement offrir une densité énergétique jusqu'à 8 fois supérieure aux batteries lithium-ion actuelles pour les smartphones et ordinateurs portables.

Délai d'implémentation: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Substitution partielle avec des alliages modifiés possible dans un délai de 2-4 ans pour les applications dans l'électronique grand public.
- **Alternative théorique:**
 - Développement de batteries au fluorure sans lanthane pour appareils électroniques estimé à 5-8 ans, avec des défis importants liés au caractère corrosif et réactif du fluorure.

Impact coût: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Coûts relativement équivalents pour les alliages modifiés avec une réduction potentielle de 5-15% due à l'utilisation réduite de lanthane.
- **Alternative théorique:**
 - Coûts initiaux probablement élevés pour les batteries au fluorure, mais potentiel de réduction significative à long terme grâce à la densité énergétique accrue et l'utilisation de matériaux plus abondants.

Sources

- [7] - Usbek & Rica. (n.d.).“Batteries au fluorure : une alternative plus propre et efficace.”,

Batterie -> Lithium - Coefficient: 0.51

Faisabilité technique: 0.60

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Batteries sodium-ion comme alternative directe pour certains appareils électroniques, notamment ceux où la densité énergétique n'est pas critique.
 - Quel impact: Réduction de la densité énergétique de 15-25% par rapport aux batteries lithium-ion, ce qui pourrait affecter l'autonomie des smartphones et ordinateurs portables, mais acceptable pour des appareils électroniques moins exigeants.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Batteries zinc-air pour petits appareils électroniques, batteries à électrolyte solide, batteries lithium-soufre adaptées aux formats compacts.
 - Quel impact: Potentiel d'augmenter significativement l'autonomie des appareils électroniques tout en réduisant leur dépendance au lithium.

Délai d'implémentation: 0.50

- Alternative existante:
 - Commercialisation des batteries sodium-ion pour certains appareils électroniques estimée à 2-3 ans, avec des applications initiales dans les appareils où le poids et la taille sont moins critiques.
- Alternative théorique:
 - Déploiement des technologies avancées comme les batteries lithium-soufre dans les appareils électroniques grand public estimé à 4-7 ans.

Impact coût: 0.40

- Alternative existante:
 - Réduction potentielle des coûts avec les batteries sodium-ion grâce à l'abondance du sodium et la possibilité d'utiliser des composants moins coûteux.
- Alternative théorique:
 - Les nouvelles technologies pourraient offrir un meilleur rapport coût/performance à long terme, mais nécessiteront des investissements initiaux importants en R&D et adaptation.

Sources

- [9] - Triple Pundit. (2024).“Lithium is Good, But What Are Some Better Battery Alternatives?”,
- [15] - Jungheinrich. (2025).“Avantages et inconvénients des batteries au lithium-ion.”,

Batterie -> Manganèse - Coefficient: 0.40

Faisabilité technique: 0.40

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Batteries lithium-ion utilisant d'autres compositions cathodiques sans manganèse, comme les LFP (lithium-fer-phosphate) ou les LCO (lithium-cobalt-oxyde) plus courantes dans les petits appareils électroniques.
 - Quel impact: Performance comparable pour la plupart des applications numériques, les batteries sans manganèse étant déjà largement utilisées dans les smartphones et tablettes.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Nouvelles formulations pour l'électronique miniaturisée, cathodes à base d'autres métaux plus abondants.
 - Quel impact: Potentiel d'optimisation pour les applications spécifiques aux appareils numériques, en combinant performances et miniaturisation.

Délai d'implémentation: 0.30

- **Alternative existante:**
 - Transition immédiate possible car les fabricants d'électronique utilisent déjà majoritairement des batteries sans manganèse ou à faible teneur.
- **Alternative théorique:**
 - Délai de 1-3 ans pour l'optimisation et l'industrialisation de nouvelles formulations spécifiquement adaptées aux besoins des appareils électroniques.

Impact coût: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Impact coût négligeable pour les appareils électroniques, les alternatives sans manganèse étant déjà largement adoptées et optimisées pour la production de masse.
- **Alternative théorique:**
 - Potentiel de réduction des coûts à moyen terme grâce à l'utilisation de matériaux plus abondants et des procédés de fabrication optimisés pour les petits formats de batteries.

Sources

- [11] - EV Engineering Online. (2025).“First high-purity manganese produced to support EV battery supply chains.”,
- [12] - Euronews. (n.d.).“Manganese batteries: Could they be the main driver for EVs?”,

Batterie -> Nickel - Coefficient: 0.44

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Batteries lithium-fer-phosphate (LFP) qui n'utilisent pas de nickel, déjà adoptées pour certains appareils électroniques moins exigeants en termes de densité énergétique.
 - **Quel impact:** Réduction de 15-25% de la densité énergétique par rapport aux batteries NCA/NMC riches en nickel, entraînant une autonomie plus faible des smartphones et ordinateurs portables, mais acceptable pour certains appareils d'entrée de gamme.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouvelles formulations cathodiques utilisant des métaux plus abondants, batteries sodium-ion adaptées aux applications numériques.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances acceptables tout en réduisant la dépendance au nickel, avec un accent particulier sur la durabilité et le coût réduit pour les appareils électroniques grand public.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Transition vers les batteries LFP pour certains appareils numériques possible dans un délai de 1-3 ans, avec adoption progressive selon les segments de marché.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation de nouvelles formulations optimisées pour l'électronique estimée à 3-5 ans, avec des défis spécifiques liés à la miniaturisation et aux exigences de performance.

Impact coût: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Réduction des coûts de 10-15% possible avec les batteries LFP par rapport aux batteries riches en nickel, bien que cette économie soit partiellement compensée par la nécessité d'augmenter la taille des batteries pour maintenir une autonomie comparable.
- **Alternative théorique:**
 - Potentiel de réduction des coûts de 15-25% à moyen terme avec les nouvelles technologies, contribuant à rendre les appareils électroniques plus abordables.

Sources

- [15] - Jungheinrich. (2025).“Avantages et inconvénients des batteries au lithium-ion.”,

Batterie -> Phosphore - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou l'antimoine, modifications des procédés de dopage pour optimiser l'utilisation du phosphore.
 - Quel impact: Modification modérée des caractéristiques électriques des composants analogiques, notamment en termes de niveaux de dopage et de profils de diffusion.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Nouvelles approches de dopage utilisant des composés moléculaires, techniques de dopage sélectif avancées.
 - Quel impact: Potentiel de maintenir ou d'améliorer les performances tout en réduisant la dépendance au phosphore élémentaire.

Délai d'implémentation: 0.40

- Alternative existante:
 - Substitution par d'autres dopants possible dans un délai de 1-3 ans, les techniques de dopage alternatives étant déjà en développement dans l'industrie des semi-conducteurs.
- Alternative théorique:
 - Développement et validation des nouvelles approches de dopage estimés à 3-5 ans avant adoption industrielle.

Impact coût: 0.60

- Alternative existante:
 - Augmentation limitée des coûts (5-15%) pour les dopants alternatifs, principalement due à des ajustements de procédés.
- Alternative théorique:
 - Investissements initiaux modérés pour les nouvelles techniques de dopage, avec un potentiel de réduction des coûts à moyen terme grâce à l'amélioration de l'efficacité des procédés.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

Batterie -> Silicium - Coefficient: 0.90

Faisabilité technique: 0.90

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Germanium pour certaines applications spécifiques, matériaux III-V comme l'arséniure de gallium (GaAs) pour les applications haute fréquence.
 - Quel impact: Augmentation significative des coûts et complexification des procédés de fabrication. Limitations en termes d'intégration et de compatibilité avec les technologies existantes basées sur le silicium.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Matériaux bidimensionnels comme le graphène, nouveaux composés semiconducteurs, approches hybrides combinant différents matériaux.
 - Quel impact: Performances potentiellement supérieures pour des applications spécifiques, mais avec des défis majeurs concernant la fabrication à grande échelle et l'intégration dans les chaînes de production existantes.

Délai d'implémentation: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Adoption limitée d'alternatives pour des applications de niche possible dans un délai de 3-5 ans, mais remplacement complet du silicium non envisageable à court ou moyen terme.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des technologies alternatives estimés à 10-15 ans avant qu'elles puissent potentiellement concurrencer le silicium à grande échelle.

Impact coût: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Augmentation drastique des coûts (2-10x) avec les matériaux alternatifs actuels, rendant ces solutions économiquement viables uniquement pour des applications à très haute valeur ajoutée.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements colossaux nécessaires pour développer des chaînes de production complètes basées sur de nouveaux matériaux, avec une incertitude significative sur la viabilité économique à long terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

Batterie -> Zinc - Coefficient: 0.30

Faisabilité technique: 0.30

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Batteries lithium-ion standard, piles alcalines, batteries nickel-métal-hydure (NiMH), largement utilisées dans l'électronique grand public.
 - **Quel impact:** Les batteries lithium-ion offrent une densité énergétique 3-5 fois supérieure aux batteries zinc-carbone ou zinc-air, ce qui explique leur prédominance dans les smartphones et ordinateurs portables modernes.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Batteries zinc-air rechargeables améliorées, super-condensateurs pour certaines applications spécifiques d'électronique.
 - **Quel impact:** Les batteries zinc-air pourraient être particulièrement adaptées aux petits appareils électroniques comme les montres connectées, aides auditives et certains capteurs IoT, offrant une autonomie plus longue que les options actuelles.

Délai d'implémentation: 0.20

- **Alternative existante:**
 - Substitution immédiate possible, les technologies alternatives étant déjà largement commercialisées et standardisées pour les appareils électroniques.
- **Alternative théorique:**
 - Délai de 1-3 ans pour l'optimisation des batteries zinc-air rechargeables destinées aux applications numériques spécifiques.

Impact coût: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Les technologies lithium-ion sont actuellement plus coûteuses que les batteries zinc, mais offrent un meilleur rapport coût/performance pour la plupart des applications numériques.
- **Alternative théorique:**
 - Les batteries zinc-air pourraient offrir un avantage significatif en termes de coût dans les applications IoT et les petits appareils électroniques, où la longue durée de vie est plus importante que la haute densité d'énergie.

Sources

- [9] - Triple Pundit. (2024).“Lithium is Good, But What Are Some Better Battery Alternatives?”,
- [13] - Semantic Scholar. (1986).“Analytical Solution for Flow-Through Porous Electrode under Linear Polarization.”,

Boîtier -> Chrome - Coefficient: 0.39

Faisabilité technique: 0.30

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Revêtements PVD (dépôt physique en phase vapeur) en titane ou zirconium, anodisation colorée de l'aluminium, finitions en acier inoxydable, revêtements en nickel, laque de haute qualité.
 - **Quel impact:** Résistance à la corrosion comparable ou supérieure pour certaines alternatives comme le PVD, avec un impact visuel similaire. L'anodisation offre même plus de possibilités en termes de couleurs et textures.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Revêtements nanocomposites, céramiques transparentes, nouveaux alliages à base de manganèse et silicium.
 - **Quel impact:** Potentiel d'amélioration significative de la durabilité et de l'esthétique, avec des propriétés anti-rayures supérieures au chrome et un rendu visuel plus diversifié.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Adoption immédiate possible, les technologies de revêtement alternatives étant déjà utilisées par plusieurs fabricants d'électronique comme Apple, Samsung et Huawei.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des revêtements nanocomposites avancés attendue dans les 2-4 prochaines années, avec plusieurs solutions déjà en phase de tests industriels.

Impact coût: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 20-50% pour les solutions PVD haut de gamme, mais l'anodisation peut être moins coûteuse à grande échelle. L'acier inoxydable et le nickel ont des coûts comparables au chromage.
- **Alternative théorique:**
 - Les revêtements nanocomposites auront probablement un coût initial plus élevé, mais offriront une durabilité supérieure pouvant réduire les coûts sur le cycle de vie des produits.

Sources

- [1] - Institut de l'acier inoxydable. (2023).“Alternatives au chromage pour finitions métalliques.”,
- [2] - Techniques de l'Ingénieur. (2021).“Revêtements PVD et alternatives au chromage.”,
- [3] - PVD Coatings. (n.d.).“Alternatives to Chrome Plating.”,

Boîtier -> Magnesium - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages d'aluminium série 7000 (aluminium-zinc) et série 6000 (aluminium-silicium-magnésium), polymères techniques renforcés de fibres de carbone ou de verre, alliages de titane pour applications haut de gamme.
 - **Quel impact:** Augmentation du poids de 20-30% avec les alliages d'aluminium pour une résistance mécanique comparable. Les polymères renforcés peuvent approcher la rigidité du magnésium mais avec des propriétés de dissipation thermique inférieures.
- **Alternative théorique:**

- **Lesquelles:** Biomatériaux composites à base de fibre naturelle, alliages d'aluminium-lithium, alliages d'aluminium-scandium, matériaux nanostructurés.
- **Quel impact:** Potentiel d'atteindre un rapport rigidité/poids comparable au magnésium avec des matériaux plus facilement disponibles et dont l'empreinte carbone peut être réduite.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Transition vers les alliages d'aluminium immédiatement réalisable, ces matériaux étant largement utilisés dans l'industrie électronique et disposant de chaînes d'approvisionnement bien établies.
- **Alternative théorique:**
 - Adoption des biomatériaux composites et alliages avancés estimée à 3-5 ans, avec plusieurs initiatives de R&D en cours chez les principaux fabricants d'électronique.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - L'aluminium est généralement 15-25% moins cher que le magnésium, mais nécessite plus de matériau pour atteindre la même rigidité. Les polymères renforcés haut de gamme peuvent être plus coûteux.
- **Alternative théorique:**
 - Les biomatériaux composites et nouveaux alliages auront probablement un coût initial plus élevé de 30-50%, mais pourraient offrir des avantages en termes de durabilité et d'empreinte environnementale.

Sources

- [1] - Materials Today. (2022).“Magnesium vs Aluminum: Which is Better?”,
- [2] - Techniques de l'Ingénieur. (2021).“Alliages légers pour applications structurales.”,
- [3] - Fraunhofer Institute. (2023).“Bio-based composites as substitutes for technical metals.”,

Boitier -> Manganese - Coefficient: 0.40

Faisabilité technique: 0.40

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages d'acier avec teneur réduite en manganèse, aciers modifiés utilisant d'autres éléments comme le chrome ou le vanadium, alliages d'aluminium spécialisés pour les boîtiers d'appareils électroniques.
 - **Quel impact:** Légère réduction des propriétés mécaniques et de la résistance à la corrosion, potentiellement compensée par des traitements de surface additionnels. Performance globale maintenue pour la plupart des applications d'électronique grand public.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouveaux alliages composites à matrice métallique, matériaux hybrides métal-polymère optimisés pour l'électronique.
 - **Quel impact:** Potentiel d'amélioration des propriétés comme la légèreté et la dissipation thermique, tout en maintenant la résistance mécanique nécessaire pour les boîtiers d'appareils électroniques.

Délai d'implémentation: 0.30

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des alliages modifiés possible dans un délai de 1-2 ans, les procédés de fabrication étant déjà établis et ne nécessitant que des ajustements mineurs.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation de nouveaux matériaux composites estimée à 3-5 ans, incluant les phases de test de durabilité et de certification pour les appareils électroniques grand public.

Impact coût: 0.50

- **Alternative existante:**

- Augmentation potentielle des coûts de 5-10% pour les alliages modifiés, principalement due à des ajustements de formulation et à des procédés de fabrication légèrement plus complexes.
- **Alternative théorique:**
 - Les matériaux composites pourraient initialement entraîner une hausse des coûts de 15-25%, mais offrir des avantages en termes de durée de vie et de propriétés mécaniques qui pourraient justifier cet investissement pour les appareils électroniques haut de gamme.

Sources

- [1] - Total Materia. (2023). “Manganese in Steel.”,
- [2] - Techniques de l’Ingénieur. (2022). “Alliages pour boîtiers électroniques: tendances et innovations.”,

Boitier -> Titane - Coefficient: 0.67

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages d’aluminium de série 7000 renforcés, aciers inoxydables de haute qualité, alliages de magnésium traités pour améliorer la résistance à la corrosion, céramiques techniques pour certaines applications.
 - **Quel impact:** Augmentation du poids de 30-60% avec les alternatives métalliques, compromettant la légèreté des appareils électroniques premium. Réduction de la résistance aux rayures et de la durabilité, particulièrement importante pour les appareils portables comme les smartphones et montres connectées.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Composites à fibres de carbone de nouvelle génération, alliages d’aluminium-lithium avancés, matériaux composites à matrice céramique.
 - **Quel impact:** Potentiel d’approcher les propriétés du titane en termes de légèreté et de résistance, mais avec des défis concernant la dissipation thermique et la compatibilité électromagnétique, cruciales pour les appareils électroniques modernes.

Délai d’implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des alliages d’aluminium ou magnésium possible dans un délai de 2-3 ans pour la plupart des applications, mais avec des compromis significatifs sur les performances et l’esthétique.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des matériaux composites avancés estimés à 5-8 ans pour répondre aux exigences strictes des boîtiers d’appareils électroniques haut de gamme.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Réduction potentielle des coûts de 20-30% avec les alliages d’aluminium, mais nécessité d’utiliser plus de matériau pour atteindre une résistance mécanique comparable, limitant les économies réelles.
- **Alternative théorique:**
 - Les composites avancés pourraient maintenir des coûts similaires ou légèrement supérieurs au titane à court terme, avec une trajectoire de réduction à mesure que les technologies de fabrication s’améliorent.

Sources

- [1] - iFixit. (2024). “Matériaux utilisés dans les boîtiers d’appareils électroniques modernes.”,
- [2] - Materials Today. (2023). “Titanium in Consumer Electronics: Challenges and Opportunities.”,
- [3] - Advanced Materials. (2023). “Substitution strategies for critical metals in high-tech applications.”,

Boitier -> Zinc - Coefficient: 0.30

Faisabilité technique: 0.30

- **Alternative existante:**

- **Lesquelles:** Revêtements organiques (peintures polyuréthane, résines époxy), revêtements électrochimiques alternatifs (étain, nickel), galvanisation à l'aluminium, aciers inoxydables sans besoin de protection supplémentaire.
- **Quel impact:** Performance comparable ou supérieure pour la protection contre la corrosion, avec des avantages potentiels en termes d'esthétique et de durabilité pour certaines alternatives comme les aciers inoxydables ou les revêtements organiques avancés.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Revêtements nanostructurés, polymères conducteurs, revêtements hybrides organique-inorganique.
 - **Quel impact:** Amélioration potentielle de la durabilité et de la résistance à la corrosion tout en offrant des propriétés additionnelles comme l'auto-réparation ou la compatibilité électromagnétique améliorée.

Délai d'implémentation: 0.20

- **Alternative existante:**
 - Adoption immédiate possible, les alternatives étant déjà largement utilisées dans l'industrie électronique, avec des chaînes d'approvisionnement et des procédés bien établis.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des revêtements nanostructurés estimée à 2-3 ans, certains étant déjà en phase avancée de développement pour les applications électroniques.

Impact coût: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Impact coût variable selon les alternatives : légère augmentation (5-15%) pour certaines options comme les revêtements électrochimiques au nickel, potentielle réduction pour d'autres comme certains revêtements organiques.
- **Alternative théorique:**
 - Les revêtements avancés auront probablement un coût initial plus élevé (20-30%), mais pourraient offrir un meilleur rapport coût-performance sur la durée de vie du produit grâce à une durabilité accrue.

Sources

- [1] - European Commission. (2023).“Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU - A Foresight Study.”,
- [2] - Insplorion. (2023).“Metal Coatings in Electronics: Beyond Zinc.”,

Camera -> Antimoine - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou le phosphore, modifications des procédés de dopage pour utiliser d'autres éléments.
 - **Quel impact:** Modification des caractéristiques électriques des semi-conducteurs analogiques, notamment en termes de mobilité des porteurs et de comportement thermique, potentiellement critique pour les applications analogiques de précision.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouvelles structures de semi-conducteurs utilisant d'autres matériaux ou approches de dopage, technologies basées sur des matériaux bidimensionnels.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances analogiques acceptables mais avec des défis concernant l'intégration dans les procédés de fabrication existants.

Délai d'implémentation: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des profils de dopage alternatifs possible dans un délai de 2-4 ans, incluant les phases de qualification et de validation pour les applications sensibles.

- **Alternative théorique:**
 - Développement et industrialisation des approches alternatives estimés à 4-7 ans avant adoption à grande échelle dans la production de wafers analogiques.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 15-25% avec les dopants alternatifs, principalement due à des besoins accrus en optimisation des procédés et en contrôle de qualité.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux significatifs pour développer de nouvelles approches, avec une incertitude sur l'impact à long terme sur les coûts de production des wafers analogiques.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

Camera -> Cerium - Coefficient: 0.71

Faisabilité technique: 0.80

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Verre optique modifié utilisant des combinaisons d'autres terres rares comme le lanthane et le praséodyme, certains nanocomposites pour polissage optique.
 - **Quel impact:** Réduction des performances optiques, notamment en termes de transparence dans l'ultraviolet et de résistance aux rayonnements. Augmentation des aberrations chromatiques pouvant dégrader la qualité d'image des capteurs photo et vidéo des appareils électroniques.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Verres optiques nanostructurés sans terres rares, éléments optiques diffractifs, polymères optiques avancés.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des propriétés optiques satisfaisantes mais avec des défis majeurs concernant la durabilité à long terme et la stabilité thermique, cruciale pour les caméras des smartphones et appareils électroniques.

Délai d'implémentation: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des verres modifiés estimée à 3-5 ans, incluant la reformulation des compositions, les tests optiques rigoureux et la reconfiguration des chaînes de production.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des technologies optiques avancées sans cérium estimés à 7-10 ans avant une adoption à grande échelle dans l'industrie électronique.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Augmentation des coûts de 15-30% pour les verres optiques modifiés utilisant des combinaisons d'autres terres rares, qui restent des matériaux critiques.
- **Alternative théorique:**
 - Les matériaux optiques nanostructurés pourraient entraîner une hausse initiale des coûts de 30-50%, partiellement compensée à long terme par des avantages en termes de performance et de durabilité.

Sources

- [1] - Schott. (2023).“Optical Glass Portfolio.”,
- [2] - Nature Materials. (2022).“Cerium's role in modern optics and challenges for substitution.”,
- [3] - MDPI Materials. (2023).“Critical Raw Materials in Consumer Electronics: Focus on Optical Applications.”,

Camera -> Gallium - Coefficient: 0.41

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Phosphure d'indium (InP) pour lasers, silicium cristallin pour photovoltaïque.
 - **Quel impact:** Rendement lumineux réduit de 40% pour LEDs, efficacité photovoltaïque limitée à 18-22% contre 25-28% pour CIGS.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Pérovskites hybrides, points quantiques InSb.
 - **Quel impact:** Potentiel théorique supérieur au GaAs mais durée de vie opérationnelle < 1000h dans les prototypes actuels.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Adoption progressive du silicium en 2-4 ans pour applications basse performance.
- **Alternative théorique:**
 - Horizon 5-8 ans pour solutions pérovskites stables (défis de scaling industriel).

Impact coût: 0.30

- **Alternative existante:**
 - Coûts réduits de 10-15% grâce au silicium mais perte de compétitivité technologique.
- **Alternative théorique:**
 - Coûts de fabrication initiaux 3x supérieurs, nécessitant des subventions publiques pour adoption.

Sources

- 1] - Green, M.A. (2020). "Photovoltaic technologies beyond the silicon era", *Progress in Photovoltaics*.
- 2] - LED Professional (2023). "Global LED Materials Market Analysis".
- 3] - Fraunhofer ISE (2024). "CIGS vs Perovskite Solar Cells Roadmap".

Camera -> Gallium - Coefficient: 0.47

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Arséniure de silicium (SiAs), phosphure d'indium (InP).
 - **Quel impact:** Performances inférieures en fréquence (> 30% de perte) et rendement énergétique réduit. Coûts de production augmentés de 15-25% pour compensation des pertes.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Semi-conducteurs à base de germanium dopé, composites 2D (ex. graphène/h-BN).
 - **Quel impact:** Potentiel de performances équivalentes mais nécessite des avancées majeures en ingénierie quantique. Problèmes de stabilité thermique persistants.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Transition partielle vers InP réalisable en 1-3 ans pour applications non critiques.
- **Alternative théorique:**
 - Technologies émergentes estimées à 4-6 ans pour validation industrielle (R&D intensive en cours).

Impact coût: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Surcoût opérationnel de 20-35% pour maintien des spécifications techniques avec substituts.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements R&D initiaux > 200M€ pour l'industrie européenne. Réduction à 50-70% des coûts à horizon 2030.

Sources

- 1] - Ambacher, O. (2018). “GaN technology for RF applications”, *Compound Semiconductors Magazine*.
- 2] - European Commission (2024). “Critical Raw Materials Resilience Dashboard”.
- 3] - Yole Développement (2023). “RF GaN Market Report”.

Camera -> Germanium - Coefficient: 0.64

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Silicium-germanium (SiGe) avec teneur réduite en germanium, silicium dopé fortement pour certaines applications analogiques, matériaux III-V pour des applications spécifiques.
 - **Quel impact:** Réduction des performances en termes de mobilité des porteurs de charge et de fonctionnement à haute fréquence. Le germanium offre des avantages uniques pour les circuits analogiques de haute performance.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Graphène et autres matériaux bidimensionnels, nouveaux composés semiconducteurs.
 - **Quel impact:** Potentiel de dépasser les performances du germanium pour certaines applications spécifiques, mais avec des défis majeurs concernant la fabrication à l'échelle industrielle.

Délai d'implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Adoption d'alternatives à base de silicium estimée à 2-4 ans, avec des compromis importants sur les performances qui nécessiteraient une reconception des circuits analogiques.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des technologies émergentes estimée à 5-8 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Impact variable selon l'alternative : potentielle réduction des coûts avec des solutions purement à base de silicium, mais compensée par des besoins accrus en optimisation de conception.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une trajectoire de réduction de coûts incertaine à moyen terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). “M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

Camera -> Holmium - Coefficient: 0.84

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Autres terres rares comme le dysprosium ou l'erbium pour certaines applications spécifiques, filtres optiques multicouches sans holmium.
 - **Quel impact:** Dégradation significative des propriétés magnéto-optiques uniques dans les capteurs avancés des appareils photo numériques. Réduction de la précision des systèmes de stabilisation optique et des performances en faible luminosité, particulièrement importantes pour les smartphones haut de gamme.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Composites magnéto-optiques nanostructurés, matériaux photoniques avancés, filtres interférentiels de nouvelle génération.
 - **Quel impact:** Potentiel de reproduire certaines fonctionnalités, mais avec des compromis majeurs en termes de taille et d'intégration dans les appareils électroniques compacts.

Délai d'implémentation: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Substitution partielle avec d'autres terres rares possible dans un délai de 4-6 ans, mais avec des limitations significatives pour les applications optiques de haute précision.
- **Alternative théorique:**
 - Développement des alternatives sans terres rares estimé à 8-12 ans, nécessitant des avancées fondamentales en science des matériaux et en fabrication de précision.

Impact coût: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Les substituts à base d'autres terres rares pourraient entraîner une augmentation des coûts de 20-40%, tout en offrant des performances inférieures.
- **Alternative théorique:**
 - Les technologies émergentes nécessiteront des investissements significatifs en R&D et des coûts de production initialement 3-5 fois plus élevés, avant une éventuelle réduction avec l'échelle de production.

Sources

- [1] - Optica Publishing Group. (2024). "Rare Earth Elements in Modern Optics and Photonics.",
- [2] - IEEE Spectrum. (2023). "The Critical Materials Crisis Threatening the Future of Tech.",
- [3] - APL Photonics. (2021). "Magneto-optical materials for advanced photonic devices.",

Camera -> Lanthane - Coefficient: 0.64

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Verres optiques utilisant d'autres terres rares comme le gadolinium ou le céryum, verres crown et flint traditionnels avec des compositions modifiées.
 - **Quel impact:** Diminution des performances optiques, notamment en termes de correction des aberrations chromatiques et sphériques. Réduction de la netteté d'image et baisse de qualité dans les conditions de faible luminosité pour les caméras des appareils électroniques.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Lentilles polymères de haute précision, éléments optiques diffractifs, designs optiques computationnels.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances acceptables mais avec des compromis sur la durabilité et la stabilité thermique. Possible dégradation des performances dans les conditions extrêmes d'utilisation.

Délai d'implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des verres optiques modifiés estimée à 2-4 ans, nécessitant des tests approfondis pour garantir la qualité d'image requise dans les appareils électroniques modernes.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des approches alternatives avancées estimés à 5-7 ans avant commercialisation à grande échelle dans l'industrie de l'électronique grand public.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Augmentation des coûts de 15-25% pour les verres optiques modifiés utilisant d'autres combinaisons de matériaux, avec impact potentiel sur le prix final des modules caméra.
- **Alternative théorique:**
 - Les approches computationnelles pourraient réduire les coûts matériels à long terme, mais nécessitent des investissements initiaux importants en R&D et des processeurs plus puissants dans les appareils.

Sources

- [1] - Institut d'Optique. (2023). "Les terres rares dans les systèmes optiques modernes.",
- [2] - Zeiss Vision. (2022). "High-Performance Optical Materials.",

Camera -> Phosphore - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou l'antimoine, modifications des procédés de dopage pour optimiser l'utilisation du phosphore.
 - **Quel impact:** Modification modérée des caractéristiques électriques des composants analogues, notamment en termes de niveaux de dopage et de profils de diffusion.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouvelles approches de dopage utilisant des composés moléculaires, techniques de dopage sélectif avancées.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir ou d'améliorer les performances tout en réduisant la dépendance au phosphore élémentaire.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Substitution par d'autres dopants possible dans un délai de 1-3 ans, les techniques de dopage alternatives étant déjà en développement dans l'industrie des semi-conducteurs.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des nouvelles approches de dopage estimés à 3-5 ans avant adoption industrielle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Augmentation limitée des coûts (5-15%) pour les dopants alternatifs, principalement due à des ajustements de procédés.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux modérés pour les nouvelles techniques de dopage, avec un potentiel de réduction des coûts à moyen terme grâce à l'amélioration de l'efficacité des procédés.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

Camera -> Platine - Coefficient: 0.71

Faisabilité technique: 0.80

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages de palladium, revêtements en or, alliages nickel-chrome pour les contacts électriques des capteurs d'image.
 - **Quel impact:** Diminution de la durabilité et de la fiabilité des connexions électriques dans les conditions d'utilisation intensive. Risque accru de corrosion dans les environnements humides, affectant la longévité des caméras dans les appareils électroniques.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nanomatériaux conducteurs à base de carbone, encres conductrices sans métaux précieux, alliages d'argent spécialement traités.
 - **Quel impact:** Performances électriques potentiellement comparables mais avec des défis concernant la durabilité à long terme et la résistance aux conditions environnementales variées.

Délai d'implémentation: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Adoption des alliages alternatifs possible dans un délai de 2-3 ans, incluant les phases de test de fiabilité et de qualification pour les appareils électroniques grand public.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des solutions à base de nanomatériaux estimée à 5-8 ans, nécessitant des avancées significatives en techniques de fabrication.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Réduction potentielle des coûts de 10-20% avec les alliages de palladium ou nickel-chrome, mais nécessite d'augmenter les épaisseurs de revêtement pour maintenir la fiabilité.
- **Alternative théorique:**
 - Les matériaux émergents pourraient offrir des réductions de coûts significatives (30-50%) à terme, mais avec des investissements initiaux importants en R&D.

Sources

- [1] - IEEE Spectrum. (2023). "The Critical Materials Crisis Threatening the Future of Tech.",
- [2] - Materials Today. (2023). "Substituting Platinum in Electronic Components.",

Camera -> Silicium - Coefficient: 0.90

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Germanium pour certaines applications spécifiques, matériaux III-V comme l'arsénure de gallium (GaAs) pour les applications haute fréquence.
 - **Quel impact:** Augmentation significative des coûts et complexification des procédés de fabrication. Limitations en termes d'intégration et de compatibilité avec les technologies existantes basées sur le silicium.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux bidimensionnels comme le graphène, nouveaux composés semiconducteurs, approches hybrides combinant différents matériaux.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement supérieures pour des applications spécifiques, mais avec des défis majeurs concernant la fabrication à grande échelle et l'intégration dans les chaînes de production existantes.

Délai d'implémentation: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Adoption limitée d'alternatives pour des applications de niche possible dans un délai de 3-5 ans, mais remplacement complet du silicium non envisageable à court ou moyen terme.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des technologies alternatives estimés à 10-15 ans avant qu'elles puissent potentiellement concurrencer le silicium à grande échelle.

Impact coût: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Augmentation drastique des coûts (2-10x) avec les matériaux alternatifs actuels, rendant ces solutions économiquement viables uniquement pour des applications à très haute valeur ajoutée.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements colossaux nécessaires pour développer des chaînes de production complètes basées sur de nouveaux matériaux, avec une incertitude significative sur la viabilité économique à long terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

Capteurs -> Antimoine - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- Alternative existante:
 - **Lesquelles:** Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou le phosphore, modifications des procédés de dopage pour utiliser d'autres éléments.
 - **Quel impact:** Modification des caractéristiques électriques des semi-conducteurs analogiques, notamment en termes de mobilité des porteurs et de comportement thermique, potentiellement critique pour les applications analogiques de précision.
- Alternative théorique:
 - **Lesquelles:** Nouvelles structures de semi-conducteurs utilisant d'autres matériaux ou approches de dopage, technologies basées sur des matériaux bidimensionnels.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances analogiques acceptables mais avec des défis concernant l'intégration dans les procédés de fabrication existants.

Délai d'implémentation: 0.50

- Alternative existante:
 - Transition vers des profils de dopage alternatifs possible dans un délai de 2-4 ans, incluant les phases de qualification et de validation pour les applications sensibles.
- Alternative théorique:
 - Développement et industrialisation des approches alternatives estimés à 4-7 ans avant adoption à grande échelle dans la production de wafers analogiques.

Impact coût: 0.70

- Alternative existante:
 - Augmentation potentielle des coûts de 15-25% avec les dopants alternatifs, principalement due à des besoins accrus en optimisation des procédés et en contrôle de qualité.
- Alternative théorique:
 - Investissements initiaux significatifs pour développer de nouvelles approches, avec une incertitude sur l'impact à long terme sur les coûts de production des wafers analogiques.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

Capteurs -> Gadolinium - Coefficient: 0.74

Faisabilité technique: 0.80

- Alternative existante:
 - **Lesquelles:** Nanoparticules d'oxyde de fer pour certaines applications d'imagerie, comme indiqué dans les résultats de recherche #4 sur les évaluations de risques toxicologiques.
 - **Quel impact:** Les nanoclusters d'oxyde de fer (IONCs) offrent une biosécurité améliorée par rapport aux agents à base de gadolinium, mais avec des performances magnétiques potentiellement réduites pour certaines applications de détection.
- Alternative théorique:
 - **Lesquelles:** Techniques d'apprentissage profond pour l'amélioration virtuelle des images, comme mentionné dans le résultat #6 sur la neurographie par résonance magnétique.
 - **Quel impact:** L'étude montre la faisabilité de générer virtuellement des images améliorées sans utiliser de gadolinium, avec une qualité d'image et une visualisation des structures comparables.

Délai d'implémentation: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Les nanoclusters d'oxyde de fer sont en développement avancé comme substitut au gadolinium dans les applications d'imagerie médicale, avec un délai d'implémentation estimé à 3-5 ans pour d'autres applications de capteurs.
- **Alternative théorique:**
 - Les approches basées sur l'apprentissage profond montrent un potentiel immédiat d'après l'étude #6, mais nécessiteraient 2-4 ans pour être adaptées et validées pour d'autres types de capteurs et d'applications.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Les alternatives à base d'oxyde de fer pourraient offrir un meilleur rapport coût-efficacité à long terme, mais nécessiteraient des investissements initiaux significatifs pour adapter les procédés de fabrication.
- **Alternative théorique:**
 - Les solutions basées sur l'apprentissage profond nécessitent moins d'investissements matériels mais davantage de ressources en développement logiciel et en puissance de calcul.

Sources

- [2] - Semantic Scholar. (2024). "Effect of Gadolinium Doping on the Structure of Ce_{1-x}Gd_xO_{2-x}/2 Solid Solutions.",
- [6] - Semantic Scholar. "A Potential Substitution for Gadolinium in Brachial Plexus Magnetic Resonance Neurography: Deep Learning-Based Virtual Enhancement.",

Capteurs -> Gallium - Coefficient: 0.47

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Arséniure de silicium (SiAs), phosphure d'indium (InP).
 - **Quel impact:** Performances inférieures en fréquence (> 30% de perte) et rendement énergétique réduit. Coûts de production augmentés de 15-25% pour compensation des pertes.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Semi-conducteurs à base de germanium dopé, composites 2D (ex. graphène/h-BN).
 - **Quel impact:** Potentiel de performances équivalentes mais nécessite des avancées majeures en ingénierie quantique. Problèmes de stabilité thermique persistants.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Transition partielle vers InP réalisable en 1-3 ans pour applications non critiques.
- **Alternative théorique:**
 - Technologies émergentes estimées à 4-6 ans pour validation industrielle (R&D intensive en cours).

Impact coût: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Surcoût opérationnel de 20-35% pour maintien des spécifications techniques avec substituts.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements R&D initiaux > 200M€ pour l'industrie européenne. Réduction à 50-70% des coûts à horizon 2030.

Sources

- 1] - Ambacher, O. (2018). "GaN technology for RF applications", *Compound Semiconductors Magazine*.
- 2] - European Commission (2024). "Critical Raw Materials Resilience Dashboard".
- 3] - Yole Développement (2023). "RF GaN Market Report".

Capteurs -> Germanium - Coefficient: 0.64

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Silicium-germanium (SiGe) avec teneur réduite en germanium, silicium dopé fortement pour certaines applications analogiques, matériaux III-V pour des applications spécifiques.
 - **Quel impact:** Réduction des performances en termes de mobilité des porteurs de charge et de fonctionnement à haute fréquence. Le germanium offre des avantages uniques pour les circuits analogiques de haute performance.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Graphène et autres matériaux bidimensionnels, nouveaux composés semiconducteurs.
 - **Quel impact:** Potentiel de dépasser les performances du germanium pour certaines applications spécifiques, mais avec des défis majeurs concernant la fabrication à l'échelle industrielle.

Délai d'implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Adoption d'alternatives à base de silicium estimée à 2-4 ans, avec des compromis importants sur les performances qui nécessiteraient une reconception des circuits analogiques.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des technologies émergentes estimée à 5-8 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Impact variable selon l'alternative : potentielle réduction des coûts avec des solutions purement à base de silicium, mais compensée par des besoins accrus en optimisation de conception.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une trajectoire de réduction de coûts incertaine à moyen terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

Capteurs -> Holmium - Coefficient: 0.84

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Autres terres rares comme le dysprosium ou l'erbium pour certaines applications magnéto-optiques, matériaux composites multicouches.
 - **Quel impact:** Réduction significative des performances dans les applications nécessitant des propriétés magnéto-optiques précises, comme les capteurs à fibre optique et les systèmes de détection avancés utilisés dans l'électronique moderne.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux photoniques nanostructurés, métamatériaux optiques, capteurs basés sur d'autres principes physiques.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement comparables dans des applications spécifiques, mais avec des limitations importantes en termes de miniaturisation et d'intégration dans les appareils électroniques compacts.

Délai d'implémentation: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Substitution partielle possible dans un délai de 3-5 ans, mais avec des compromis significatifs sur les performances qui nécessiteraient une reconception substantielle des systèmes.

- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des technologies alternatives estimés à 7-10 ans avant une adoption à grande échelle dans l'industrie électronique.

Impact coût: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Augmentation des coûts de 20-40% pour maintenir des performances acceptables avec des matériaux alternatifs moins efficaces.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une trajectoire de coûts incertaine à long terme.

Sources

- [1] - Nature Photonics. (2023).“Rare Earth Elements in Modern Photonics.”,
- [2] - IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. (2022).“Magneto-Optical Materials for Advanced Sensing Applications.”,

Capteurs -> Manganese - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Matériaux dopés au fer ou au nickel pour les capteurs magnétiques, oxydes conducteurs alternatifs pour capteurs électrochimiques.
 - **Quel impact:** Performance comparable pour de nombreuses applications de détection, avec des ajustements mineurs des paramètres de sensibilité et de calibration.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Capteurs basés sur de nouveaux principes physiques comme la spintronique, matériaux nanocomposites avancés, capteurs à base de graphène.
 - **Quel impact:** Potentiel d'amélioration des performances par rapport aux capteurs à base de manganèse, particulièrement en termes de sensibilité et de consommation d'énergie.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des matériaux alternatifs possible dans un délai de 1-3 ans pour la plupart des applications de capteurs dans l'électronique grand public.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des technologies de détection avancées estimée à 3-6 ans, avec plusieurs approches déjà en phase de développement avancé.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Impact coût variable selon les alternatives, allant d'une légère réduction à une augmentation de 10-15% selon les matériaux et les procédés de fabrication.
- **Alternative théorique:**
 - Coûts initiaux probablement plus élevés pour les capteurs basés sur de nouveaux principes, mais potentiel de réduction significative à moyen terme grâce à l'amélioration des rendements de production.

Sources

- [1] - Sensors and Actuators B: Chemical. (2023).“Recent Advances in Materials for Electrochemical Sensing.”,
- [2] - Advanced Functional Materials. (2022).“Beyond Manganese: Emerging Materials for Next-Generation Sensor Technologies.”,

Capteurs -> Phosphore - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou l'antimoine, modifications des procédés de dopage pour optimiser l'utilisation du phosphore.
 - **Quel impact:** Modification modérée des caractéristiques électriques des composants analogiques, notamment en termes de niveaux de dopage et de profils de diffusion.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouvelles approches de dopage utilisant des composés moléculaires, techniques de dopage sélectif avancées.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir ou d'améliorer les performances tout en réduisant la dépendance au phosphore élémentaire.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Substitution par d'autres dopants possible dans un délai de 1-3 ans, les techniques de dopage alternatives étant déjà en développement dans l'industrie des semi-conducteurs.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des nouvelles approches de dopage estimés à 3-5 ans avant adoption industrielle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Augmentation limitée des coûts (5-15%) pour les dopants alternatifs, principalement due à des ajustements de procédés.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux modérés pour les nouvelles techniques de dopage, avec un potentiel de réduction des coûts à moyen terme grâce à l'amélioration de l'efficacité des procédés.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

Capteurs -> Platine - Coefficient: 0.70

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Thermocouples pour les mesures de température, capteurs à base d'alliages nickel-chrome, capteurs électroniques avec d'autres métaux (nickel, cuivre) pour certaines applications.
 - **Quel impact:** Réduction significative de la précision des mesures (les sondes à résistance de platine offrent une précision supérieure par rapport à d'autres capteurs). Perte de la stabilité à long terme caractéristique du platine, nécessitant des calibrations plus fréquentes des systèmes de mesure.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Capteurs à base de nanostructures, capteurs numériques intégrés avec électronique embarquée, systèmes optiques pour certaines applications.
 - **Quel impact:** Les capteurs numériques peuvent intégrer directement les données d'étalonnage dans la partie électronique, mais présentent des limitations en environnements extrêmes comparés aux sondes de platine.

Délai d'implémentation: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des technologies sans platine estimée à 3-5 ans pour les applications nécessitant haute précision, avec reconfiguration des systèmes d'acquisition et adaptation des processus industriels.

- **Alternative théorique:**
 - Développement complet de technologies avancées de remplacement estimé à 5-7 ans, incluant phases de test et de validation pour les environnements exigeants.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Les sondes sans platine sont généralement moins coûteuses, mais nécessitent des systèmes de compensation et de calibration plus complexes, réduisant les économies réelles à 10-20%.
- **Alternative théorique:**
 - Les capteurs numériques et les systèmes optiques avancés impliquent des coûts de développement initiaux élevés, avec un retour sur investissement incertain à court terme.

Sources

- [1] - Demeter France. (n.d.).“Avantages et inconvénients (Sondes à résistance de platine (Pt100 ou Pt1000).”,
- [2] - TECHNETEA. (n.d.).“Mesure de température avec sonde Pt100 ou Pt1000.”,
- [3] - WIKA. (2023).“Sonde à résistance (=RTD) ou Thermocouple. Quand les utiliser.”,

Capteurs -> Samarium - Coefficient: 0.74

Faisabilité technique: 0.80

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Autres terres rares comme le gadolinium ou leuropium pour certaines applications de détection, composés au bore pour les capteurs de neutrons, certains matériaux composites spécialisés.
 - **Quel impact:** Réduction significative de la sensibilité des capteurs, particulièrement dans la détection de neutrons où le samarium possède “une très grande capacité de capture”. Détérioration du rapport signal/bruit limitant la précision des mesures.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nanomatériaux spécialisés, nouveaux composites à base de terres moins rares, technologies de détection basées sur d’autres principes physiques.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement comparables dans des applications spécifiques, mais avec des défis majeurs concernant la sensibilité et la stabilité à long terme dans des conditions variables.

Délai d’implémentation: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Substitution partielle possible dans un délai de 3-5 ans pour certaines applications, mais avec des compromis significatifs sur les performances qui nécessiteraient une reconception des systèmes.
- **Alternative théorique:**
 - Développement de solutions viables estimé à 5-8 ans avant commercialisation à grande échelle, incluant les phases de R&D et de validation industrielle.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Coûts variables selon les alternatives : maintien ou légère réduction pour certaines terres rares, augmentation pour les matériaux composites spécialisés nécessitant des procédés de fabrication complexes.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux élevés en R&D, partiellement compensés à long terme par l’utilisation de matériaux potentiellement plus abondants.

Sources

- [1] - Institut National de la Recherche Scientifique. (n.d.).“Rétention de Samarium(III) par des Particules magnétiques.”,

Capteurs -> Silicium - Coefficient: 0.90

Faisabilité technique: 0.90

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Germanium pour certaines applications spécifiques, matériaux III-V comme l'arséniure de gallium (GaAs) pour les applications haute fréquence.
 - Quel impact: Augmentation significative des coûts et complexification des procédés de fabrication. Limitations en termes d'intégration et de compatibilité avec les technologies existantes basées sur le silicium.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Matériaux bidimensionnels comme le graphène, nouveaux composés semiconducteurs, approches hybrides combinant différents matériaux.
 - Quel impact: Performances potentiellement supérieures pour des applications spécifiques, mais avec des défis majeurs concernant la fabrication à grande échelle et l'intégration dans les chaînes de production existantes.

Délai d'implémentation: 0.90

- Alternative existante:
 - Adoption limitée d'alternatives pour des applications de niche possible dans un délai de 3-5 ans, mais remplacement complet du silicium non envisageable à court ou moyen terme.
- Alternative théorique:
 - Développement et commercialisation des technologies alternatives estimés à 10-15 ans avant qu'elles puissent potentiellement concurrencer le silicium à grande échelle.

Impact coût: 0.90

- Alternative existante:
 - Augmentation drastique des coûts (2-10x) avec les matériaux alternatifs actuels, rendant ces solutions économiquement viables uniquement pour des applications à très haute valeur ajoutée.
- Alternative théorique:
 - Investissements colossaux nécessaires pour développer des chaînes de production complètes basées sur de nouveaux matériaux, avec une incertitude significative sur la viabilité économique à long terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

CarteMere -> Aluminium - Coefficient: 0.43

Faisabilité technique: 0.40

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Cuivre pour la dissipation thermique, polymères renforcés pour les structures, matériaux composites, alliages de magnésium pour certains supports.
 - Quel impact: Le cuivre offre une conductivité thermique environ 60% supérieure à l'aluminium, mais est plus lourd et plus coûteux. Les polymères renforcés peuvent offrir une rigidité structurelle comparable pour certaines applications non critiques.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Matériaux composites avancés, structures à base de graphène pour la dissipation thermique, alliages métalliques multi-fonctionnels.
 - Quel impact: Potentiel d'amélioration des performances thermiques tout en maintenant la légèreté, mais avec des défis d'intégration dans les processus de fabrication existants.

Délai d'implémentation: 0.30

- Alternative existante:

- Transition vers le cuivre ou les matériaux composites immédiatement possible, ces matériaux étant déjà utilisés dans l'industrie électronique.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des composites avancés et des matériaux à base de graphène estimée à 3-5 ans.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Le cuivre est 2-3 fois plus coûteux que l'aluminium pour des applications équivalentes, ce qui augmente significativement les coûts de production des cartes mères.
- **Alternative théorique:**
 - Les matériaux avancés présenteraient initialement un coût plus élevé, mais pourraient offrir des avantages en termes de performance et de durabilité justifiant l'investissement.

Sources

CarteMère -> Antimoine - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou le phosphore, ajustements des procédés de dopage pour optimiser les caractéristiques électriques.
 - **Quel impact:** Modification des propriétés électriques des transistors logiques, particulièrement en termes de mobilité des porteurs et de stabilité thermique, potentiellement critique pour les noeuds technologiques avancés.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouvelles structures de transistors nécessitant moins de dopage, architectures de semiconducteurs avancées.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances logiques acceptables avec des approches innovantes, mais avec des défis concernant l'intégration dans les procédés de fabrication existants.

Délai d'implémentation: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des profils de dopage alternatifs possible dans un délai de 2-4 ans, incluant les phases de qualification et de validation pour les applications logiques critiques.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et industrialisation des approches alternatives estimés à 4-7 ans avant adoption à grande échelle dans la production de wafers logiques.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 10-20% avec les dopants alternatifs, principalement due à des besoins accrus en optimisation des procédés et en contrôle de qualité.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux significatifs pour développer de nouvelles approches, avec une incertitude sur l'impact à long terme sur les coûts de production des wafers logiques.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). “M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

CarteMère -> Argent - Coefficient: 0.61

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**

- **Lesquelles:** Alliages à base de cuivre avec revêtements spéciaux, contacts étamés, alliages d'aluminium traités pour certaines applications, alternatives sans métaux précieux.
- **Quel impact:** Diminution de la conductivité électrique (l'argent est le métal le plus conducteur) et réduction de la résistance à l'oxydation, entraînant potentiellement une durée de vie plus courte des connecteurs et des problèmes de fiabilité dans les environnements exigeants.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux composites conducteurs avancés, nanostructures de carbone (graphène, nanotubes), encres conductrices pour circuits imprimés.
 - **Quel impact:** Potentiel à long terme de maintenir des performances acceptables avec une empreinte environnementale réduite, mais limitations actuelles en termes de durabilité et de compatibilité avec les procédés de fabrication existants.

Délai d'implémentation: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des alliages alternatifs possible dans un délai de 1-3 ans pour de nombreuses applications, certains fabricants ayant déjà adopté ces solutions pour des raisons économiques.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des matériaux avancés estimée à 3-6 ans, incluant les phases d'adaptation des procédés de fabrication et de validation de la fiabilité à long terme.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Réduction potentielle des coûts de 20-30% avec les alternatives sans métaux précieux, mais souvent compensée par des coûts de maintenance plus élevés et une durée de vie réduite des composants.
- **Alternative théorique:**
 - Coûts initiaux élevés pour les matériaux de nouvelle génération, avec perspective de réduction à moyen terme grâce aux économies d'échelle et à l'optimisation des procédés de fabrication.

Sources

- [1] - Proto-Electronics. (n.d.).“Crise du circuit imprimé : délais et prix impactés.”,

CarteMere -> Cuivre - Coefficient: 0.81

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages d'aluminium pour certaines applications, matériaux composites conducteurs, circuits flexibles avec conducteurs alternatifs.
 - **Quel impact:** Réduction significative de la conductivité électrique (le cuivre est environ 40% plus conducteur que l'aluminium), nécessitant des pistes plus larges et limitant la miniaturisation. Augmentation de la résistance électrique entraînant une dissipation thermique plus importante et des performances réduites.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Conducteurs à base de carbone (graphène, nanotubes), technologies de circuits imprimés 3D avec nouveaux matériaux, architectures de circuits alternatifs (optiques, quantiques).
 - **Quel impact:** Le graphène et les nanotubes de carbone offrent théoriquement des performances supérieures au cuivre, mais leur intégration dans les procédés de fabrication à grande échelle présente des défis majeurs non résolus.

Délai d'implémentation: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des matériaux alternatifs estimée à 5-7 ans pour une adoption à grande échelle, nécessitant une refonte complète des procédés de fabrication des circuits imprimés et une reconfiguration des chaînes d'approvisionnement.

- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des technologies à base de carbone estimée à 8-10 ans avant déploiement industriel, avec des défis considérables en matière de scalabilité et de coût.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Augmentation des coûts de 30-50% pour maintenir des performances comparables avec des matériaux alternatifs, en raison de la nécessité d'utiliser des architectures de circuits plus complexes.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour la R&D et l'adaptation des infrastructures de production, avec des perspectives de réduction à long terme si les technologies à base de carbone atteignent la maturité industrielle.

Sources

- [1] - Proto-Electronics. (n.d.).“Crise du circuit imprimé : délais et prix impactés.”,
- [2] - École de Paris. (n.d.).“Récupérer les métaux précieux dans les cartes électroniques usagées.”,

CarteMere -> Etain - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages de soudure sans étain (bismuth-argent, indium-argent), technologies de connexion sans soudure (press-fit, connecteurs à pression), techniques d'assemblage alternatives (colles conductrices).
 - **Quel impact:** Fiabilité réduite pour les soudures alternatives, particulièrement dans les conditions de température extrêmes et les environnements à fortes vibrations. Réduction de la durée de vie des connexions et augmentation des risques de défaillance dans le temps.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nanotechnologies d'interconnexion, nouveaux alliages de soudure à base de matériaux plus abondants, méthodes d'assemblage utilisant l'impression 3D de matériaux conducteurs.
 - **Quel impact:** Potentiel à long terme d'atteindre une fiabilité comparable, mais avec des défis majeurs concernant la résistance aux chocs thermiques et mécaniques, cruciaux pour les appareils électroniques.

Délai d'implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Transition vers les solutions alternatives actuelles estimée à 2-4 ans, incluant la qualification des nouveaux alliages et l'adaptation des équipements de production.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des technologies d'assemblage avancées estimée à 4-7 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Augmentation des coûts de 15-25% pour les alliages de soudure alternatifs, principalement due à l'utilisation de métaux plus coûteux comme l'indium ou l'argent, et aux procédés de fabrication plus complexes.
- **Alternative théorique:**
 - Coûts initiaux élevés pour les nouvelles technologies d'assemblage, avec potentiel de réduction à moyen terme grâce à l'automatisation et l'optimisation des procédés.

Sources

- [1] - Proto-Electronics. (n.d.).“Crise du circuit imprimé : délais et prix impactés.”,
- [2] - OECD. (n.d.).“Guide des marchés publics.”,

CarteMere -> Germanium - Coefficient: 0.64

Faisabilité technique: 0.70

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Silicium pur avec optimisations de procédés, silicium contraint pour améliorer la mobilité des porteurs, silicium sur isolant (SOI).
 - Quel impact: Réduction des performances en termes de vitesse et d'efficacité énergétique. Le germanium, utilisé dans les alliages SiGe, améliore significativement la mobilité des porteurs dans les transistors logiques avancés.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Matériaux III-V intégrés sur silicium, structures à canaux multiples, transistors à effet de champ basés sur de nouveaux matériaux.
 - Quel impact: Potentiel de maintenir ou d'améliorer les performances par rapport aux technologies actuelles, mais avec des défis majeurs concernant l'intégration dans les procédés de fabrication standard.

Délai d'implémentation: 0.60

- Alternative existante:
 - Transition vers des solutions à base de silicium optimisé possible dans un délai de 2-4 ans, mais avec des compromis significatifs sur les performances qui pourraient ralentir la progression de la loi de Moore.
- Alternative théorique:
 - Développement et industrialisation des approches avancées estimés à 5-8 ans avant adoption dans la production de masse.

Impact coût: 0.60

- Alternative existante:
 - Impact variable selon l'alternative : potentielle réduction des coûts matériaux mais compensée par la nécessité d'optimisations plus poussées des procédés.
- Alternative théorique:
 - Investissements initiaux élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec un potentiel de réduction à long terme si l'échelle de production permet des économies.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

CarteMere -> Hafnium - Coefficient: 0.81

Faisabilité technique: 0.90

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Diélectriques à base de zirconium, oxydes d'aluminium (Al_2O_3), silice (SiO_2) avec épaisseur accrue.
 - Quel impact: Réduction significative des performances des transistors en termes de courants de fuite et d'efficacité énergétique. Limitation des capacités de miniaturisation pour les nœuds technologiques avancés.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Nouveaux matériaux diélectriques nanostructurés, diélectriques à haute permittivité alternatifs, architectures de transistors innovantes.
 - Quel impact: Potentiel de maintenir des performances acceptables, mais avec des défis significatifs concernant l'industrialisation et l'intégration dans les architectures de processeurs existantes.

Délai d'implémentation: 0.80

- Alternative existante:
 - Transition vers des diélectriques alternatifs estimée à 4-6 ans, avec des compromis significatifs sur les performances qui nécessiteraient une reconception des architectures de transistors.

- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des technologies avancées estimés à 7-10 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 15-30% pour maintenir des performances acceptables avec des matériaux moins efficaces, nécessitant des ajustements majeurs des procédés de fabrication.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une trajectoire de réduction des coûts incertaine à moyen terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). “M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

CarteMere -> Palladium - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages palladium-étain (comme le Pallega® blend Sn Genius), contacts en argent ou cuivre avec revêtements alternatifs, condensateurs céramiques utilisant d'autres matériaux.
 - **Quel impact:** Performance similaire pour les applications dans les condensateurs en céramique multi-couches (MLCC) utilisés sur les cartes mères. Les alliages palladium-étain “scores with the same positive properties as pure palladium” selon [2].
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux composites conducteurs, revêtements nanostructurés, polymères conducteurs avancés.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir les performances pour des applications spécifiques, mais avec des défis concernant la stabilité à long terme et la résistance aux températures élevées.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Les alternatives comme les alliages palladium-étain sont déjà commercialisées et prêtes à être implémentées, comme indiqué dans [2].
- **Alternative théorique:**
 - Développement de nouvelles alternatives estimé à 3-5 ans pour répondre aux exigences strictes des applications électroniques.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Les alliages palladium-étain sont décrits comme ayant un “much lower cost” que le palladium pur [2], mais restent plus coûteux que d'autres solutions n'utilisant pas de métaux précieux.
- **Alternative théorique:**
 - Les nouvelles technologies pourraient réduire significativement les coûts à long terme, mais nécessiteraient des investissements initiaux importants en R&D.

Sources

- [2] - IWG Plating. (2024). “Palladium alternative: Palladium-tin electrolyte: Pallega® blend Sn.”,
- [3] - Faster Capital. (n.d.). “Demande de palladium dans l'industrie électronique: une trajectoire ascendante.”,

CarteMere -> Phosphore - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou l'antimoine, ajustements des procédés de dopage pour optimiser l'utilisation du phosphore.
 - Quel impact: Modification modérée des caractéristiques électriques des transistors logiques, notamment en termes de niveaux de dopage et de profils de diffusion, avec un impact potentiel sur les performances des dispositifs.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Nouvelles approches de dopage utilisant des composés moléculaires, techniques de dopage sélectif avancées.
 - Quel impact: Potentiel de maintenir ou d'améliorer les performances tout en réduisant la dépendance au phosphore élémentaire.

Délai d'implémentation: 0.40

- Alternative existante:
 - Substitution par d'autres dopants possible dans un délai de 1-3 ans, les techniques de dopage alternatives étant déjà en développement dans l'industrie des semi-conducteurs.
- Alternative théorique:
 - Développement et validation des nouvelles approches de dopage estimés à 3-5 ans avant adoption industrielle.

Impact coût: 0.60

- Alternative existante:
 - Augmentation limitée des coûts (5-15%) pour les dopants alternatifs, principalement due à des ajustements de procédés.
- Alternative théorique:
 - Investissements initiaux modérés pour les nouvelles techniques de dopage, avec un potentiel de réduction des coûts à moyen terme grâce à l'amélioration de l'efficacité des procédés.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

CarteMere -> Silicium - Coefficient: 0.90

Faisabilité technique: 0.90

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Matériaux III-V comme l'arsénure de gallium (GaAs) ou le phosphure d'indium (InP) pour certaines applications spécifiques, germanium pour les applications nécessitant une haute mobilité des porteurs.
 - Quel impact: Augmentation significative des coûts et complexification des procédés de fabrication. Limitations majeures en termes d'intégration à grande échelle et de compatibilité avec les infrastructures existantes.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Matériaux bidimensionnels comme le graphène, technologies basées sur les nanotubes de carbone, approches hybrides combinant différents matériaux.
 - Quel impact: Performances potentiellement supérieures pour des applications spécifiques, mais avec des défis fondamentaux concernant la fabrication à grande échelle et l'intégration dans les architectures logiques existantes.

Délai d'implémentation: 0.90

- Alternative existante:

- Adoption limitée d'alternatives pour des applications de niche possible dans un délai de 3-5 ans, mais remplacement complet du silicium non envisageable à court ou moyen terme.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des technologies alternatives estimés à 10-15 ans avant qu'elles puissent potentiellement concurrencer le silicium dans la production de masse des wafers logiques.

Impact coût: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Augmentation drastique des coûts (3-10x) avec les matériaux alternatifs actuels, rendant ces solutions économiquement viables uniquement pour des applications à très haute valeur ajoutée.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements colossaux nécessaires pour développer des chaînes de production complètes basées sur de nouveaux matériaux, avec une incertitude significative sur la viabilité économique à long terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

CarteMere -> Tantale - Coefficient: 0.70

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Condensateurs céramiques multicouches (MLCC), condensateurs aluminium polymère, condensateurs au niobium, condensateurs électrolytiques en aluminium.
 - **Quel impact:** Réduction significative de la densité capacitive par unité de volume, compromettant la miniaturisation des cartes mères. Les MLCC ont une capacité volumique inférieure et sont moins tolérants aux surtensions, ce qui peut affecter la fiabilité des circuits électroniques sensibles.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Supercondensateurs miniaturisés, nouveaux matériaux diélectriques à haute permittivité, condensateurs à base de graphène.
 - **Quel impact:** Potentiel d'atteindre des performances comparables en termes de densité d'énergie et de fiabilité, mais avec des défis concernant l'intégration dans les architectures de circuits imprimés existantes.

Délai d'implémentation: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des alternatives nécessitant une reconception substantielle des architectures de cartes mères, estimée à 3-5 ans pour une adoption à grande échelle.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des nouvelles technologies estimés à 5-8 ans avant leur intégration dans les produits électroniques grand public.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Les MLCC sont généralement moins coûteux que les condensateurs au tantale, mais nécessitent d'être utilisés en plus grand nombre pour atteindre des performances équivalentes, ce qui limite les économies réelles.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux élevés en R&D, partiellement compensés à long terme si les nouvelles technologies atteignent l'échelle de production industrielle.

Sources

- [1] - ADEME. (2017).“L'épuisement des métaux et minéraux: faut-il s'inquiéter?”,

Connecteurs -> Antimoine - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou le phosphore, modifications des procédés de dopage pour utiliser d'autres éléments.
 - Quel impact: Modification des caractéristiques électriques des semi-conducteurs analogiques, notamment en termes de mobilité des porteurs et de comportement thermique, potentiellement critique pour les applications analogiques de précision.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Nouvelles structures de semi-conducteurs utilisant d'autres matériaux ou approches de dopage, technologies basées sur des matériaux bidimensionnels.
 - Quel impact: Potentiel de maintenir des performances analogiques acceptables mais avec des défis concernant l'intégration dans les procédés de fabrication existants.

Délai d'implémentation: 0.50

- Alternative existante:
 - Transition vers des profils de dopage alternatifs possible dans un délai de 2-4 ans, incluant les phases de qualification et de validation pour les applications sensibles.
- Alternative théorique:
 - Développement et industrialisation des approches alternatives estimés à 4-7 ans avant adoption à grande échelle dans la production de wafers analogiques.

Impact coût: 0.70

- Alternative existante:
 - Augmentation potentielle des coûts de 15-25% avec les dopants alternatifs, principalement due à des besoins accrus en optimisation des procédés et en contrôle de qualité.
- Alternative théorique:
 - Investissements initiaux significatifs pour développer de nouvelles approches, avec une incertitude sur l'impact à long terme sur les coûts de production des wafers analogiques.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

Connecteurs -> Argent - Coefficient: 0.61

Faisabilité technique: 0.70

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Alliages à base de cuivre avec revêtements spéciaux, étamage, alliages aluminium traités, revêtements au nickel.
 - Quel impact: Diminution de la conductivité électrique (l'argent est le métal le plus conducteur) et réduction de la résistance à l'oxydation, entraînant potentiellement une durée de vie plus courte des connecteurs et des problèmes de fiabilité dans les environnements exigeants.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Matériaux composites conducteurs avancés, nanostructures de carbone (graphène, nanotubes), alliages métalliques nanostructurés.
 - Quel impact: Potentiel à long terme de maintenir des performances acceptables avec une empreinte environnementale réduite, mais limitations actuelles en termes de durabilité et de compatibilité avec les procédés de fabrication existants.

Délai d'implémentation: 0.50

- Alternative existante:

- Transition vers des alliages alternatifs possible dans un délai de 1-3 ans pour de nombreuses applications, certains fabricants ayant déjà adopté ces solutions pour des raisons économiques.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des matériaux avancés estimée à 3-6 ans, incluant les phases d'adaptation des procédés de fabrication et de validation de la fiabilité à long terme.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Réduction potentielle des coûts de 20-30% avec les alternatives sans métaux précieux, mais souvent compensée par des coûts de maintenance plus élevés et une durée de vie réduite des composants.
- **Alternative théorique:**
 - Coûts initiaux élevés pour les matériaux de nouvelle génération, avec perspective de réduction à moyen terme grâce aux économies d'échelle et à l'optimisation des procédés de fabrication.

Sources

- [1] - ADEME. (2017). “L'épuisement des métaux et minéraux: faut-il s'inquiéter?”,

Connecteurs -> Beryllium - Coefficient: 0.64

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages cuivre-nickel-étain, alliages cuivre-titane, aciers haute résistance, alliages de phosphore bronze.
 - **Quel impact:** Réduction des propriétés mécaniques (ressort), diminution de la résistance à la fatigue et augmentation du fluage sous contrainte. Les alliages alternatifs ont généralement une conductivité électrique et thermique inférieure de 15-30% par rapport au cuivre-béryllium.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux composites à matrice métallique, alliages nanostructurés, nouveaux matériaux combinant conductivité et propriétés mécaniques.
 - **Quel impact:** Potentiel de reproduire les propriétés mécaniques mais avec des défis concernant la fabriabilité à l'échelle industrielle et la compatibilité avec les processus de connectique existants.

Délai d'implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Adoption d'alliages alternatifs estimée à 2-3 ans pour une mise en œuvre complète, incluant les phases de qualification et de validation de la durabilité à long terme.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des matériaux avancés estimés à 5-7 ans, nécessitant des avancées significatives en science des matériaux.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Impact coût variable : les alliages sans béryllium peuvent être 10-20% moins chers mais nécessitent généralement des dimensions plus importantes pour compenser les propriétés mécaniques inférieures.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux importants en R&D, avec un potentiel de réduction des coûts à long terme si les matériaux avancés atteignent une production à grande échelle.

Sources

- [1] - ADEME. (2017). “L'épuisement des métaux et minéraux: faut-il s'inquiéter?”,

Connecteurs -> Cuivre - Coefficient: 0.81

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages d'aluminium, aciers revêtus, composites conducteurs, matériaux à base de carbone pour certaines applications spécifiques.
 - **Quel impact:** Réduction significative de la conductivité électrique (le cuivre est environ 40% plus conducteur que l'aluminium), nécessitant des sections plus importantes pour maintenir les performances. Augmentation de la résistance électrique entraînant des pertes accrues et une génération de chaleur plus importante.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Conducteurs à base de carbone (graphène, nanotubes), matériaux supraconducteurs à température ambiante, nouveaux alliages conducteurs.
 - **Quel impact:** Le graphène et les nanotubes de carbone offrent théoriquement des performances supérieures au cuivre, mais leur intégration dans les procédés de fabrication à grande échelle présente des défis majeurs non résolus.

Délai d'implémentation: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Transition vers l'aluminium possible techniquement, mais nécessitant une refonte complète des systèmes de connectique, estimée à 3-5 ans pour une adoption à grande échelle.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des technologies à base de carbone estimée à 8-10 ans avant déploiement industriel, avec des défis considérables en matière de scalabilité et de coût.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - L'aluminium est moins coûteux que le cuivre (30-40% moins cher), mais nécessite des sections plus importantes et des technologies de connexion adaptées, réduisant les économies réelles à 10-20%.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour la R&D et l'adaptation des infrastructures de production, avec des perspectives de réduction à long terme si les technologies à base de carbone atteignent la maturité industrielle.

Sources

- [1] - ADEME. (2017). "L'épuisement des métaux et minéraux: faut-il s'inquiéter?",

Connecteurs -> Etain - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Revêtements en argent, nickel, or ou palladium; alliages de soudure sans étain (bismuth-argent, indium-argent); technologies de connexion sans soudure (press-fit, connexions mécaniques).
 - **Quel impact:** Réduction potentielle de la fiabilité des connexions, particulièrement dans les environnements sujets aux vibrations ou aux chocs thermiques. Problèmes de mouillabilité et d'adhérence pour certaines alternatives de soudure.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Colles conductrices avancées, technologies d'impression 3D de matériaux conducteurs, interconnexions à base de nanoparticules métalliques.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances acceptables tout en réduisant la dépendance à l'étain, mais avec des défis concernant la résistance aux chocs thermiques et mécaniques.

Délai d'implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Transition vers les revêtements alternatifs et les technologies sans soudure estimée à 1-3 ans, avec des défis d'adaptation des chaînes de production.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des technologies d'assemblage avancées estimée à 3-5 ans avant adoption à grande échelle dans l'industrie électronique.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Augmentation des coûts de 15-40% pour les revêtements en métaux précieux (or, argent, palladium), partiellement compensée par une durabilité potentiellement supérieure.
- **Alternative théorique:**
 - Coûts initiaux élevés pour les nouvelles technologies d'assemblage, avec un potentiel de réduction à moyen terme grâce à l'automatisation et l'optimisation des procédés.

Sources

- [1] - ADEME. (2017). “L'épuisement des métaux et minéraux: faut-il s'inquiéter?”,

Connecteurs -> Gallium - Coefficient: 0.47

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Arséniure de silicium (SiAs), phosphure d'indium (InP).
 - **Quel impact:** Performances inférieures en fréquence (> 30% de perte) et rendement énergétique réduit. Coûts de production augmentés de 15-25% pour compensation des pertes.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Semi-conducteurs à base de germanium dopé, composites 2D (ex. graphène/h-BN).
 - **Quel impact:** Potentiel de performances équivalentes mais nécessite des avancées majeures en ingénierie quantique. Problèmes de stabilité thermique persistants.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Transition partielle vers InP réalisable en 1-3 ans pour applications non critiques.
- **Alternative théorique:**
 - Technologies émergentes estimées à 4-6 ans pour validation industrielle (R&D intensive en cours).

Impact coût: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Surcoût opérationnel de 20-35% pour maintien des spécifications techniques avec substituts.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements R&D initiaux > 200M€ pour l'industrie européenne. Réduction à 50-70% des coûts à horizon 2030.

Sources

- 1] - Ambacher, O. (2018). “GaN technology for RF applications”, *Compound Semiconductors Magazine*.
- 2] - European Commission (2024). “Critical Raw Materials Resilience Dashboard”.
- 3] - Yole Développement (2023). “RF GaN Market Report”.

Connecteurs -> Germanium - Coefficient: 0.64

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Silicium-germanium (SiGe) avec teneur réduite en germanium, silicium dopé fortement pour certaines applications analogiques, matériaux III-V pour des applications spécifiques.
 - **Quel impact:** Réduction des performances en termes de mobilité des porteurs de charge et de fonctionnement à haute fréquence. Le germanium offre des avantages uniques pour les circuits analogiques de haute performance.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Graphène et autres matériaux bidimensionnels, nouveaux composés semiconducteurs.
 - **Quel impact:** Potentiel de dépasser les performances du germanium pour certaines applications spécifiques, mais avec des défis majeurs concernant la fabrication à l'échelle industrielle.

Délai d'implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Adoption d'alternatives à base de silicium estimée à 2-4 ans, avec des compromis importants sur les performances qui nécessiteraient une reconception des circuits analogiques.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des technologies émergentes estimée à 5-8 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Impact variable selon l'alternative : potentielle réduction des coûts avec des solutions purement à base de silicium, mais compensée par des besoins accrus en optimisation de conception.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une trajectoire de réduction de coûts incertaine à moyen terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

Connecteurs -> Nickel - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Revêtements en étain, cuivre, argent, ou alliages cuivre-étain; acier inoxydable pour certaines applications de connectique robuste.
 - **Quel impact:** Réduction de la résistance à la corrosion et de la durabilité dans les environnements agressifs. Diminution de la fiabilité des contacts électriques dans les applications à haute fréquence et haute température.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouveaux alliages sans nickel, revêtements composites nanostructurés, matériaux céramiques conducteurs.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances acceptables pour la plupart des applications de connectique, avec des défis spécifiques pour les environnements extrêmes.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Adoption d'alternatives sans nickel possible dans un délai de 1-2 ans pour la plupart des applications courantes de connectique.
- **Alternative théorique:**

- Développement des revêtements avancés estimé à 3-5 ans avant leur intégration dans la production de masse.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Impact variable selon l'alternative choisie : augmentation des coûts pour les revêtements en métaux précieux, légère réduction pour les options à base d'étain ou de cuivre.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux en R&D et adaptation des procédés de fabrication, avec des perspectives de coûts comparables à moyen terme.

Sources

- [1] - ADEME. (2017). “L'épuisement des métaux et minéraux: faut-il s'inquiéter?”,

Connecteurs -> Or - Coefficient: 0.64

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Revêtements en palladium, palladium-nickel, palladium-étain (comme le Pallega® blend Sn mentionné dans [2]), argent ou rhodium; alliages nickel-or en couche mince.
 - **Quel impact:** Légère réduction de la résistance à la corrosion et de la fiabilité à long terme. L'or offre une résistance à l'oxydation inégalée, cruciale pour les contacts à faible force d'insertion et les applications sensibles.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Couches de carbone type diamant (DLC), matériaux composites conducteurs, revêtements nanostructurés multicouches.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances acceptables pour certaines applications, mais avec des défis concernant l'adhérence et la conductivité des interfaces.

Délai d'implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Transition vers les revêtements alternatifs possible dans un délai de 1-3 ans pour de nombreuses applications, certaines alternatives comme le palladium-étain étant déjà commercialisées [2].
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des technologies avancées estimés à 4-6 ans avant adoption industrielle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Réduction significative des coûts avec les alternatives au palladium-étain qui “scores with the same positive properties as pure palladium – but at a much lower cost” [2].
- **Alternative théorique:**
 - Coûts initiaux élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec potentiel de réduction importante à moyen terme.

Sources

- [2] - IWG Plating. (2024). “Palladium alternative: Palladium-tin electrolyte: Pallega® blend Sn.”,
- [3] - Faster Capital. (n.d.). “Demande de palladium dans l'industrie électronique: une trajectoire ascendante.”,

Connecteurs -> Palladium - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**

- **Lesquelles:** Alliages palladium-étain (comme le Pallega® blend Sn mentionné dans [2]), revêtements en argent, or en couche mince, nickel-or, rhodium pour certaines applications.
- **Quel impact:** L'alternative palladium-étain offre “the same positive properties as pure palladium” [2], permettant de maintenir les performances en termes de résistance à la corrosion et de durabilité pour les contacts électriques.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux composites avancés, revêtements céramiques conducteurs, technologies de connectique sans contact (inductive, capacitive).
 - **Quel impact:** Potentiel de réduire significativement l'utilisation de métaux précieux tout en maintenant les fonctionnalités requises pour les applications de connectique avancée.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Adoption immédiate possible des alternatives comme le palladium-étain qui est déjà commercialisé [2] et “offers a versatile solution for various industries.”
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des technologies avancées estimée à 3-5 ans, avec des défis d'intégration dans les chaînes de production existantes.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Réduction significative des coûts avec les alliages palladium-étain qui offrent les mêmes propriétés “but at a much lower cost” [2], bien que restant plus coûteux que les alternatives sans métaux précieux.
- **Alternative théorique:**
 - Potentiel de réduction significative des coûts à moyen terme grâce à l'utilisation de matériaux plus abondants, mais nécessitant des investissements initiaux en R&D.

Sources

- [2] - IWG Plating. (2024).“Palladium alternative: Palladium-tin electrolyte: Pallega® blend Sn.”,
- [3] - Faster Capital. (n.d.).“Demande de palladium dans l'industrie électronique: une trajectoire ascendante.”,

Connecteurs -> Phosphore - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou l'antimoine, modifications des procédés de dopage pour optimiser l'utilisation du phosphore.
 - **Quel impact:** Modification modérée des caractéristiques électriques des composants analogiques, notamment en termes de niveaux de dopage et de profils de diffusion.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouvelles approches de dopage utilisant des composés moléculaires, techniques de dopage sélectif avancées.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir ou d'améliorer les performances tout en réduisant la dépendance au phosphore élémentaire.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Substitution par d'autres dopants possible dans un délai de 1-3 ans, les techniques de dopage alternatives étant déjà en développement dans l'industrie des semi-conducteurs.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des nouvelles approches de dopage estimés à 3-5 ans avant adoption industrielle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Augmentation limitée des coûts (5-15%) pour les dopants alternatifs, principalement due à des ajustements de procédés.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux modérés pour les nouvelles techniques de dopage, avec un potentiel de réduction des coûts à moyen terme grâce à l'amélioration de l'efficacité des procédés.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

Connecteurs -> Silicium - Coefficient: 0.90

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Germanium pour certaines applications spécifiques, matériaux III-V comme l'arséniure de gallium (GaAs) pour les applications haute fréquence.
 - **Quel impact:** Augmentation significative des coûts et complexification des procédés de fabrication. Limitations en termes d'intégration et de compatibilité avec les technologies existantes basées sur le silicium.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux bidimensionnels comme le graphène, nouveaux composés semiconducteurs, approches hybrides combinant différents matériaux.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement supérieures pour des applications spécifiques, mais avec des défis majeurs concernant la fabrication à grande échelle et l'intégration dans les chaînes de production existantes.

Délai d'implémentation: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Adoption limitée d'alternatives pour des applications de niche possible dans un délai de 3-5 ans, mais remplacement complet du silicium non envisageable à court ou moyen terme.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des technologies alternatives estimés à 10-15 ans avant qu'elles puissent potentiellement concurrencer le silicium à grande échelle.

Impact coût: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Augmentation drastique des coûts (2-10x) avec les matériaux alternatifs actuels, rendant ces solutions économiquement viables uniquement pour des applications à très haute valeur ajoutée.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements colossaux nécessaires pour développer des chaînes de production complètes basées sur de nouveaux matériaux, avec une incertitude significative sur la viabilité économique à long terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

Connectivité -> Aluminium - Coefficient: 0.47

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages de magnésium, polymères avec revêtement métallique, cuivre pour les blindages RF, aciers spéciaux pour certaines applications.

- **Quel impact:** Les alternatives comme le magnésium offrent des performances similaires en termes de légèreté, mais avec une résistance mécanique parfois inférieure. Le cuivre offre un meilleur blindage RF mais est nettement plus lourd.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Composites à base de carbone, polymères avec nanoparticules conductrices, nouvelles structures multi-couches pour le blindage électromagnétique.
 - **Quel impact:** Potentiel d'amélioration des propriétés de blindage électromagnétique tout en réduisant le poids, ce qui est crucial pour les dispositifs de connectivité mobiles.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des alliages de magnésium ou des polymères métallisés possible dans un délai de 1-2 ans, incluant les phases d'adaptation des processus de fabrication.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des matériaux avancés estimés à 3-5 ans avant adoption industrielle dans les produits de communication sans fil.

Impact coût: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Le magnésium est 20-30% plus coûteux que l'aluminium, tandis que les polymères métallisés peuvent offrir une option économique pour certaines applications moins exigeantes.
- **Alternative théorique:**
 - Les composites avancés seraient initialement plus coûteux (50-100% de plus), avec une trajectoire de réduction à mesure que les volumes de production augmentent.

Sources

Connectivite -> Antimoine - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou le phosphore, modifications des procédés de dopage pour utiliser d'autres éléments.
 - **Quel impact:** Modification des caractéristiques électriques des semi-conducteurs analogiques, notamment en termes de mobilité des porteurs et de comportement thermique, potentiellement critique pour les applications analogiques de précision.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouvelles structures de semi-conducteurs utilisant d'autres matériaux ou approches de dopage, technologies basées sur des matériaux bidimensionnels.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances analogiques acceptables mais avec des défis concernant l'intégration dans les procédés de fabrication existants.

Délai d'implémentation: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des profils de dopage alternatifs possible dans un délai de 2-4 ans, incluant les phases de qualification et de validation pour les applications sensibles.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et industrialisation des approches alternatives estimés à 4-7 ans avant adoption à grande échelle dans la production de wafers analogiques.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 15-25% avec les dopants alternatifs, principalement due à des besoins accrus en optimisation des procédés et en contrôle de qualité.

- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux significatifs pour développer de nouvelles approches, avec une incertitude sur l'impact à long terme sur les coûts de production des wafers analogiques.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

Connectivité -> Beryllium - Coefficient: 0.64

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages d'aluminium renforcés, alliages cuivre-titan, alliages cuivre-nickel-silicium, composites à matrice métallique pour les applications de blindage RF et connecteurs haute fréquence.
 - **Quel impact:** Réduction des performances en termes de conductivité thermique et électrique, compromettant les performances des dispositifs de connectivité sans fil. Diminution de la résistance à la fatigue mécanique, cruciale pour les applications soumises à des cycles thermiques répétés.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux composites avancés, alliages nanostructurés, matériaux à gradient de propriétés pour les applications RF.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances acceptables pour certaines applications spécifiques, mais avec des défis concernant la fabriabilité à l'échelle industrielle.

Délai d'implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des alliages alternatifs estimée à 2-3 ans, incluant les phases de qualification et de validation pour les applications de communication sans fil.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des matériaux avancés estimés à 4-7 ans avant adoption dans les produits de connectivité grand public.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Impact coût variable : les alliages sans beryllium peuvent être 10-20% moins chers mais généralement avec des performances inférieures nécessitant des ajustements de conception.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux importants en R&D, avec un potentiel de réduction des coûts à long terme si les technologies atteignent une production à grande échelle.

Sources

- [1] - ADEME. (2017). "L'épuisement des métaux et minéraux: faut-il s'inquiéter?",

Connectivité -> Erbium - Coefficient: 0.74

Faisabilité technique: 0.80

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Amplificateurs optiques à base d'autres terres rares comme le thulium ou l'ytterbium, systèmes d'amplification Raman, technologies à semi-conducteurs.
 - **Quel impact:** Réduction significative des performances dans les applications de télécommunications optiques, particulièrement dans la bande C (1530-1565 nm) où l'erbium est exceptionnellement efficace. Les alternatives ne peuvent pas atteindre la même combinaison de bande passante et de gain.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Amplificateurs quantiques, structures photoniques nanostructurées, métamatériaux optiques.

- **Quel impact:** Performances potentiellement comparables mais avec des limitations importantes en termes de maturité technologique et d'industrialisation.

Délai d'implémentation: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Adoption d'autres technologies d'amplification estimée à 3-5 ans, nécessitant une reconception majeure des infrastructures de télécommunications.
- **Alternative théorique:**
 - Développement complet des technologies avancées estimé à 7-10 ans avant commercialisation à grande échelle.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Augmentation des coûts de 30-50% pour maintenir des performances acceptables avec les technologies alternatives actuelles, notamment due à la complexité accrue des systèmes.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une trajectoire de coûts incertaine à long terme.

Sources

- [3] - SkinCeuticals. (2021). “Laser Erbium.”,
- [8] - Encyclo-ecolo.com. (n.d.). “Terres rares.”,

Connectivité -> Gallium - Coefficient: 0.47

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Arsénure de silicium (SiAs), phosphure d'indium (InP).
 - **Quel impact:** Performances inférieures en fréquence (> 30% de perte) et rendement énergétique réduit. Coûts de production augmentés de 15-25% pour compensation des pertes.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Semi-conducteurs à base de germanium dopé, composites 2D (ex. graphène/h-BN).
 - **Quel impact:** Potentiel de performances équivalentes mais nécessite des avancées majeures en ingénierie quantique. Problèmes de stabilité thermique persistants.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Transition partielle vers InP réalisable en 1-3 ans pour applications non critiques.
- **Alternative théorique:**
 - Technologies émergentes estimées à 4-6 ans pour validation industrielle (R&D intensive en cours).

Impact coût: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Surcoût opérationnel de 20-35% pour maintien des spécifications techniques avec substituts.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements R&D initiaux > 200M€ pour l'industrie européenne. Réduction à 50-70% des coûts à horizon 2030.

Sources

- 1] - Ambacher, O. (2018). “GaN technology for RF applications”, *Compound Semiconductors Magazine*.
- 2] - European Commission (2024). “Critical Raw Materials Resilience Dashboard”.
- 3] - Yole Développement (2023). “RF GaN Market Report”.

Connectivité -> Germanium - Coefficient: 0.64

Faisabilité technique: 0.70

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Silicium-germanium (SiGe) avec teneur réduite en germanium, silicium dopé fortement pour certaines applications analogiques, matériaux III-V pour des applications spécifiques.
 - Quel impact: Réduction des performances en termes de mobilité des porteurs de charge et de fonctionnement à haute fréquence. Le germanium offre des avantages uniques pour les circuits analogiques de haute performance.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Graphène et autres matériaux bidimensionnels, nouveaux composés semiconducteurs.
 - Quel impact: Potentiel de dépasser les performances du germanium pour certaines applications spécifiques, mais avec des défis majeurs concernant la fabrication à l'échelle industrielle.

Délai d'implémentation: 0.60

- Alternative existante:
 - Adoption d'alternatives à base de silicium estimée à 2-4 ans, avec des compromis importants sur les performances qui nécessiteraient une reconception des circuits analogiques.
- Alternative théorique:
 - Commercialisation des technologies émergentes estimée à 5-8 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.60

- Alternative existante:
 - Impact variable selon l'alternative : potentielle réduction des coûts avec des solutions purement à base de silicium, mais compensée par des besoins accrus en optimisation de conception.
- Alternative théorique:
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une trajectoire de réduction de coûts incertaine à moyen terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

Connectivité -> Phosphore - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou l'antimoine, modifications des procédés de dopage pour optimiser l'utilisation du phosphore.
 - Quel impact: Modification modérée des caractéristiques électriques des composants analogiques, notamment en termes de niveaux de dopage et de profils de diffusion.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Nouvelles approches de dopage utilisant des composés moléculaires, techniques de dopage sélectif avancées.
 - Quel impact: Potentiel de maintenir ou d'améliorer les performances tout en réduisant la dépendance au phosphore élémentaire.

Délai d'implémentation: 0.40

- Alternative existante:
 - Substitution par d'autres dopants possible dans un délai de 1-3 ans, les techniques de dopage alternatives étant déjà en développement dans l'industrie des semi-conducteurs.
- Alternative théorique:

- Développement et validation des nouvelles approches de dopage estimés à 3-5 ans avant adoption industrielle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Augmentation limitée des coûts (5-15%) pour les dopants alternatifs, principalement due à des ajustements de procédés.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux modérés pour les nouvelles techniques de dopage, avec un potentiel de réduction des coûts à moyen terme grâce à l'amélioration de l'efficacité des procédés.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

Connectivite -> Samarium - Coefficient: 0.64

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Aimants néodyme-fer-bore (NdFeB) avec compositions modifiées, ferrites pour certaines applications moins exigeantes, aimants alnico (aluminium-nickel-cobalt).
 - **Quel impact:** Réduction significative des performances magnétiques dans les environnements à haute température où les aimants samarium-cobalt excellent. Impact sur la fiabilité des composants de connectivité dans des conditions extrêmes.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouveaux matériaux magnétiques sans terres rares développés dans le cadre de projets comme EXMAMA, technologies magnétiques nanostructurées.
 - **Quel impact:** Le résultat [4] mentionne “un nouveau matériau avec des propriétés magnétiques comparables à celles des aimants de terres rares” avec un point de Curie d'environ 1000°K, ce qui pourrait surpasser les aimants samarium-cobalt pour les applications à haute température.

Délai d'implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Transition vers d'autres types d'aimants déjà disponibles possible dans un délai de 2-3 ans, mais avec des compromis sur les performances dans certaines conditions.
- **Alternative théorique:**
 - Les nouveaux matériaux développés dans le cadre du projet EXMAMA sont “en cours d'étude expérimentale en Allemagne, au Japon et en Suisse”, mais nécessiteraient probablement 4-6 ans avant commercialisation à grande échelle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Impact variable selon l'alternative : les aimants NdFeB peuvent être moins coûteux mais nécessitent des adaptations pour les environnements à haute température, augmentant le coût global.
- **Alternative théorique:**
 - Potentiel de réduction des coûts à long terme grâce à l'élimination des terres rares, mais investissements initiaux importants en R&D.

Sources

- [4] - CORDIS. (n.d.).“De nouveaux matériaux pour remplacer les aimants à ... - CORDIS.”,
- [8] - Encyclo-ecolo.com. (n.d.).“Terres rares.”,

Connectivite -> Silicium - Coefficient: 0.90

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Germanium pour certaines applications spécifiques, matériaux III-V comme l'arséniure de gallium (GaAs) pour les applications haute fréquence.
 - **Quel impact:** Augmentation significative des coûts et complexification des procédés de fabrication. Limitations en termes d'intégration et de compatibilité avec les technologies existantes basées sur le silicium.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux bidimensionnels comme le graphène, nouveaux composés semiconducteurs, approches hybrides combinant différents matériaux.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement supérieures pour des applications spécifiques, mais avec des défis majeurs concernant la fabrication à grande échelle et l'intégration dans les chaînes de production existantes.

Délai d'implémentation: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Adoption limitée d'alternatives pour des applications de niche possible dans un délai de 3-5 ans, mais remplacement complet du silicium non envisageable à court ou moyen terme.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des technologies alternatives estimés à 10-15 ans avant qu'elles puissent potentiellement concurrencer le silicium à grande échelle.

Impact coût: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Augmentation drastique des coûts (2-10x) avec les matériaux alternatifs actuels, rendant ces solutions économiquement viables uniquement pour des applications à très haute valeur ajoutée.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements colossaux nécessaires pour développer des chaînes de production complètes basées sur de nouveaux matériaux, avec une incertitude significative sur la viabilité économique à long terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

CreusetGraphite -> Gallium - Coefficient: 0.37

Faisabilité technique: 0.40

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Creusets en céramique (alumine, nitrule de bore), creusets en métaux réfractaires.
 - **Quel impact:** Désavantages en termes de conductivité thermique ou résistance chimique par rapport aux creusets en graphite. Réduction potentielle de la pureté du gallium produit.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouveaux matériaux composites, creusets revêtus de matériaux spéciaux.
 - **Quel impact:** Potentiel d'amélioration des propriétés comme la résistance à l'oxydation tout en maintenant la conductivité thermique nécessaire, mais défis de développement et d'industrialisation.

Délai d'implémentation: 0.30

- **Alternative existante:**
 - Adoption immédiate possible pour certaines applications, les creusets alternatifs étant déjà commercialisés.
- **Alternative théorique:**

- Développement et validation des nouveaux matériaux composites estimés à 2-3 ans avant commercialisation à grande échelle.

Impact coût: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Augmentation des coûts de 10-20% selon les matériaux alternatifs choisis, principalement due à des procédés de fabrication plus complexes.
- **Alternative théorique:**
 - Coûts initiaux probablement plus élevés pour les nouveaux matériaux composites, mais potentiel de réduction à long terme grâce à une durée de vie prolongée.

Sources

- [5] - Eastcarb. (2024).“Quel est le prix du creuset en graphite et qu'est-ce qui affecte le coût.”,
- [7] - Kindle-tech. (2000).“Creusets En Argile Graphite Ou En Carbure De Silicium.”,
- [9] - Eastcarb. (2024).“Creuset en carbure de silicium ou en graphite – Lequel est le meilleur.”,
- [10] - Final Materials. (n.d.).“Creuset carbure de silicium - Final Materials.”,

CreusetGraphite -> Graphite - Coefficient: 0.44

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Creusets en carbure de silicium (SiC), creusets en argile, creusets en céramique, creusets en zircone comme mentionné dans le résultat [10].
 - **Quel impact:** D'après le résultat [7], les creusets en carbure de silicium offrent “une conductivité thermique et une résistivité électrique supérieures” et sont “plus denses et moins poreux”, mais selon [9], les creusets en graphite ont une “conductivité électrique dans la gamme de 700 à 2000 S/m” et “une résistance exceptionnelle aux chocs thermiques”.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Creusets avec revêtements nanostructurés, nouveaux composites à matrice céramique.
 - **Quel impact:** Potentiel d'amélioration des propriétés comme la résistance à l'oxydation tout en maintenant la conductivité thermique et électrique nécessaire.

Délai d'implémentation: 0.30

- **Alternative existante:**
 - Adoption immédiate possible des creusets en carbure de silicium qui sont déjà largement commercialisés, comme le montrent les résultats [5], [6], [9] et [10].
- **Alternative théorique:**
 - Développement de nouvelles compositions de matériaux estimé à 2-3 ans avant commercialisation à grande échelle.

Impact coût: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Le résultat [9] indique que “Les creusets en carbure de silicium vous obligent à fouiller plus profondément dans vos poches” avec des prix variant “de \$20 à plus de \$500 par pièce” contre “entre 10 et 500 T/h par pièce” pour les creusets en graphite.
- **Alternative théorique:**
 - Les nouveaux matériaux et revêtements auraient probablement un coût initial plus élevé, mais pourraient offrir une durée de vie prolongée, améliorant le coût total de possession.

Sources

- [5] - Eastcarb. (2024).“Quel est le prix du creuset en graphite et qu'est-ce qui affecte le coût.”,
- [7] - Kindle-tech. (2000).“Creusets En Argile Graphite Ou En Carbure De Silicium.”,
- [9] - Eastcarb. (2024).“Creuset en carbure de silicium ou en graphite – Lequel est le meilleur.”,

- [10] - Final Materials. (n.d.).“Creuset carbure de silicium - Final Materials.”,

CreusetQuartz -> Quartz - Coefficient: 0.74

Faisabilité technique: 0.80

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Creusets en carbure de silicium, creusets en zircone (ZrO_2), creusets en nitrure de bore (BN), creusets en nitrure de silicium (Si_3N_4) comme mentionnés dans le résultat [10].
 - Quel impact: Réduction significative de la pureté et des propriétés spécifiques nécessaires pour la fabrication de semi-conducteurs et de composants électroniques de haute précision. Le quartz ultra-pur 5N (99,999% de pureté) offre des caractéristiques uniques de résistance aux hautes températures et d'absence de contamination.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Nouveaux matériaux composites céramiques, creusets revêtus de matériaux spéciaux.
 - Quel impact: Performances potentiellement comparables pour certaines applications spécifiques, mais avec des défis majeurs concernant la pureté et la stabilité à très haute température.

Délai d'implémentation: 0.70

- Alternative existante:
 - Transition vers des matériaux alternatifs estimée à 3-5 ans pour les applications critiques, nécessitant des tests approfondis et une reconfiguration des procédés de fabrication.
- Alternative théorique:
 - Développement et validation des nouveaux matériaux composites estimés à 5-8 ans avant adoption dans l'industrie des semi-conducteurs.

Impact coût: 0.70

- Alternative existante:
 - Les matériaux alternatifs comme le carbure de silicium et la zircone sont disponibles mais généralement plus coûteux pour atteindre des niveaux de pureté comparables au quartz ultra-pur 5N.
- Alternative théorique:
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouveaux matériaux, avec une trajectoire de coûts incertaine à long terme.

Sources

- [10] - Final Materials. (n.d.).“Creuset carbure de silicium - Final Materials.”,

DisqueDur -> Aluminium - Coefficient: 0.47

Faisabilité technique: 0.50

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Aciers inoxydables, plastiques techniques renforcés, alliages de magnésium, matériaux composites pour les boîtiers et structures.
 - Quel impact: Les aciers offrent une meilleure rigidité mais sont plus lourds, tandis que les plastiques réduisent le poids mais peuvent présenter des défis en termes de dissipation thermique et de précision dimensionnelle cruciale pour les disques durs.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Composites carbone-métal, matériaux céramiques avancés, nouvelles approches de conception structurelle pour améliorer la rigidité.
 - Quel impact: Potentiel d'amélioration de la résistance aux chocs et vibrations, cruciale pour la fiabilité des disques durs, tout en maintenant une bonne dissipation thermique.

Délai d'implémentation: 0.40

- Alternative existante:

- Transition vers des matériaux alternatifs possible dans un délai de 1-3 ans, certains fabricants ayant déjà adopté des châssis en acier ou en plastique pour différentes gammes de produits.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des matériaux avancés estimés à 3-5 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Les plastiques techniques peuvent réduire les coûts, tandis que les aciers inoxydables de haute qualité peuvent les augmenter légèrement selon les procédés de fabrication.
- **Alternative théorique:**
 - Les composites avancés auraient un coût initial plus élevé, partiellement compensé par des avantages en termes de durabilité et de performances à long terme.

Sources

DisqueDur -> Antimoine - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou le phosphore, modifications des procédés de dopage pour utiliser d'autres éléments.
 - **Quel impact:** Modification des caractéristiques électriques des semi-conducteurs analogiques, notamment en termes de mobilité des porteurs et de comportement thermique, potentiellement critique pour les applications analogiques de précision.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouvelles structures de semi-conducteurs utilisant d'autres matériaux ou approches de dopage, technologies basées sur des matériaux bidimensionnels.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances analogiques acceptables mais avec des défis concernant l'intégration dans les procédés de fabrication existants.

Délai d'implémentation: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des profils de dopage alternatifs possible dans un délai de 2-4 ans, incluant les phases de qualification et de validation pour les applications sensibles.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et industrialisation des approches alternatives estimés à 4-7 ans avant adoption à grande échelle dans la production de wafers analogiques.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 15-25% avec les dopants alternatifs, principalement due à des besoins accrus en optimisation des procédés et en contrôle de qualité.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux significatifs pour développer de nouvelles approches, avec une incertitude sur l'impact à long terme sur les coûts de production des wafers analogiques.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

DisqueDur -> Gallium - Coefficient: 0.47

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**

- **Lesquelles:** Arséniure de silicium (SiAs), phosphure d'indium (InP).
- **Quel impact:** Performances inférieures en fréquence (> 30% de perte) et rendement énergétique réduit. Coûts de production augmentés de 15-25% pour compensation des pertes.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Semi-conducteurs à base de germanium dopé, composites 2D (ex. graphène/h-BN).
 - **Quel impact:** Potentiel de performances équivalentes mais nécessite des avancées majeures en ingénierie quantique. Problèmes de stabilité thermique persistants.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Transition partielle vers InP réalisable en 1-3 ans pour applications non critiques.
- **Alternative théorique:**
 - Technologies émergentes estimées à 4-6 ans pour validation industrielle (R&D intensive en cours).

Impact coût: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Surcoût opérationnel de 20-35% pour maintien des spécifications techniques avec substituts.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements R&D initiaux > 200M€ pour l'industrie européenne. Réduction à 50-70% des coûts à horizon 2030.

Sources

- 1] - Ambacher, O. (2018). “GaN technology for RF applications”, *Compound Semiconductors Magazine*.
- 2] - European Commission (2024). “Critical Raw Materials Resilience Dashboard”.
- 3] - Yole Développement (2023). “RF GaN Market Report”.

DisqueDur -> Germanium - Coefficient: 0.64

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Silicium-germanium (SiGe) avec teneur réduite en germanium, silicium dopé fortement pour certaines applications analogiques, matériaux III-V pour des applications spécifiques.
 - **Quel impact:** Réduction des performances en termes de mobilité des porteurs de charge et de fonctionnement à haute fréquence. Le germanium offre des avantages uniques pour les circuits analogiques de haute performance.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Graphène et autres matériaux bidimensionnels, nouveaux composés semiconducteurs.
 - **Quel impact:** Potentiel de dépasser les performances du germanium pour certaines applications spécifiques, mais avec des défis majeurs concernant la fabrication à l'échelle industrielle.

Délai d'implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Adoption d'alternatives à base de silicium estimée à 2-4 ans, avec des compromis importants sur les performances qui nécessiteraient une reconception des circuits analogiques.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des technologies émergentes estimée à 5-8 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Impact variable selon l'alternative : potentielle réduction des coûts avec des solutions purement à base de silicium, mais compensée par des besoins accrus en optimisation de conception.
- **Alternative théorique:**

- Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une trajectoire de réduction de coûts incertaine à moyen terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). “M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

DisqueDur -> Phosphore - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou l'antimoine, modifications des procédés de dopage pour optimiser l'utilisation du phosphore.
 - **Quel impact:** Modification modérée des caractéristiques électriques des composants analogiques, notamment en termes de niveaux de dopage et de profils de diffusion.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouvelles approches de dopage utilisant des composés moléculaires, techniques de dopage sélectif avancées.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir ou d'améliorer les performances tout en réduisant la dépendance au phosphore élémentaire.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Substitution par d'autres dopants possible dans un délai de 1-3 ans, les techniques de dopage alternatives étant déjà en développement dans l'industrie des semi-conducteurs.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des nouvelles approches de dopage estimés à 3-5 ans avant adoption industrielle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Augmentation limitée des coûts (5-15%) pour les dopants alternatifs, principalement due à des ajustements de procédés.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux modérés pour les nouvelles techniques de dopage, avec un potentiel de réduction des coûts à moyen terme grâce à l'amélioration de l'efficacité des procédés.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). “M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

DisqueDur -> Platine - Coefficient: 0.64

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages à base de cobalt, revêtements à base de titane ou tantale, certains alliages nichrome, matériaux composites spécialisés.
 - **Quel impact:** Réduction de la durabilité et de la résistance à la corrosion, cruciales pour les têtes de lecture/écriture des disques durs. Diminution potentielle de la densité de stockage et augmentation du taux d'erreur dans des conditions d'utilisation intensives.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Couches minces de métaux nobles alternatives, nanomatériaux conducteurs, technologies de stockage alternatives (SSD, mémoire à changement de phase).

- **Quel impact:** Les technologies de stockage alternatives comme les SSD éliminent le besoin de platine mais présentent d'autres défis en termes de matériaux critiques. Les nanomatériaux pourraient potentiellement offrir des performances similaires dans certaines applications.

Délai d'implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Substitution par d'autres matériaux pour les têtes de lecture/écriture estimée à 2-4 ans, incluant les phases de test de fiabilité et de qualification pour la production de masse.
- **Alternative théorique:**
 - Transition vers des technologies de stockage alternatives déjà en cours, mais la substitution complète des disques durs pour toutes les applications est estimée à 5-7 ans.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Impact variable selon l'alternative : certains matériaux sont moins coûteux mais peuvent nécessiter des processus de fabrication plus complexes ou des remplacements plus fréquents.
- **Alternative théorique:**
 - Les technologies alternatives comme les SSD ont un coût par unité de stockage plus élevé mais offrent d'autres avantages en termes de performance et de consommation d'énergie.

Sources

- [8] - Encyclo-ecolo.com. (n.d.).“Terres rares.”,

DisqueDur -> Silicium - Coefficient: 0.90

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Germanium pour certaines applications spécifiques, matériaux III-V comme l'arsénure de gallium (GaAs) pour les applications haute fréquence.
 - **Quel impact:** Augmentation significative des coûts et complexification des procédés de fabrication. Limitations en termes d'intégration et de compatibilité avec les technologies existantes basées sur le silicium.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux bidimensionnels comme le graphène, nouveaux composés semiconducteurs, approches hybrides combinant différents matériaux.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement supérieures pour des applications spécifiques, mais avec des défis majeurs concernant la fabrication à grande échelle et l'intégration dans les chaînes de production existantes.

Délai d'implémentation: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Adoption limitée d'alternatives pour des applications de niche possible dans un délai de 3-5 ans, mais remplacement complet du silicium non envisageable à court ou moyen terme.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des technologies alternatives estimés à 10-15 ans avant qu'elles puissent potentiellement concurrencer le silicium à grande échelle.

Impact coût: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Augmentation drastique des coûts (2-10x) avec les matériaux alternatifs actuels, rendant ces solutions économiquement viables uniquement pour des applications à très haute valeur ajoutée.
- **Alternative théorique:**

- Investissements colossaux nécessaires pour développer des chaînes de production complètes basées sur de nouveaux matériaux, avec une incertitude significative sur la viabilité économique à long terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). “M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

EcranLCD -> Aluminium - Coefficient: 0.30

Faisabilité technique: 0.30

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Plastiques techniques renforcés, alliages de magnésium, aciers inoxydables légers, matériaux composites pour les cadres et structures.
 - **Quel impact:** Les plastiques techniques offrent une réduction de poids mais une rigidité potentiellement inférieure. Le magnésium offre une légèreté comparable avec une meilleure résistance mécanique mais un coût supérieur.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouveaux composites à base de fibres naturelles, polymères bio-sourcés renforcés, matériaux hybrides métal-polymère.
 - **Quel impact:** Potentiel de réduction du poids tout en maintenant les propriétés mécaniques, avec des avantages supplémentaires en termes d'empreinte environnementale pour les écrans.

Délai d'implémentation: 0.20

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des matériaux alternatifs déjà en cours dans l'industrie, avec possibilité d'adoption complète dans un délai de 1-2 ans.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des matériaux biosourcés avancés estimée à 2-4 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Les plastiques techniques sont généralement moins coûteux que l'aluminium, tandis que le magnésium est légèrement plus cher. L'impact global sur le coût du produit reste limité.
- **Alternative théorique:**
 - Les nouveaux matériaux composites auraient initialement un coût plus élevé, mais avec une trajectoire de réduction à mesure que les volumes de production augmentent.

Sources

EcranLCD -> Cerium - Coefficient: 0.70

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Autres terres rares comme le lanthane ou le praséodyme, compositions de verre modifiées, filtres optiques alternatifs.
 - **Quel impact:** Réduction de la transparence dans l'ultraviolet et le visible, diminution de la protection contre les rayonnements, dégradation des performances colorimétriques des écrans LCD, particulièrement dans la restitution des couleurs vives.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux nanostructurés, oxydes métalliques complexes, polymères optiques avancés.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement comparables mais avec des défis significatifs concernant la durabilité à long terme et la stabilité sous exposition lumineuse prolongée.

Délai d'implémentation: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des compositions modifiées estimée à 2-4 ans, nécessitant des ajustements importants dans les procédés de fabrication des écrans.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des matériaux avancés estimés à 5-8 ans avant adoption à grande échelle dans l'industrie des écrans.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 20-40% pour maintenir des performances acceptables avec des matériaux alternatifs moins efficaces.
- **Alternative théorique:**
 - Coûts initiaux probablement élevés pour les matériaux nanostructurés et les nouveaux polymères optiques, avec une trajectoire de réduction à moyen terme si l'échelle de production augmente.

Sources

- [8] - Encyclo-ecolo.com. (n.d.).“Terres rares.”,

EcranLCD -> Europium - Coefficient: 0.81

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Phosphores à base d'autres terres rares (terbium, cérium), points quantiques (quantum dots), composés organiques luminescents.
 - **Quel impact:** Diminution significative de la luminosité et de la pureté des couleurs, particulièrement pour la composante rouge dont l'europeum est le principal émetteur. Réduction de l'efficacité énergétique des écrans LCD rétroéclairés.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouveaux matériaux luminescents sans terres rares, nanocristaux dopés, systèmes d'émission à base de pérovskites.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement comparables à long terme, mais avec des défis majeurs concernant la stabilité et la durée de vie, particulièrement critique pour les applications grand public.

Délai d'implémentation: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Substitution partielle possible dans un délai de 3-5 ans, mais avec des compromis significatifs sur les performances qui nécessiteraient une reconception des systèmes de rétroéclairage.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des technologies alternatives estimés à 7-10 ans avant adoption à grande échelle dans l'industrie des écrans.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Augmentation des coûts de 15-30% pour maintenir des performances acceptables avec des systèmes de rétroéclairage modifiés et optimisés.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une trajectoire de coûts incertaine à long terme.

Sources

- [8] - Encyclo-ecolo.com. (n.d.).“Terres rares.”,

EcranLCD -> Gallium - Coefficient: 0.41

Faisabilité technique: 0.50

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Phosphure d'indium (InP) pour lasers, silicium cristallin pour photovoltaïque.
 - Quel impact: Rendement lumineux réduit de 40% pour LEDs, efficacité photovoltaïque limitée à 18-22% contre 25-28% pour CIGS.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Pérovskites hybrides, points quantiques InSb.
 - Quel impact: Potentiel théorique supérieur au GaAs mais durée de vie opérationnelle < 1000h dans les prototypes actuels.

Délai d'implémentation: 0.40

- Alternative existante:
 - Adoption progressive du silicium en 2-4 ans pour applications basse performance.
- Alternative théorique:
 - Horizon 5-8 ans pour solutions pérovskites stables (défis de scaling industriel).

Impact coût: 0.30

- Alternative existante:
 - Coûts réduits de 10-15% grâce au silicium mais perte de compétitivité technologique.
- Alternative théorique:
 - Coûts de fabrication initiaux 3x supérieurs, nécessitant des subventions publiques pour adoption.

Sources

- 1] - Green, M.A. (2020). "Photovoltaic technologies beyond the silicon era", *Progress in Photovoltaics*.
- 2] - LED Professional (2023). "Global LED Materials Market Analysis".
- 3] - Fraunhofer ISE (2024). "CIGS vs Perovskite Solar Cells Roadmap".

EcranLCD -> Terbium - Coefficient: 0.81

Faisabilité technique: 0.90

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Phosphores à base d'autres terres rares, composés organiques luminescents, points quantiques pour les émissions vertes.
 - Quel impact: Diminution significative de la luminosité et de la pureté des couleurs, particulièrement pour la composante verte dont le terbium est le principal émetteur dans les écrans LCD. Réduction de l'efficacité énergétique et de la qualité globale de l'image.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Nanocristaux inorganiques sans terres rares, matériaux pérovskites, nouveaux systèmes d'émission à base de matériaux hybrides.
 - Quel impact: Performances potentiellement comparables à long terme, mais avec des défis majeurs concernant la stabilité et la durée de vie dans les conditions d'utilisation réelles.

Délai d'implémentation: 0.80

- Alternative existante:
 - Substitution partielle possible dans un délai de 3-5 ans, mais avec des compromis significatifs sur les performances qui nécessiteraient une reconception des systèmes de rétroéclairage.
- Alternative théorique:
 - Développement et validation des technologies alternatives estimés à 7-10 ans avant adoption à grande échelle dans l'industrie des écrans.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Augmentation des coûts de 15-30% pour maintenir des performances acceptables avec des phosphores alternatifs moins efficaces, nécessitant des systèmes optiques plus complexes.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une trajectoire de coûts incertaine à long terme.

Sources

- [8] - Encyclo-ecolo.com. (n.d.).“Terres rares.”,

EcranMiniLED -> Aluminium - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Cuivre pour la dissipation thermique, matériaux composites, alliages spéciaux, nouveaux polymères conducteurs thermiques.
 - **Quel impact:** La gestion thermique est cruciale pour les écrans MiniLED qui génèrent plus de chaleur que les LCD traditionnels. Le cuivre offre une meilleure conductivité thermique mais avec un poids accru, problématique pour les grands écrans.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux à changement de phase, composites graphite-polymère, solutions de refroidissement intégrées.
 - **Quel impact:** Potentiel d'amélioration significative de la gestion thermique, permettant des écrans plus lumineux et plus efficaces énergétiquement, tout en préservant la légèreté.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Transition vers le cuivre ou des composites avancés estimée à 1-3 ans, incluant les phases d'adaptation des processus de fabrication.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des solutions thermiques avancées estimée à 3-5 ans avant adoption à grande échelle dans les écrans MiniLED.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Le cuivre représente une augmentation significative des coûts pour les grandes surfaces d'écran, tandis que les composites peuvent offrir un meilleur rapport performance/prix.
- **Alternative théorique:**
 - Les matériaux à changement de phase et autres solutions avancées impliquent des coûts initiaux plus élevés, potentiellement compensés par des améliorations d'efficacité énergétique à long terme.

Sources

EcranMiniLED -> Europium - Coefficient: 0.81

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Phosphores à base d'autres terres rares, points quantiques (quantum dots) pour conversion de couleur, composés organiques luminescents.
 - **Quel impact:** Diminution significative de la pureté des couleurs et de l'efficacité de conversion, particulièrement pour la composante rouge produite par leuropium dans les écrans MiniLED. Réduction du gamut colorimétrique et de la précision des couleurs.
- **Alternative théorique:**

- **Lesquelles:** Nanocristaux sans terres rares, matériaux pérovskites, nouveaux convertisseurs de lumière à base de matériaux hybrides.
- **Quel impact:** Performances potentiellement comparables à long terme, mais avec des défis majeurs concernant la stabilité thermique et la durée de vie sous forte luminosité, critique pour la technologie MiniLED qui opère à des densités de puissance élevées.

Délai d'implémentation: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Substitution partielle possible dans un délai de 3-5 ans, mais avec des compromis significatifs sur les performances qui nécessiteraient une reconception des systèmes de conversion de couleur.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des technologies alternatives estimés à 7-10 ans avant adoption à grande échelle dans l'industrie des écrans avancés.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Augmentation des coûts de 20-40% pour maintenir des performances acceptables avec des systèmes de conversion de couleur modifiés et des optiques plus complexes.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une trajectoire de coûts incertaine à long terme.

Sources

- [8] - Encyclo-ecolo.com. (n.d.).“Terres rares.”,

EcranMiniLED -> Gallium - Coefficient: 0.41

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Phosphure d'indium (InP) pour lasers, silicium cristallin pour photovoltaïque.
 - **Quel impact:** Rendement lumineux réduit de 40% pour LEDs, efficacité photovoltaïque limitée à 18-22% contre 25-28% pour CIGS.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Pérovskites hybrides, points quantiques InSb.
 - **Quel impact:** Potentiel théorique supérieur au GaAs mais durée de vie opérationnelle < 1000h dans les prototypes actuels.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Adoption progressive du silicium en 2-4 ans pour applications basse performance.
- **Alternative théorique:**
 - Horizon 5-8 ans pour solutions pérovskites stables (défis de scaling industriel).

Impact coût: 0.30

- **Alternative existante:**
 - Coûts réduits de 10-15% grâce au silicium mais perte de compétitivité technologique.
- **Alternative théorique:**
 - Coûts de fabrication initiaux 3x supérieurs, nécessitant des subventions publiques pour adoption.

Sources

- 1] - Green, M.A. (2020). “Photovoltaic technologies beyond the silicon era”, *Progress in Photovoltaics*.
- 2] - LED Professional (2023). “Global LED Materials Market Analysis”.

- 3] - Fraunhofer ISE (2024). “CIGS vs Perovskite Solar Cells Roadmap”.

EcranMiniLED -> Terbium - Coefficient: 0.81

Faisabilité technique: 0.90

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Phosphores à base d’autres terres rares, points quantiques (quantum dots) pour la conversion vers le vert, composés organiques luminescents.
 - Quel impact: Diminution significative de l’efficacité de conversion et de la pureté des couleurs, particulièrement pour la composante verte produite par le terbium dans les écrans MiniLED. Réduction de l’efficacité énergétique et du gamut colorimétrique.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Nanocristaux inorganiques sans terres rares, matériaux pérovskites verts, nouveaux convertisseurs de lumière à base de matériaux hybrides.
 - Quel impact: Performances potentiellement comparables à long terme, mais avec des défis majeurs concernant la stabilité thermique et la durée de vie sous haute luminosité caractéristique des écrans MiniLED.

Délai d’implémentation: 0.80

- Alternative existante:
 - Substitution partielle possible dans un délai de 3-5 ans, mais avec des compromis significatifs sur les performances qui nécessiteraient une reconception des systèmes de conversion de couleur et de rétroéclairage.
- Alternative théorique:
 - Développement et validation des technologies alternatives estimés à 7-10 ans avant adoption à grande échelle dans l’industrie des écrans avancés.

Impact coût: 0.70

- Alternative existante:
 - Augmentation des coûts de 20-40% pour maintenir des performances acceptables avec des matériaux de conversion moins efficaces et des systèmes optiques plus complexes.
- Alternative théorique:
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une trajectoire de coûts incertaine à long terme.

Sources

- [8] - Encyclo-ecolo.com. (n.d.).“Terres rares.”,

EcranMiniLED -> Yttrium - Coefficient: 0.74

Faisabilité technique: 0.80

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Autres terres rares comme leuropium, le terbium ou le gadolinium pour les phosphores de conversion de couleur, points quantiques (quantum dots) sans yttrium.
 - Quel impact: Diminution de l’efficacité lumineuse et altération de la pureté des couleurs, particulièrement dans la partie blanche du spectre où l’yttrium joue un rôle crucial dans les phosphores YAG:Ce (grenat d’yttrium-aluminium dopé au cérium).
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Nouveaux matériaux luminescents sans terres rares, nanocristaux pérovskites, matériaux d’émission à base de nanoparticules organiques-inorganiques.
 - Quel impact: Performances potentiellement comparables à long terme, mais avec des défis majeurs concernant la stabilité thermique et la durée de vie sous forte luminosité caractéristique des écrans MiniLED.

Délai d'implémentation: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des phosphores alternatifs estimée à 3-5 ans, nécessitant une reconfiguration des systèmes de rétroéclairage et des tests de validation chromatique rigoureux.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des technologies alternatives estimés à 6-8 ans avant adoption à grande échelle dans l'industrie des écrans avancés.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 20-40% à court terme selon [2] et [8], car même si "les mini-LED coûtent un prix similaire à celui des LED classiques", les systèmes de phosphores alternatifs sont plus complexes et moins efficaces, nécessitant des ajustements des chaînes de production.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, mais potentiel de réduction des coûts à long terme, comme indiqué dans [5] qui prévoit une "division des coûts de production par dix d'ici 2026" pour les technologies d'affichage avancées.

Sources

- [2] - Sostron. (n.d.)."Mini LED : un aperçu complet.",
- [5] - AVCesar. (n.d.)."Écrans Micro LED, division des coûts de production par dix d'ici 2026.",
- [8] - L'Éclaireur Fnac. (2021)."Mini-LED : zoom sur la technologie d'écran de l'année 2021.",

EcranOLED -> Aluminium - Coefficient: 0.40

Faisabilité technique: 0.40

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages de magnésium, polymères techniques renforcés, aciers inoxydables ultra-minces, matériaux composites.
 - **Quel impact:** Pour les écrans OLED, où la finesse est souvent primordiale, les alternatives doivent offrir une résistance mécanique élevée avec une épaisseur minimale. Le magnésium offre un bon compromis mais à un coût supérieur.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Composites avancés ultra-minces, structures sandwich avec noyau en mousse métallique, nouveaux polymères à haute résistance.
 - **Quel impact:** Potentiel de réduction significative de l'épaisseur tout en maintenant la rigidité structurelle nécessaire pour protéger les écrans OLED, qui sont particulièrement fragiles.

Délai d'implémentation: 0.30

- **Alternative existante:**
 - Adoption d'alternatives comme le magnésium ou les polymères renforcés possible dans un délai de 1-2 ans pour la plupart des fabricants.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des matériaux avancés estimés à 3-4 ans avant adoption industrielle dans les produits premium.

Impact coût: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Impact variable selon les alternatives : le magnésium est plus coûteux (20-30%), tandis que certains polymères techniques peuvent offrir des solutions économiques pour les segments d'entrée et milieu de gamme.
- **Alternative théorique:**

- Les matériaux composites avancés auraient initialement un coût plus élevé, partiellement compensé par des avantages en termes de durabilité et de performances.

Sources

EcranOLED -> Cerium - Coefficient: 0.64

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Matériaux organiques modifiés sans cérium, dopants alternatifs pour les couches d'interface, systèmes de filtres optiques sans terres rares.
 - **Quel impact:** Réduction des performances optiques, notamment en termes de pureté des couleurs et de stabilité des matériaux organiques. Diminution potentielle de la durée de vie des écrans OLED dans les conditions d'utilisation intensives.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Graphène comme alternative selon [4] et [11], “qui offre des performances identiques à un ITO-OLED” et peut-être utilisé à la place d'autres composants rares dans les écrans.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement comparables “tout en maintenant des performances acceptables” [11], le graphène offrant “d'excellentes propriétés électriques, thermiques et mécaniques, d'une transmittance optique élevée” [4].

Délai d'implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des matériaux alternatifs estimée à 2-4 ans, selon l'état actuel de la recherche sur les matériaux pour écrans.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des solutions à base de graphène et autres nanomatériaux estimée à 4-7 ans avant déploiement industriel. Comme l'indique [4], “un des enjeux qui demeurent, freinant le remplacement de ce matériau rare par le graphène, est la production à grande échelle de ce dernier”.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 15-30% avec les matériaux alternatifs actuels, due principalement à des processus de fabrication plus complexes.
- **Alternative théorique:**
 - Coûts initialement plus élevés pour les solutions à base de graphène car, comme mentionné dans [4], “paradoxalement, malgré sa rareté, l'indium reste donc pour le moment moins coûteux que le graphène”, mais potentiel de réduction à moyen terme avec l'industrialisation des procédés.

Sources

- [4] - Trust My Science. (n.d.).“Le graphène pourrait remplacer un matériau rare dans la confection des écrans tactiles.”,
- [11] - Services Mobiles. (n.d.) “Nouveau matériau conducteur et transparent pour nos écrans.”,

EcranOLED -> Gallium - Coefficient: 0.41

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Phosphure d'indium (InP) pour lasers, silicium cristallin pour photovoltaïque.
 - **Quel impact:** Rendement lumineux réduit de 40% pour LEDs, efficacité photovoltaïque limitée à 18-22% contre 25-28% pour CIGS.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Pérovskites hybrides, points quantiques InSb.

- **Quel impact:** Potentiel théorique supérieur au GaAs mais durée de vie opérationnelle < 1000h dans les prototypes actuels.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Adoption progressive du silicium en 2-4 ans pour applications basse performance.
- **Alternative théorique:**
 - Horizon 5-8 ans pour solutions pérovskites stables (défis de scaling industriel).

Impact coût: 0.30

- **Alternative existante:**
 - Coûts réduits de 10-15% grâce au silicium mais perte de compétitivité technologique.
- **Alternative théorique:**
 - Coûts de fabrication initiaux 3x supérieurs, nécessitant des subventions publiques pour adoption.

Sources

- 1] - Green, M.A. (2020). “Photovoltaic technologies beyond the silicon era”, *Progress in Photovoltaics*.
- 2] - LED Professional (2023). “Global LED Materials Market Analysis”.
- 3] - Fraunhofer ISE (2024). “CIGS vs Perovskite Solar Cells Roadmap”.

EcranOLED -> Yttrium - Coefficient: 0.70

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Autres terres rares comme le terbium ou le gadolinium, composés organiques luminescents modifiés, systèmes de conversion de couleur alternatifs.
 - **Quel impact:** Diminution de l'efficacité lumineuse et dégradation plus rapide des matériaux organiques émetteurs de lumière. Réduction des performances en termes de pureté des couleurs et de consommation énergétique.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Graphène ou autres nanomatériaux comme alternatives émergentes, tels que mentionnés dans [4] et [11] pour remplacer les matériaux rares dans les technologies d'affichage.
 - **Quel impact:** Le graphène offre “d'excellentes propriétés électriques, thermiques et mécaniques” [4] qui pourraient théoriquement maintenir des performances similaires tout en remplaçant certains matériaux critiques.

Délai d'implémentation: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des matériaux alternatifs estimée à 3-5 ans, incluant les phases d'adaptation des processus de fabrication et de validation de la fiabilité à long terme.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des technologies avancées comme celles à base de graphène estimés à 5-8 ans. Comme l'indique [4], “des difficultés” existent concernant “la production à grande échelle” du graphène.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Augmentation des coûts de 20-40% à court terme avec les matériaux alternatifs actuels, similaire à ce qu'on observe pour d'autres technologies d'affichage comme indiqué dans [8] pour les écrans Mini-LED.
- **Alternative théorique:**
 - Coûts initialement élevés pour les technologies émergentes, le graphène étant “moins coûteux que le graphène” [4], mais potentiel de réduction significative à long terme avec l'industrialisation des procédés, suivant la tendance générale des technologies d'affichage évoquée dans [5].

Sources

- [4] - Trust My Science. (n.d.). “Le graphène pourrait remplacer un matériau rare dans la confection des écrans tactiles.”,
- [5] - AVCesar. (n.d.). “Écrans Micro LED, division des coûts de production par dix d'ici 2026.”,
- [8] - L'Éclaireur Fnac. (2021). “Mini-LED : zoom sur la technologie d'écran de l'année 2021.”,
- [11] - Services Mobiles. (n.d.). “Nouveau matériau conducteur et transparent pour nos écrans.”,

EcranSpécifique -> Gallium - Coefficient: 0.41

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Phosphure d'indium (InP) pour lasers, silicium cristallin pour photovoltaïque.
 - **Quel impact:** Rendement lumineux réduit de 40% pour LEDs, efficacité photovoltaïque limitée à 18-22% contre 25-28% pour CIGS.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Pérovskites hybrides, points quantiques InSb.
 - **Quel impact:** Potentiel théorique supérieur au GaAs mais durée de vie opérationnelle < 1000h dans les prototypes actuels.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Adoption progressive du silicium en 2-4 ans pour applications basse performance.
- **Alternative théorique:**
 - Horizon 5-8 ans pour solutions pérovskites stables (défis de scaling industriel).

Impact coût: 0.30

- **Alternative existante:**
 - Coûts réduits de 10-15% grâce au silicium mais perte de compétitivité technologique.
- **Alternative théorique:**
 - Coûts de fabrication initiaux 3x supérieurs, nécessitant des subventions publiques pour adoption.

Sources

- 1] - Green, M.A. (2020). “Photovoltaic technologies beyond the silicon era”, *Progress in Photovoltaics*.
- 2] - LED Professional (2023). “Global LED Materials Market Analysis”.
- 3] - Fraunhofer ISE (2024). “CIGS vs Perovskite Solar Cells Roadmap”.

MemoireRAM -> Aluminium - Coefficient: 0.33

Faisabilité technique: 0.30

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Cuivre pour la dissipation thermique, polymères techniques pour les structures, alliages métalliques divers pour les contacts.
 - **Quel impact:** Le cuivre offre une meilleure dissipation thermique (environ 60% supérieure) mais avec un poids accru. Les polymères techniques peuvent remplacer l'aluminium pour les fonctions structurelles avec un impact minimal sur les performances.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux à changement de phase pour la gestion thermique, composites carbone-métal, nouvelles approches de refroidissement intégrées.
 - **Quel impact:** Potentiel d'amélioration significative de la gestion thermique, particulièrement importante pour les mémoires haute performance fonctionnant à des fréquences élevées.

Délai d'implémentation: 0.20

- **Alternative existante:**
 - Adoption immédiate possible, les alternatives comme le cuivre et les polymères techniques étant déjà utilisées dans certains modules de mémoire premium.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des solutions avancées de gestion thermique estimée à 2-4 ans avant intégration dans les produits grand public.

Impact coût: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Le cuivre est plus coûteux, mais peut être utilisé en quantités réduites grâce à sa meilleure efficacité thermique. Les polymères techniques offrent des options à coût comparable ou légèrement inférieur.
- **Alternative théorique:**
 - Les matériaux à changement de phase et les composites avancés auraient un coût initial plus élevé, partiellement compensé par des améliorations de performance et de durabilité.

Sources

MémoireRAM -> Hafnium - Coefficient: 0.80

Faisabilité technique: 0.80

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Diélectriques à base de zirconium, oxydes d'aluminium (Al_2O_3), silice (SiO_2) avec épaisseur accrue, oxydes de terres rares pour certaines applications.
 - **Quel impact:** Réduction significative de la densité de stockage et augmentation des courants de fuite. Le hafnium est particulièrement crucial dans les technologies de mémoire avancées pour sa haute constante diélectrique et sa compatibilité avec les procédés de fabrication existants.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouveaux matériaux diélectriques nanostructurés, architectures de mémoire alternatives comme les mémoires résistives ou magnétiques.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir ou d'améliorer les performances avec des approches radicalement différentes, mais avec des défis majeurs concernant l'industrialisation et la fiabilité à long terme.

Délai d'implémentation: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des diélectriques alternatifs estimée à 4-6 ans, avec des compromis significatifs sur les performances qui nécessiteraient une reconception des cellules mémoire.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des technologies mémoire avancées estimés à 7-10 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 20-40% pour maintenir des performances acceptables avec des matériaux moins efficaces, nécessitant des ajustements majeurs des procédés de fabrication.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies mémoire, avec une trajectoire de réduction des coûts incertaine à moyen terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

MemoireRAM -> Silicium - Coefficient: 0.90

Faisabilité technique: 0.90

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Matériaux III-V pour certaines applications spécifiques, germanium pour améliorer certaines performances, substrats alternatifs comme le verre ou les polymères pour des applications de niche.
 - Quel impact: Augmentation significative des coûts et complexification des procédés de fabrication. Limitations majeures en termes d'intégration à grande échelle et de compatibilité avec les infrastructures existantes de production de mémoires.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Technologies mémoire alternatives ne nécessitant pas de silicium comme substrat, mémoires organiques ou moléculaires, approches de stockage de données non conventionnelles.
 - Quel impact: Performances potentiellement différentes ouvrant de nouvelles possibilités d'application, mais avec des défis fondamentaux concernant la densité de stockage, la vitesse, l'endurance et la rétention des données.

Délai d'implémentation: 0.90

- Alternative existante:
 - Adoption limitée d'alternatives pour des applications spécifiques possible dans un délai de 3-5 ans, mais remplacement complet du silicium comme substrat de base non envisageable à court ou moyen terme.
- Alternative théorique:
 - Développement et commercialisation des technologies mémoire radicalement nouvelles estimés à 10-15 ans avant qu'elles puissent potentiellement concurrencer les technologies basées sur le silicium à grande échelle.

Impact coût: 0.90

- Alternative existante:
 - Augmentation drastique des coûts (3-10x) avec les matériaux alternatifs actuels, rendant ces solutions économiquement viables uniquement pour des applications à très haute valeur ajoutée.
- Alternative théorique:
 - Investissements colossaux nécessaires pour développer des chaînes de production complètes basées sur de nouvelles approches, avec une incertitude significative sur la viabilité économique à long terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

MemoireRAM -> Tantale - Coefficient: 0.71

Faisabilité technique: 0.80

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Condensateurs céramiques multicouches (MLCC), condensateurs aluminium polymère, condensateurs au niobium comme alternatives aux condensateurs au tantale utilisés dans les mémoires RAM.
 - Quel impact: Réduction significative de la densité capacitive par unité de volume, compromettant la miniaturisation et la performance des mémoires. Les alternatives ont généralement des performances électriques inférieures en termes de stabilité et de fiabilité.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Nouvelles architectures de mémoire utilisant moins ou pas de condensateurs, technologies de condensateurs à base de nanomatériaux.
 - Quel impact: Potentiel d'atteindre des performances comparables mais avec des défis majeurs concernant l'intégration dans les architectures existantes et la compatibilité avec les processus de fabrication actuels.

Délai d'implémentation: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Substitution partielle possible dans un délai de 2-4 ans, mais nécessitant des compromis importants sur les performances ou l'encombrement.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des nouvelles technologies estimés à 5-8 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Les condensateurs céramiques sont généralement moins coûteux que ceux au tantalum, mais nécessitent d'être utilisés en plus grand nombre ou en taille plus importante pour des performances équivalentes, limitant les économies réelles.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux élevés en R&D, partiellement compensés à long terme si les nouvelles technologies atteignent l'échelle de production industrielle.

Sources

- [1] - ADEME. (2017). "L'épuisement des métaux et minéraux: faut-il s'inquiéter?",

ProcedeEUV -> Hafnium - Coefficient: 0.90

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages de zirconium modifiés, revêtements multicouches alternatifs pour les optiques EUV, matériaux composites spécialisés.
 - **Quel impact:** Réduction significative de la résistance aux températures extrêmes et de la durabilité sous exposition intensive aux rayonnements EUV. Compromis importants sur la précision de gravure et la fiabilité du processus de lithographie.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouveaux matériaux céramiques avancés, nanocomposites à haute résistance aux rayonnements, technologies de lithographie alternatives (au-delà de l'EUV).
 - **Quel impact:** Performances potentiellement acceptables mais avec des défis majeurs concernant l'intégration dans les chaînes de production existantes et la capacité à atteindre les nœuds technologiques avancés.

Délai d'implémentation: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des matériaux alternatifs estimée à 5-8 ans, incluant les phases de R&D, qualification et certification pour les processus de fabrication de semi-conducteurs.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des technologies avancées estimés à 8-12 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 30-50% pour maintenir des performances acceptables avec des matériaux moins efficaces, nécessitant des ajustements majeurs des équipements et procédés.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une incertitude significative sur la rentabilité à long terme.

Sources

- [1] - ADEME. (2017). "L'épuisement des métaux et minéraux: faut-il s'inquiéter?",

Processeur ARM -> Aluminium - Coefficient: 0.47

Faisabilité technique: 0.50

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Cuivre pour la dissipation thermique, polymères techniques pour le packaging, alliages spéciaux pour certaines applications.
 - Quel impact: Pour les processeurs ARM, souvent utilisés dans des appareils mobiles, le compromis poids/performance thermique est crucial. Le cuivre offre de meilleures performances thermiques mais augmente le poids et peut compliquer la conception des appareils ultra-portables.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Matériaux composites légers à haute conductivité, solutions de gestion thermique intégrées, nouveaux polymères conducteurs thermiques.
 - Quel impact: Potentiel d'optimiser le rapport performance/poids, particulièrement important pour les appareils mobiles et l'informatique embarquée où les processeurs ARM sont prédominants.

Délai d'implémentation: 0.40

- Alternative existante:
 - Transition vers des matériaux alternatifs possible dans un délai de 1-3 ans, avec des défis spécifiques liés aux contraintes des appareils mobiles.
- Alternative théorique:
 - Développement et validation des solutions avancées estimés à 3-5 ans avant adoption industrielle dans les appareils grand public.

Impact coût: 0.50

- Alternative existante:
 - Impact variable selon les alternatives : le cuivre est plus coûteux mais peut être utilisé en quantités réduites, les polymères techniques peuvent offrir des solutions à coût comparable pour certaines applications.
- Alternative théorique:
 - Les matériaux composites avancés auraient un coût initial plus élevé, potentiellement compensé par des avantages en termes d'efficacité énergétique et de durabilité.

Sources

Processeur ARM -> Antimoine - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou le phosphore, ajustements des procédés de dopage pour optimiser les caractéristiques électriques.
 - Quel impact: Modification des propriétés électriques des transistors logiques, particulièrement en termes de mobilité des porteurs et de stabilité thermique, potentiellement critique pour les nœuds technologiques avancés.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Nouvelles structures de transistors nécessitant moins de dopage, architectures de semiconducteurs avancées.
 - Quel impact: Potentiel de maintenir des performances logiques acceptables avec des approches innovantes, mais avec des défis concernant l'intégration dans les procédés de fabrication existants.

Délai d'implémentation: 0.50

- Alternative existante:

- Transition vers des profils de dopage alternatifs possible dans un délai de 2-4 ans, incluant les phases de qualification et de validation pour les applications logiques critiques.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et industrialisation des approches alternatives estimés à 4-7 ans avant adoption à grande échelle dans la production de wafers logiques.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 10-20% avec les dopants alternatifs, principalement due à des besoins accrus en optimisation des procédés et en contrôle de qualité.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux significatifs pour développer de nouvelles approches, avec une incertitude sur l'impact à long terme sur les coûts de production des wafers logiques.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

Processeur ARM -> Germanium - Coefficient: 0.64

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Silicium pur avec optimisations de procédés, silicium constraint pour améliorer la mobilité des porteurs, silicium sur isolant (SOI).
 - **Quel impact:** Réduction des performances en termes de vitesse et d'efficacité énergétique. Le germanium, utilisé dans les alliages SiGe, améliore significativement la mobilité des porteurs dans les transistors logiques avancés.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux III-V intégrés sur silicium, structures à canaux multiples, transistors à effet de champ basés sur de nouveaux matériaux.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir ou d'améliorer les performances par rapport aux technologies actuelles, mais avec des défis majeurs concernant l'intégration dans les procédés de fabrication standard.

Délai d'implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des solutions à base de silicium optimisé possible dans un délai de 2-4 ans, mais avec des compromis significatifs sur les performances qui pourraient ralentir la progression de la loi de Moore.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et industrialisation des approches avancées estimés à 5-8 ans avant adoption dans la production de masse.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Impact variable selon l'alternative : potentielle réduction des coûts matériaux mais compensée par la nécessité d'optimisations plus poussées des procédés.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec un potentiel de réduction à long terme si l'échelle de production permet des économies.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

ProcesseurARM -> Hafnium - Coefficient: 0.80

Faisabilité technique: 0.80

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Diélectriques à base de zirconium, diélectriques aluminium-oxyde (Al_2O_3), matériaux composites pour les transistors à grille haute-k.
 - **Quel impact:** Diminution des performances des transistors, notamment en termes de courants de fuite et d'efficacité énergétique. Limitation des capacités de miniaturisation pour les nœuds technologiques avancés.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouveaux matériaux diélectriques nanostructurés, technologies de semi-conducteurs 2D, architectures de transistors alternatives.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances comparables à long terme, mais avec des défis significatifs concernant l'industrialisation et l'intégration dans les architectures de processeurs existantes.

Délai d'implémentation: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des matériaux alternatifs estimée à 4-6 ans, incluant les phases de qualification et de certification pour les processeurs commerciaux.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des technologies avancées estimés à 7-10 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 20-40% pour maintenir des performances acceptables avec des matériaux moins efficaces, nécessitant des ajustements majeurs des processus de fabrication.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une incertitude significative sur la rentabilité à long terme.

Sources

- [1] - ADEME. (2017). "L'épuisement des métaux et minéraux: faut-il s'inquiéter?",

ProcesseurARM -> Hafnium - Coefficient: 0.81

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Diélectriques à base de zirconium, oxydes d'aluminium (Al_2O_3), silice (SiO_2) avec épaisseur accrue.
 - **Quel impact:** Réduction significative des performances des transistors en termes de courants de fuite et d'efficacité énergétique. Limitation des capacités de miniaturisation pour les nœuds technologiques avancés.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouveaux matériaux diélectriques nanostructurés, diélectriques à haute permittivité alternatifs, architectures de transistors innovantes.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances acceptables, mais avec des défis significatifs concernant l'industrialisation et l'intégration dans les architectures de processeurs existantes.

Délai d'implémentation: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des diélectriques alternatifs estimée à 4-6 ans, avec des compromis significatifs sur les performances qui nécessiteraient une reconception des architectures de transistors.

- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des technologies avancées estimés à 7-10 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 15-30% pour maintenir des performances acceptables avec des matériaux moins efficaces, nécessitant des ajustements majeurs des procédés de fabrication.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une trajectoire de réduction des coûts incertaine à moyen terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). “M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

ProcesseurARM -> Or - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Revêtements en argent, palladium, cuivre avec traitements spéciaux, alliages nickel-or en couche mince pour les interconnexions.
 - **Quel impact:** Légère réduction de la fiabilité des connexions et de la résistance à la corrosion. Augmentation potentielle de la résistance électrique, affectant les performances à haute fréquence.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux à base de carbone comme le graphène mentionné dans [4] pour d'autres applications électroniques, nanostructures conductrices avancées.
 - **Quel impact:** Performances théoriquement comparables voire supérieures avec le graphène qui offre “d'excellentes propriétés électriques” [4], mais défis d'intégration dans les processus de fabrication existants.

Délai d'implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des alliages alternatifs possible dans un délai de 2-3 ans pour la plupart des applications, certaines alternatives étant déjà utilisées dans d'autres composants électroniques.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des matériaux avancés à base de carbone estimés à 4-7 ans avant commercialisation à grande échelle, considérant les défis de “production à grande échelle” du graphène mentionnés dans [4].

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Réduction potentielle des coûts de 10-30% avec les alternatives métalliques, partiellement compensée par des besoins accrus en maintenance et des cycles de vie potentiellement plus courts.
- **Alternative théorique:**
 - Coûts initialement plus élevés pour les technologies émergentes, notamment le graphène qui reste “plus coûteux que l'indium” [4] malgré son abondance, mais potentiel de réduction significative à long terme.

Sources

- [4] - Trust My Science. (n.d.). “Le graphène pourrait remplacer un matériau rare dans la confection des écrans tactiles.”,

ProcesseurARM -> Palladium - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages palladium-étain similaires à ceux mentionnés dans [2] pour d'autres applications, revêtements en or en couche mince, nickel-or, rhodium pour certaines applications.
 - **Quel impact:** Maintien des performances en termes de résistance à la corrosion et de durabilité pour les contacts électriques, avec les alliages palladium-étain qui offrent généralement "les mêmes propriétés positives que le palladium pur".
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux composites avancés, revêtements céramiques conducteurs, technologies de connectique sans contact (inductive, capacitive).
 - **Quel impact:** Potentiel de réduire significativement l'utilisation de métaux précieux tout en maintenant les fonctionnalités requises pour les applications de microprocesseurs avancés.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Adoption des alternatives à base d'alliages possible dans un délai de 1-3 ans, certaines étant déjà utilisées dans d'autres applications électroniques.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des technologies avancées estimée à 3-5 ans, avec des défis d'intégration dans les chaînes de production existantes.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Réduction potentielle des coûts avec les alliages modifiés, similaire aux alliages palladium-étain qui offrent les mêmes propriétés "à un coût bien inférieur" dans d'autres applications.
- **Alternative théorique:**
 - Potentiel de réduction significative des coûts à moyen terme grâce à l'utilisation de matériaux plus abondants, mais nécessitant des investissements initiaux en R&D.

Sources

- [2] - IWG Plating. (2024). "Palladium alternative: Palladium-tin electrolyte: Pallega® blend Sn."

ProcesseurARM -> Phosphore - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou l'antimoine, ajustements des procédés de dopage pour optimiser l'utilisation du phosphore.
 - **Quel impact:** Modification modérée des caractéristiques électriques des transistors logiques, notamment en termes de niveaux de dopage et de profils de diffusion, avec un impact potentiel sur les performances des dispositifs.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouvelles approches de dopage utilisant des composés moléculaires, techniques de dopage sélectif avancées.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir ou d'améliorer les performances tout en réduisant la dépendance au phosphore élémentaire.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Substitution par d'autres dopants possible dans un délai de 1-3 ans, les techniques de dopage alternatives étant déjà en développement dans l'industrie des semi-conducteurs.

- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des nouvelles approches de dopage estimés à 3-5 ans avant adoption industrielle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Augmentation limitée des coûts (5-15%) pour les dopants alternatifs, principalement due à des ajustements de procédés.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux modérés pour les nouvelles techniques de dopage, avec un potentiel de réduction des coûts à moyen terme grâce à l'amélioration de l'efficacité des procédés.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

ProcesseurARM -> Scandium - Coefficient: 0.70

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages d'aluminium sans scandium, composites renforcés avec d'autres éléments comme le zirconium ou le titane, matériaux à base de magnésium pour les applications nécessitant légèreté et résistance.
 - **Quel impact:** Réduction des performances mécaniques, notamment en termes de résistance à haute température et de conductivité thermique. Diminution de la durabilité dans les conditions d'utilisation intensives des processeurs.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nanocomposites avancés, matériaux céramiques conducteurs, matériaux à gradient de propriétés.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances acceptables pour certaines applications spécifiques, mais avec des défis concernant l'intégration dans les processus de fabrication actuels.

Délai d'implémentation: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des alliages alternatifs estimée à 3-5 ans, incluant les phases de qualification et de validation pour les applications de microprocesseurs.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des matériaux avancés estimés à 5-8 ans avant adoption à grande échelle dans l'industrie des semi-conducteurs.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Impact coût variable selon l'alternative : augmentation potentielle pour maintenir des performances acceptables avec des matériaux moins efficaces, mais possibilité d'économies à long terme grâce à l'utilisation de matériaux plus abondants.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux importants en R&D, avec un potentiel de réduction des coûts à long terme si les nouvelles technologies atteignent l'échelle de production industrielle.

Sources

- [1] - ADEME. (2017). "L'épuisement des métaux et minéraux: faut-il s'inquiéter?",

ProcesseurARM -> Silicium - Coefficient: 0.90

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Matériaux III-V comme l'arséniure de gallium (GaAs) ou le phosphore d'indium (InP) pour certaines applications spécifiques, germanium pour les applications nécessitant une haute mobilité des porteurs.
 - **Quel impact:** Augmentation significative des coûts et complexification des procédés de fabrication. Limitations majeures en termes d'intégration à grande échelle et de compatibilité avec les infrastructures existantes.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux bidimensionnels comme le graphène, technologies basées sur les nanotubes de carbone, approches hybrides combinant différents matériaux.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement supérieures pour des applications spécifiques, mais avec des défis fondamentaux concernant la fabrication à grande échelle et l'intégration dans les architectures logiques existantes.

Délai d'implémentation: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Adoption limitée d'alternatives pour des applications de niche possible dans un délai de 3-5 ans, mais remplacement complet du silicium non envisageable à court ou moyen terme.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des technologies alternatives estimés à 10-15 ans avant qu'elles puissent potentiellement concurrencer le silicium dans la production de masse des wafers logiques.

Impact coût: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Augmentation drastique des coûts (3-10x) avec les matériaux alternatifs actuels, rendant ces solutions économiquement viables uniquement pour des applications à très haute valeur ajoutée.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements colossaux nécessaires pour développer des chaînes de production complètes basées sur de nouveaux matériaux, avec une incertitude significative sur la viabilité économique à long terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

ProcesseurARM -> Tungstene - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Comme indiqué dans [1], alternatives au tungstène incluant des "alliages de molybdène, de titane, carbures cémentés alternatifs sans tungstène" et autres matériaux composites.
 - **Quel impact:** Diminution de la résistance à haute température et aux contraintes mécaniques. Réduction de la durabilité dans les conditions d'utilisation intensives des processeurs.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux composites à matrice métallique, céramiques conductrices avancées, matériaux nanostructurés.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances acceptables pour certaines applications spécifiques, mais avec des défis concernant l'industrialisation et la stabilité à long terme.

Délai d'implémentation: 0.50

- **Alternative existante:**

- Transition vers des matériaux alternatifs possible dans un délai de 2-4 ans, incluant les phases de qualification et de validation pour les applications de microprocesseurs.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des matériaux avancés estimés à 4-6 ans avant adoption à grande échelle dans l'industrie des semi-conducteurs.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Impact coût variable selon l'alternative : les carbures cémentés alternatifs peuvent être plus coûteux, tandis que certains alliages de titane pourraient offrir un rapport coût-performance acceptable à moyen terme.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux importants en R&D, avec une incertitude significative sur la rentabilité à long terme des nouvelles technologies.

Sources

- [1] - Kindle-Tech. (2024). “Par Quoi Remplacer Le Carbure De Tungstène ? Explorez Les alternatives.”,

ProcesseurASIC -> Aluminium - Coefficient: 0.47

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Cuivre pour la dissipation thermique, alliages spéciaux, matériaux composites pour certaines applications.
 - **Quel impact:** Les ASIC peuvent avoir des profils thermiques très spécifiques selon leur application. Le cuivre offre une meilleure dissipation thermique mais peut être surdimensionné pour certaines applications à faible génération de chaleur.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Solutions de refroidissement personnalisées selon les points chauds spécifiques des ASIC, matériaux à conductivité thermique variable, nouvelles approches de gestion thermique.
 - **Quel impact:** Potentiel d'optimisation fine des performances thermiques en fonction des besoins spécifiques de chaque design ASIC, particulièrement important pour les applications cryptographiques ou d'IA.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des alternatives comme le cuivre possible dans un délai de 1-3 ans, selon le type d'application et les contraintes thermiques.
- **Alternative théorique:**
 - Développement de solutions sur mesure estimé à 3-5 ans, incluant les phases de conception et de validation pour les différents types d'ASIC.

Impact coût: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Le cuivre représente une augmentation de coût, mais son impact reste limité sur le coût total des ASIC haut de gamme (comme ceux utilisés pour le minage de cryptomonnaies ou l'IA).
- **Alternative théorique:**
 - Les solutions thermiques personnalisées auraient un coût de développement initial élevé, potentiellement amorti sur les volumes de production pour les ASIC spécifiques.

Sources

ProcesseurASIC -> Antimoine - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou le phosphore, ajustements des procédés de dopage pour optimiser les caractéristiques électriques.
 - Quel impact: Modification des propriétés électriques des transistors logiques, particulièrement en termes de mobilité des porteurs et de stabilité thermique, potentiellement critique pour les nœuds technologiques avancés.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Nouvelles structures de transistors nécessitant moins de dopage, architectures de semiconducteurs avancées.
 - Quel impact: Potentiel de maintenir des performances logiques acceptables avec des approches innovantes, mais avec des défis concernant l'intégration dans les procédés de fabrication existants.

Délai d'implémentation: 0.50

- Alternative existante:
 - Transition vers des profils de dopage alternatifs possible dans un délai de 2-4 ans, incluant les phases de qualification et de validation pour les applications logiques critiques.
- Alternative théorique:
 - Développement et industrialisation des approches alternatives estimés à 4-7 ans avant adoption à grande échelle dans la production de wafers logiques.

Impact coût: 0.70

- Alternative existante:
 - Augmentation potentielle des coûts de 10-20% avec les dopants alternatifs, principalement due à des besoins accrus en optimisation des procédés et en contrôle de qualité.
- Alternative théorique:
 - Investissements initiaux significatifs pour développer de nouvelles approches, avec une incertitude sur l'impact à long terme sur les coûts de production des wafers logiques.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

ProcesseurASIC -> Germanium - Coefficient: 0.64

Faisabilité technique: 0.70

- Alternative existante:
 - Lesquelles: Silicium pur avec optimisations de procédés, silicium contraint pour améliorer la mobilité des porteurs, silicium sur isolant (SOI).
 - Quel impact: Réduction des performances en termes de vitesse et d'efficacité énergétique. Le germanium, utilisé dans les alliages SiGe, améliore significativement la mobilité des porteurs dans les transistors logiques avancés.
- Alternative théorique:
 - Lesquelles: Matériaux III-V intégrés sur silicium, structures à canaux multiples, transistors à effet de champ basés sur de nouveaux matériaux.
 - Quel impact: Potentiel de maintenir ou d'améliorer les performances par rapport aux technologies actuelles, mais avec des défis majeurs concernant l'intégration dans les procédés de fabrication standard.

Délai d'implémentation: 0.60

- Alternative existante:

- Transition vers des solutions à base de silicium optimisé possible dans un délai de 2-4 ans, mais avec des compromis significatifs sur les performances qui pourraient ralentir la progression de la loi de Moore.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et industrialisation des approches avancées estimés à 5-8 ans avant adoption dans la production de masse.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Impact variable selon l'alternative : potentielle réduction des coûts matériaux mais compensée par la nécessité d'optimisations plus poussées des procédés.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec un potentiel de réduction à long terme si l'échelle de production permet des économies.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

ProcesseurASIC -> Hafnium - Coefficient: 0.81

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Diélectriques à base de zirconium, oxydes d'aluminium (Al_2O_3), silice (SiO_2) avec épaisseur accrue.
 - **Quel impact:** Réduction significative des performances des transistors en termes de courants de fuite et d'efficacité énergétique. Limitation des capacités de miniaturisation pour les noeuds technologiques avancés.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouveaux matériaux diélectriques nanostructurés, diélectriques à haute permittivité alternatifs, architectures de transistors innovantes.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances acceptables, mais avec des défis significatifs concernant l'industrialisation et l'intégration dans les architectures de processeurs existantes.

Délai d'implémentation: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des diélectriques alternatifs estimée à 4-6 ans, avec des compromis significatifs sur les performances qui nécessiteraient une reconception des architectures de transistors.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des technologies avancées estimés à 7-10 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 15-30% pour maintenir des performances acceptables avec des matériaux moins efficaces, nécessitant des ajustements majeurs des procédés de fabrication.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une trajectoire de réduction des coûts incertaine à moyen terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

ProcesseurASIC -> Hafnium - Coefficient: 0.84

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Diélectriques à base de zirconium, oxyde d'aluminium (Al_2O_3), silice (SiO_2) traditionnelle avec épaisseur accrue.
 - **Quel impact:** Comme indiqué dans [5], les alternatives comme SiO_2 présentent une constante diélectrique k bien plus faible (3,9 contre 9-25 pour les oxydes d'hafnium), ce qui nécessite des couches plus épaisses et limite la miniaturisation. Réduction significative des performances, notamment en termes de fuites de courant pour les technologies avancées.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouveaux matériaux diélectriques nanostructurés, technologies de semi-conducteurs 2D.
 - **Quel impact:** Selon [2], la découverte récente de l'utilisation de l'oxyde de hafnium pour les mémoires FRAM indique que les alternatives étaient jusqu'à présent "pas aussi performantes que le hafnium", soulignant sa criticité pour les applications haute performance.

Délai d'implémentation: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des diélectriques alternatifs estimée à 4-6 ans, avec des compromis significatifs sur les performances qui nécessiteraient une reconception des architectures de processeurs ASIC.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des technologies avancées estimés à 7-10 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 20-40% pour maintenir des performances acceptables avec des matériaux moins efficaces ou des architectures plus complexes.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une incertitude significative sur la rentabilité à long terme.

Sources

- [2] - Lemagit. (n.d.)."Mémoires non volatiles (2/2) : Les successeurs potentiels de la mémoire Flash.",
- [5] - France-Science. (n.d.)."Sciences Physiques.",

ProcesseurASIC -> Or - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Métaux conducteurs alternatifs comme l'aluminium mentionné dans [4], revêtements en argent, palladium ou alliages nickel-or en couche mince pour les interconnexions.
 - **Quel impact:** Augmentation de la résistance électrique et diminution de la conductivité thermique. Réduction de la résistance à la corrosion et aux migrations d'électrons, cruciales pour la fiabilité à long terme des processeurs spécialisés.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux à base de carbone comme le graphène, nanostructures conductrices avancées.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement comparables voire supérieures en termes de conductivité, mais avec des défis majeurs concernant l'intégration dans les procédés de fabrication actuels.

Délai d'implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**

- Transition vers des métaux alternatifs possible dans un délai de 2-3 ans pour certaines applications, mais avec des compromis sur la fiabilité à long terme.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des matériaux avancés à base de carbone estimée à 4-7 ans avant adoption industrielle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Réduction potentielle des coûts avec l'utilisation de métaux plus abondants comme l'aluminium mentionné dans [4], partiellement compensée par des besoins accrus en maintenance et une durée de vie potentiellement réduite.
- **Alternative théorique:**
 - Coûts initiaux élevés pour le développement et l'industrialisation des nouvelles technologies, avec un potentiel de réduction à moyen terme.

Sources

- [3] - Theses.fr. (2011).“Fiabilité des technologies CMOS fortement sub-microniques.”,
- 4] - PROMES CNRS. (n.d.).https://www.promes.cnrs.fr/wp-content/uploads/2021/03/rapport_Promes_2010_2012.pdf

ProcesseurASIC -> Phosphore - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou l'antimoine, ajustements des procédés de dopage pour optimiser l'utilisation du phosphore.
 - **Quel impact:** Modification modérée des caractéristiques électriques des transistors logiques, notamment en termes de niveaux de dopage et de profils de diffusion, avec un impact potentiel sur les performances des dispositifs.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouvelles approches de dopage utilisant des composés moléculaires, techniques de dopage sélectif avancées.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir ou d'améliorer les performances tout en réduisant la dépendance au phosphore élémentaire.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Substitution par d'autres dopants possible dans un délai de 1-3 ans, les techniques de dopage alternatives étant déjà en développement dans l'industrie des semi-conducteurs.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des nouvelles approches de dopage estimés à 3-5 ans avant adoption industrielle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Augmentation limitée des coûts (5-15%) pour les dopants alternatifs, principalement due à des ajustements de procédés.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux modérés pour les nouvelles techniques de dopage, avec un potentiel de réduction des coûts à moyen terme grâce à l'amélioration de l'efficacité des procédés.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

ProcesseurASIC -> Scandium - Coefficient: 0.70

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages d'aluminium sans scandium comme suggéré dans [4] qui mentionne "le recyclage de métaux conducteurs comme l'aluminium", composites renforcés avec d'autres éléments comme le titane.
 - **Quel impact:** Réduction des performances en termes de résistance à haute température et de conductivité thermique, particulièrement critiques pour les ASIC qui fonctionnent souvent à des charges et températures élevées.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nanocomposites avancés, matériaux céramiques conducteurs.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances acceptables pour certaines applications spécifiques, mais avec des défis concernant l'intégration dans les processus de fabrication actuels.

Délai d'implémentation: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des alliages alternatifs estimée à 3-5 ans, incluant les phases de qualification et de validation pour les applications de microprocesseurs spécialisés.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des matériaux avancés estimés à 5-8 ans avant adoption à grande échelle dans l'industrie des semi-conducteurs.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Impact coût variable selon l'alternative, avec possibilité d'économies à long terme grâce à l'utilisation de matériaux plus abondants comme l'aluminium mentionné dans [4].
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux importants en R&D, avec un potentiel de réduction des coûts à long terme si les nouvelles technologies atteignent l'échelle de production industrielle.

Sources

- [3] - Theses.fr. (2011).“Fiabilité des technologies CMOS fortement sub-microniques.”,
- 4] - PROMES CNRS. (n.d.).https://www.promes.cnrs.fr/wp-content/uploads/2021/03/rapport_Promes_2010_2012.pdf

ProcesseurASIC -> Silicium - Coefficient: 0.90

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Matériaux III-V comme l'arsénure de gallium (GaAs) ou le phosphure d'indium (InP) pour certaines applications spécifiques, germanium pour les applications nécessitant une haute mobilité des porteurs.
 - **Quel impact:** Augmentation significative des coûts et complexification des procédés de fabrication. Limitations majeures en termes d'intégration à grande échelle et de compatibilité avec les infrastructures existantes.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux bidimensionnels comme le graphène, technologies basées sur les nanotubes de carbone, approches hybrides combinant différents matériaux.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement supérieures pour des applications spécifiques, mais avec des défis fondamentaux concernant la fabrication à grande échelle et l'intégration dans les architectures logiques existantes.

Délai d'implémentation: 0.90

- **Alternative existante:**

- Adoption limitée d'alternatives pour des applications de niche possible dans un délai de 3-5 ans, mais remplacement complet du silicium non envisageable à court ou moyen terme.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des technologies alternatives estimés à 10-15 ans avant qu'elles puissent potentiellement concurrencer le silicium dans la production de masse des wafers logiques.

Impact coût: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Augmentation drastique des coûts (3-10x) avec les matériaux alternatifs actuels, rendant ces solutions économiquement viables uniquement pour des applications à très haute valeur ajoutée.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements colossaux nécessaires pour développer des chaînes de production complètes basées sur de nouveaux matériaux, avec une incertitude significative sur la viabilité économique à long terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

ProcesseurASIC -> Tungstene - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages de molybdène, métaux alternatifs comme le titane, certains alliages à base d'aluminium comme suggéré dans [4].
 - **Quel impact:** Diminution de la résistance à haute température et aux contraintes mécaniques, cruciales pour les ASIC qui génèrent beaucoup de chaleur. Selon [3], l'échauffement “par effet joule” est une problématique critique pour les technologies fortement submicroniques.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux composites à matrice métallique, céramiques conductrices avancées.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances acceptables pour certaines applications spécifiques, mais avec des défis concernant l'industrialisation et la résistance aux températures élevées.

Délai d'implémentation: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des matériaux alternatifs possible dans un délai de 2-4 ans, incluant les phases de qualification et de validation pour les applications de microprocesseurs.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des matériaux avancés estimés à 4-6 ans avant adoption à grande échelle dans l'industrie des semi-conducteurs.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Impact coût variable selon l'alternative : certains matériaux comme l'aluminium mentionné dans [4] pourraient offrir des économies, mais nécessiteraient des processus de fabrication adaptés.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux importants en R&D, avec une incertitude significative sur la rentabilité à long terme des nouvelles technologies.

Sources

- [3] - Theses.fr. (2011).“Fiabilité des technologies CMOS fortement sub-microniques.”,
- 4] - PROMES CNRS. (n.d.).https://www.promes.cnrs.fr/wp-content/uploads/2021/03/rapport_Promes_2010_2012.pdf

Processeur X86 -> Aluminium - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Cuivre pour les spreaders thermiques, alliages spéciaux, matériaux composites, polymères techniques pour certains éléments structurels.
 - **Quel impact:** Le cuivre offre une conductivité thermique supérieure (environ 60% meilleure), critique pour les processeurs haute performance qui génèrent beaucoup de chaleur. Cependant, l'augmentation du poids peut être problématique pour certaines applications mobiles.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux à base de diamant artificiel, solutions de refroidissement intégrées, nouveaux composites à haute conductivité thermique.
 - **Quel impact:** Potentiel de gestion thermique nettement améliorée, permettant des performances supérieures ou une meilleure efficacité énergétique des processeurs haute performance.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Transition vers le cuivre déjà en cours pour de nombreux processeurs haut de gamme, pouvant être étendue à d'autres segments dans un délai de 1-2 ans.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et qualification des solutions avancées estimés à 3-5 ans avant adoption à grande échelle dans l'industrie des semi-conducteurs.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Le cuivre est significativement plus coûteux (2-3x), mais son impact sur le coût global du processeur reste limité étant donné la valeur élevée des composants électroniques internes.
- **Alternative théorique:**
 - Les matériaux avancés comme le diamant artificiel représenteraient une augmentation de coût notable, mais potentiellement justifiée par les améliorations de performance pour les segments haut de gamme.

Sources

Processeur X86 -> Antimoine - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou le phosphore, ajustements des procédés de dopage pour optimiser les caractéristiques électriques.
 - **Quel impact:** Modification des propriétés électriques des transistors logiques, particulièrement en termes de mobilité des porteurs et de stabilité thermique, potentiellement critique pour les nœuds technologiques avancés.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouvelles structures de transistors nécessitant moins de dopage, architectures de semiconducteurs avancées.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances logiques acceptables avec des approches innovantes, mais avec des défis concernant l'intégration dans les procédés de fabrication existants.

Délai d'implémentation: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des profils de dopage alternatifs possible dans un délai de 2-4 ans, incluant les phases de qualification et de validation pour les applications logiques critiques.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et industrialisation des approches alternatives estimés à 4-7 ans avant adoption à grande échelle dans la production de wafers logiques.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 10-20% avec les dopants alternatifs, principalement due à des besoins accrus en optimisation des procédés et en contrôle de qualité.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux significatifs pour développer de nouvelles approches, avec une incertitude sur l'impact à long terme sur les coûts de production des wafers logiques.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

ProcesseurX86 -> Germanium - Coefficient: 0.64

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Silicium pur avec optimisations de procédés, silicium contraint pour améliorer la mobilité des porteurs, silicium sur isolant (SOI).
 - **Quel impact:** Réduction des performances en termes de vitesse et d'efficacité énergétique. Le germanium, utilisé dans les alliages SiGe, améliore significativement la mobilité des porteurs dans les transistors logiques avancés.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux III-V intégrés sur silicium, structures à canaux multiples, transistors à effet de champ basés sur de nouveaux matériaux.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir ou d'améliorer les performances par rapport aux technologies actuelles, mais avec des défis majeurs concernant l'intégration dans les procédés de fabrication standard.

Délai d'implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des solutions à base de silicium optimisé possible dans un délai de 2-4 ans, mais avec des compromis significatifs sur les performances qui pourraient ralentir la progression de la loi de Moore.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et industrialisation des approches avancées estimés à 5-8 ans avant adoption dans la production de masse.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Impact variable selon l'alternative : potentielle réduction des coûts matériaux mais compensée par la nécessité d'optimisations plus poussées des procédés.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec un potentiel de réduction à long terme si l'échelle de production permet des économies.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

ProcesseurX86 -> Hafnium - Coefficient: 0.81

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Diélectriques à base de zirconium, oxydes d'aluminium (Al_2O_3), silice (SiO_2) avec épaisseur accrue.

- **Quel impact:** Réduction significative des performances des transistors en termes de courants de fuite et d'efficacité énergétique. Limitation des capacités de miniaturisation pour les noeuds technologiques avancés.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouveaux matériaux diélectriques nanostructurés, diélectriques à haute permittivité alternatifs, architectures de transistors innovantes.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances acceptables, mais avec des défis significatifs concernant l'industrialisation et l'intégration dans les architectures de processeurs existantes.

Délai d'implémentation: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des diélectriques alternatifs estimée à 4-6 ans, avec des compromis significatifs sur les performances qui nécessiteraient une reconception des architectures de transistors.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des technologies avancées estimés à 7-10 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 15-30% pour maintenir des performances acceptables avec des matériaux moins efficaces, nécessitant des ajustements majeurs des procédés de fabrication.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une trajectoire de réduction des coûts incertaine à moyen terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). "M2 Matériaux fonctionnels et applications.",

Processeur X86 -> Hafnium - Coefficient: 0.84

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Comme indiqué dans [5], "la famille des oxydes d'Hafnium HfO₂, Al₂O₃ et le ZrO₂ sont parmi les matériaux candidats à la succession de la silice". Les alternatives incluent donc principalement l'oxyde d'aluminium et l'oxyde de zirconium.
 - **Quel impact:** Selon [5], ces alternatives ont des constantes diélectriques k inférieures à celle du HfO₂, ce qui implique une épaisseur plus grande pour obtenir les mêmes propriétés isolantes, limitant la miniaturisation. Le document indique que "à partir de 2006, les fuites de courant ne permettront plus de respecter les requis, pour une épaisseur de diélectrique SiO₂ inférieure au nm".
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouveaux matériaux diélectriques nanostructurés, technologies de semi-conducteurs 2D.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement comparables à long terme, mais avec des défis majeurs concernant l'industrialisation et l'intégration dans les architectures x86 existantes qui dominent le marché.

Délai d'implémentation: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des diélectriques alternatifs estimée à 4-6 ans, avec des compromis significatifs sur la densité et la performance, comme suggéré dans [5] qui indique que le hafnium fait partie des rares matériaux capables de répondre aux exigences de miniaturisation actuelles.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des technologies avancées estimés à 7-10 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 20-40% pour maintenir des performances acceptables avec des matériaux moins efficaces, nécessitant des architectures plus complexes et des processus de fabrication adaptés.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies, avec une incertitude significative sur la rentabilité à long terme.

Sources

- [2] - Lemagit. (n.d.).“Mémoires non volatiles (2/2) : Les successeurs potentiels de la mémoire Flash.”,
- [5] - France-Science. (n.d.).“Sciences Physiques.”,

ProcesseurX86 -> Or - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Comme suggéré dans [4], “des options basées sur le recyclage de métaux conducteurs comme l’aluminium sont aujourd’hui étudiées”. D’autres alternatives incluent le cuivre, l’argent et le palladium.
 - **Quel impact:** Selon [3], l’intégration massive a fait “grandement croître la densité de métallisation dans un circuit intégré”, rendant “la structure plus sensible aux défaillances par électromigration (EM)”. Les alternatives à l’or sont généralement plus sensibles à ces phénomènes, réduisant la fiabilité à long terme des processeurs.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux à base de carbone comme le graphène, nanostructures conductrices avancées.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement comparables voire supérieures en termes de conductivité, mais avec des défis majeurs concernant l’intégration dans les procédés de fabrication actuels.

Délai d’implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des métaux alternatifs possible dans un délai de 2-3 ans pour certaines applications, mais avec des compromis sur la fiabilité à long terme, particulièrement problématique pour les processeurs x86 qui doivent maintenir une compatibilité ascendante stricte.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des matériaux avancés à base de carbone estimée à 4-7 ans avant adoption industrielle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Réduction potentielle des coûts avec l’utilisation de métaux plus abondants comme l’aluminium mentionné dans [4], mais selon [3], ces alternatives pourraient nécessiter des systèmes de compensation pour les problèmes d’électromigration.
- **Alternative théorique:**
 - Coûts initiaux élevés pour le développement et l’industrialisation des nouvelles technologies, avec un potentiel de réduction à moyen terme.

Sources

- [3] - Theses.fr. (2011).“Fiabilité des technologies CMOS fortement sub-microniques.”,
- 4] - PROMES CNRS. (n.d.).https://www.promes.cnrs.fr/wp-content/uploads/2021/03/rapport_Promes_2010_2012.pdf

ProcesseurX86 -> Palladium - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**

- **Lesquelles:** Alliages palladium-étain, revêtements en or en couche mince, alternatives à base d'argent, utilisation du cuivre ou de l'aluminium comme suggéré dans [4].
- **Quel impact:** Maintien des performances satisfaisantes pour la plupart des applications, avec un impact limité sur la fiabilité des contacts électriques. Les alternatives peuvent présenter une résistance légèrement inférieure à l'oxydation.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux composites avancés, revêtements céramiques conducteurs, technologies de connectique sans contact.
 - **Quel impact:** Potentiel de réduire significativement l'utilisation de métaux précieux tout en maintenant les fonctionnalités requises pour les applications de microprocesseurs avancés.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Adoption des alternatives à base d'alliages possible dans un délai de 1-3 ans, certaines étant déjà utilisées dans d'autres applications électroniques.
- **Alternative théorique:**
 - Commercialisation des technologies avancées estimée à 3-5 ans, avec des défis d'intégration dans les chaînes de production existantes.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Réduction potentielle des coûts avec les alliages modifiés ou l'utilisation de métaux plus abondants comme l'aluminium mentionné dans [4].
- **Alternative théorique:**
 - Potentiel de réduction significative des coûts à moyen terme grâce à l'utilisation de matériaux plus abondants, mais nécessitant des investissements initiaux en R&D.

Sources

- [3] - Theses.fr. (2011).“Fiabilité des technologies CMOS fortement sub-microniques.”,
- 4] - PROMES CNRS. (n.d.).https://www.promes.cnrs.fr/wp-content/uploads/2021/03/rapport_Promes_2010_2012.pdf

ProcesseurX86 -> Phosphore - Coefficient: 0.50

Faisabilité technique: 0.50

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Autres dopants du groupe V comme l'arsenic ou l'antimoine, ajustements des procédés de dopage pour optimiser l'utilisation du phosphore.
 - **Quel impact:** Modification modérée des caractéristiques électriques des transistors logiques, notamment en termes de niveaux de dopage et de profils de diffusion, avec un impact potentiel sur les performances des dispositifs.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouvelles approches de dopage utilisant des composés moléculaires, techniques de dopage sélectif avancées.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir ou d'améliorer les performances tout en réduisant la dépendance au phosphore élémentaire.

Délai d'implémentation: 0.40

- **Alternative existante:**
 - Substitution par d'autres dopants possible dans un délai de 1-3 ans, les techniques de dopage alternatives étant déjà en développement dans l'industrie des semi-conducteurs.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des nouvelles approches de dopage estimés à 3-5 ans avant adoption industrielle.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Augmentation limitée des coûts (5-15%) pour les dopants alternatifs, principalement due à des ajustements de procédés.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux modérés pour les nouvelles techniques de dopage, avec un potentiel de réduction des coûts à moyen terme grâce à l'amélioration de l'efficacité des procédés.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

ProcesseurX86 -> Scandium - Coefficient: 0.70

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages d'aluminium sans scandium comme suggéré dans [4] qui mentionne “des options basées sur le recyclage de métaux conducteurs comme l'aluminium”, composites renforcés avec d'autres éléments comme le titane.
 - **Quel impact:** Réduction des performances en termes de résistance à haute température et de conductivité thermique. Selon [3], “la température apparaît comme le facteur le plus critique au niveau du circuit intégré”, ce qui souligne l'importance des matériaux avec d'excellentes propriétés thermiques.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nanocomposites avancés, matériaux céramiques conducteurs.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances acceptables pour certaines applications spécifiques, mais avec des défis concernant l'intégration dans les processus de fabrication actuels.

Délai d'implémentation: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des alliages alternatifs estimée à 3-5 ans, incluant les phases de qualification et de validation pour les applications de microprocesseurs x86 qui ont des exigences strictes en termes de compatibilité.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des matériaux avancés estimés à 5-8 ans avant adoption à grande échelle dans l'industrie des semi-conducteurs.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Impact coût variable selon l'alternative : augmentation potentielle pour maintenir des performances acceptables avec des matériaux moins efficaces, mais possibilité d'économies à long terme grâce à l'utilisation de matériaux plus abondants comme l'aluminium mentionné dans [4].
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux importants en R&D, avec un potentiel de réduction des coûts à long terme si les nouvelles technologies atteignent l'échelle de production industrielle.

Sources

- [3] - Theses.fr. (2011).“Fiabilité des technologies CMOS fortement sub-microniques.”,
- 4] - PROMES CNRS. (n.d.).https://www.promes.cnrs.fr/wp-content/uploads/2021/03/rapport_Promes_2010_2012.pdf

ProcesseurX86 -> Silicium - Coefficient: 0.90

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**

- **Lesquelles:** Matériaux III-V comme l'arsénure de gallium (GaAs) ou le phosphure d'indium (InP) pour certaines applications spécifiques, germanium pour les applications nécessitant une haute mobilité des porteurs.
- **Quel impact:** Augmentation significative des coûts et complexification des procédés de fabrication. Limitations majeures en termes d'intégration à grande échelle et de compatibilité avec les infrastructures existantes.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux bidimensionnels comme le graphène, technologies basées sur les nanotubes de carbone, approches hybrides combinant différents matériaux.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement supérieures pour des applications spécifiques, mais avec des défis fondamentaux concernant la fabrication à grande échelle et l'intégration dans les architectures logiques existantes.

Délai d'implémentation: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Adoption limitée d'alternatives pour des applications de niche possible dans un délai de 3-5 ans, mais remplacement complet du silicium non envisageable à court ou moyen terme.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des technologies alternatives estimés à 10-15 ans avant qu'elles puissent potentiellement concurrencer le silicium dans la production de masse des wafers logiques.

Impact coût: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Augmentation drastique des coûts (3-10x) avec les matériaux alternatifs actuels, rendant ces solutions économiquement viables uniquement pour des applications à très haute valeur ajoutée.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements colossaux nécessaires pour développer des chaînes de production complètes basées sur de nouveaux matériaux, avec une incertitude significative sur la viabilité économique à long terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). “M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

Processeur X86 -> Tungstene - Coefficient: 0.60

Faisabilité technique: 0.60

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Alliages de molybdène, métaux alternatifs comme le titane, certains alliages à base d'aluminium comme suggéré dans [4].
 - **Quel impact:** Diminution de la résistance à haute température et aux contraintes mécaniques. Selon [3], “l'échauffement de la puce par effet joule” est une conséquence directe de l'intégration qui peut “mener à terme aux claquages francs des différents oxydes de grilles”. Les alternatives au tungstène ont généralement une résistance thermique inférieure.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Matériaux composites à matrice métallique, céramiques conductrices avancées.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir des performances acceptables pour certaines applications spécifiques, mais avec des défis concernant l'industrialisation et la résistance aux températures élevées.

Délai d'implémentation: 0.50

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des matériaux alternatifs possible dans un délai de 2-4 ans, incluant les phases de qualification et de validation pour les applications de microprocesseurs x86 qui ont des exigences strictes en termes de compatibilité.
- **Alternative théorique:**

- Développement et commercialisation des matériaux avancés estimés à 4-6 ans avant adoption à grande échelle dans l'industrie des semi-conducteurs.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Impact coût variable selon l'alternative : certains matériaux comme l'aluminium mentionné dans [4] pourraient offrir des économies, mais nécessiteraient des processus de fabrication adaptés.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux importants en R&D, avec une incertitude significative sur la rentabilité à long terme des nouvelles technologies.

Sources

- [3] - Theses.fr. (2011).“Fiabilité des technologies CMOS fortement sub-microniques.”,
- 4] - PROMES CNRS. (n.d.).https://www.promes.cnrs.fr/wp-content/uploads/2021/03/rapport_Promes_2010_2012.pdf

SSD25 -> Hafnium - Coefficient: 0.80

Faisabilité technique: 0.80

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Diélectriques à base de zirconium, oxydes d'aluminium (Al_2O_3), silice (SiO_2) avec épaisseur accrue, oxydes de terres rares pour certaines applications.
 - **Quel impact:** Réduction significative de la densité de stockage et augmentation des courants de fuite. Le hafnium est particulièrement crucial dans les technologies de mémoire avancées pour sa haute constante diélectrique et sa compatibilité avec les procédés de fabrication existants.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouveaux matériaux diélectriques nanostructurés, architectures de mémoire alternatives comme les mémoires résistives ou magnétiques.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir ou d'améliorer les performances avec des approches radicalement différentes, mais avec des défis majeurs concernant l'industrialisation et la fiabilité à long terme.

Délai d'implémentation: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des diélectriques alternatifs estimée à 4-6 ans, avec des compromis significatifs sur les performances qui nécessiteraient une reconception des cellules mémoire.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des technologies mémoire avancées estimés à 7-10 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 20-40% pour maintenir des performances acceptables avec des matériaux moins efficaces, nécessitant des ajustements majeurs des procédés de fabrication.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies mémoire, avec une trajectoire de réduction des coûts incertaine à moyen terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

SSD25 -> Silicium - Coefficient: 0.90

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**

- **Lesquelles:** Matériaux III-V pour certaines applications spécifiques, germanium pour améliorer certaines performances, substrats alternatifs comme le verre ou les polymères pour des applications de niche.
- **Quel impact:** Augmentation significative des coûts et complexification des procédés de fabrication. Limitations majeures en termes d'intégration à grande échelle et de compatibilité avec les infrastructures existantes de production de mémoires.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Technologies mémoire alternatives ne nécessitant pas de silicium comme substrat, mémoires organiques ou moléculaires, approches de stockage de données non conventionnelles.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement différentes ouvrant de nouvelles possibilités d'application, mais avec des défis fondamentaux concernant la densité de stockage, la vitesse, l'endurance et la rétention des données.

Délai d'implémentation: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Adoption limitée d'alternatives pour des applications spécifiques possible dans un délai de 3-5 ans, mais remplacement complet du silicium comme substrat de base non envisageable à court ou moyen terme.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des technologies mémoire radicalement nouvelles estimés à 10-15 ans avant qu'elles puissent potentiellement concurrencer les technologies basées sur le silicium à grande échelle.

Impact coût: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Augmentation drastique des coûts (3-10x) avec les matériaux alternatifs actuels, rendant ces solutions économiquement viables uniquement pour des applications à très haute valeur ajoutée.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements colossaux nécessaires pour développer des chaînes de production complètes basées sur de nouvelles approches, avec une incertitude significative sur la viabilité économique à long terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025). “M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

SSD25 -> Tantale - Coefficient: 0.70

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Condensateurs céramiques multicouches (MLCC), condensateurs aluminium polymère, condensateurs au niobium. D'après [3], certaines approches explorent la parallélisation des “briques technologiques déjà existantes pour améliorer les fonctionnalités du composant”.
 - **Quel impact:** Réduction significative de la densité capacitive par unité de volume, compromettant la miniaturisation des SSD 2.5 pouces. Selon [3], cela pourrait affecter les technologies “SIP ou System in Package” qui visent à “multiplier les capacités de stockage”.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouvelles architectures de mémoire utilisant moins ou pas de condensateurs, technologies de condensateurs à base de nanomatériaux. [2] mentionne plusieurs alternatives aux mémoires traditionnelles, comme “la RAM résistive (ReRAM)” qui pourrait réduire le besoin en condensateurs au tantale.
 - **Quel impact:** Potentiel d'atteindre des performances comparables mais avec des défis majeurs concernant l'intégration dans les architectures existantes et la compatibilité avec les interfaces standard des SSD 2.5 pouces.

Délai d'implémentation: 0.70

- **Alternative existante:**

- Substitution partielle possible dans un délai de 2-4 ans, mais nécessitant des compromis importants sur les performances ou l'encombrement des SSD 2.5 pouces.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des nouvelles technologies estimés à 5-8 ans avant adoption industrielle à grande échelle. Selon [2], certaines technologies comme “la RAM à Nanotube, ou NRAM” sont en développement mais pas encore prêtes pour production.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Les condensateurs céramiques sont généralement moins coûteux que ceux au tantalum, mais nécessitent d'être utilisés en plus grand nombre ou en taille plus importante pour des performances équivalentes, limitant les économies réelles pour les SSD 2.5 pouces.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux élevés en R&D, partiellement compensés à long terme si les nouvelles technologies atteignent l'échelle de production industrielle. Selon [2], ces nouvelles technologies “peuvent être empilées selon une méthode similaire à celle de la mémoire 3D XPoint pour réduire les coûts prévus”.

Sources

- [2] - Lemagit. (n.d.).“Mémoires non volatiles (2/2) : Les successeurs potentiels de la mémoire Flash.”,
- [3] - Theses.fr. (2011).“Fiabilité des technologies CMOS fortement sub-microniques.”,

SSDM2 -> Hafnium - Coefficient: 0.80

Faisabilité technique: 0.80

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Diélectriques à base de zirconium, oxydes d'aluminium (Al_2O_3), silice (SiO_2) avec épaisseur accrue, oxydes de terres rares pour certaines applications.
 - **Quel impact:** Réduction significative de la densité de stockage et augmentation des courants de fuite. Le hafnium est particulièrement crucial dans les technologies de mémoire avancées pour sa haute constante diélectrique et sa compatibilité avec les procédés de fabrication existants.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouveaux matériaux diélectriques nanostructurés, architectures de mémoire alternatives comme les mémoires résistives ou magnétiques.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir ou d'améliorer les performances avec des approches radicalement différentes, mais avec des défis majeurs concernant l'industrialisation et la fiabilité à long terme.

Délai d'implémentation: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des diélectriques alternatifs estimée à 4-6 ans, avec des compromis significatifs sur les performances qui nécessiteraient une reconception des cellules mémoire.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des technologies mémoire avancées estimés à 7-10 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 20-40% pour maintenir des performances acceptables avec des matériaux moins efficaces, nécessitant des ajustements majeurs des procédés de fabrication.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies mémoire, avec une trajectoire de réduction des coûts incertaine à moyen terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

SSDM2 -> Silicium - Coefficient: 0.90

Faisabilité technique: 0.90

- Alternative existante:
 - **Lesquelles:** Matériaux III-V pour certaines applications spécifiques, germanium pour améliorer certaines performances, substrats alternatifs comme le verre ou les polymères pour des applications de niche.
 - **Quel impact:** Augmentation significative des coûts et complexification des procédés de fabrication. Limitations majeures en termes d'intégration à grande échelle et de compatibilité avec les infrastructures existantes de production de mémoires.
- Alternative théorique:
 - **Lesquelles:** Technologies mémoire alternatives ne nécessitant pas de silicium comme substrat, mémoires organiques ou moléculaires, approches de stockage de données non conventionnelles.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement différentes ouvrant de nouvelles possibilités d'application, mais avec des défis fondamentaux concernant la densité de stockage, la vitesse, l'endurance et la rétention des données.

Délai d'implémentation: 0.90

- Alternative existante:
 - Adoption limitée d'alternatives pour des applications spécifiques possible dans un délai de 3-5 ans, mais remplacement complet du silicium comme substrat de base non envisageable à court ou moyen terme.
- Alternative théorique:
 - Développement et commercialisation des technologies mémoire radicalement nouvelles estimés à 10-15 ans avant qu'elles puissent potentiellement concurrencer les technologies basées sur le silicium à grande échelle.

Impact coût: 0.90

- Alternative existante:
 - Augmentation drastique des coûts (3-10x) avec les matériaux alternatifs actuels, rendant ces solutions économiquement viables uniquement pour des applications à très haute valeur ajoutée.
- Alternative théorique:
 - Investissements colossaux nécessaires pour développer des chaînes de production complètes basées sur de nouvelles approches, avec une incertitude significative sur la viabilité économique à long terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

SSDM2 -> Tantale - Coefficient: 0.70

Faisabilité technique: 0.70

- Alternative existante:
 - **Lesquelles:** Condensateurs céramiques multicouches (MLCC), condensateurs aluminium polymère, condensateurs au niobium comme indiqué dans le résultat [4] qui mentionne que “leurs propriétés chimiques [sont] très proches”.
 - **Quel impact:** Réduction significative de la densité capacitive par unité de volume, compromettant la miniaturisation et la fiabilité des SSD M.2. Selon [2], le tantale est utilisé spécifiquement pour la “protection contre les pertes de puissance (PLP)” où “le condensateur au tantale intégré alimente le contrôleur et le cache DRAM, garantissant ainsi l'intégrité des données”.
- Alternative théorique:
 - **Lesquelles:** Nouvelles architectures de mémoire nécessitant moins de condensateurs, technologies de condensateurs à base de nanomatériaux.

- **Quel impact:** Potentiel de maintenir l'intégrité des données mais avec des défis concernant la compatibilité avec les formats M.2 standardisés et les interfaces PCIe existantes.

Délai d'implémentation: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Substitution partielle possible dans un délai de 2-4 ans, mais selon [4], “il semble difficile de remplacer le tantale dans les transistors miniatures” et donc dans les applications critiques comme la protection contre les pertes de puissance dans les SSD M.2.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des nouvelles technologies estimés à 5-8 ans avant adoption industrielle à grande échelle, avec des défis liés à la fiabilité des données et à la durabilité requise par les SSD.

Impact coût: 0.70

- **Alternative existante:**
 - Les alternatives comme les condensateurs céramiques sont généralement moins coûteuses, mais nécessitent des volumes plus importants pour atteindre des performances équivalentes, limitant leur utilisation dans les formats compacts comme M.2.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux élevés en R&D, avec un retour sur investissement incertain à court terme pour les nouvelles technologies de protection contre les pertes de puissance.

Sources

- [2] - ES France. (2024).“SSD M2, NAND, de 256Gb à 2Tb : MTE712P & MTE712P-I.”,
- [4] - Techniques de l'Ingénieur. (n.d.).“Le tantale, un élément exceptionnel mais controversé.”,

StockageEMMC -> Hafnium - Coefficient: 0.80

Faisabilité technique: 0.80

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Diélectriques à base de zirconium, oxydes d'aluminium (Al_2O_3), silice (SiO_2) avec épaisseur accrue, oxydes de terres rares pour certaines applications.
 - **Quel impact:** Réduction significative de la densité de stockage et augmentation des courants de fuite. Le hafnium est particulièrement crucial dans les technologies de mémoire avancées pour sa haute constante diélectrique et sa compatibilité avec les procédés de fabrication existants.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Nouveaux matériaux diélectriques nanostructurés, architectures de mémoire alternatives comme les mémoires résistives ou magnétiques.
 - **Quel impact:** Potentiel de maintenir ou d'améliorer les performances avec des approches radicalement différentes, mais avec des défis majeurs concernant l'industrialisation et la fiabilité à long terme.

Délai d'implémentation: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des diélectriques alternatifs estimée à 4-6 ans, avec des compromis significatifs sur les performances qui nécessiteraient une reconception des cellules mémoire.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et validation des technologies mémoire avancées estimés à 7-10 ans avant adoption industrielle à grande échelle.

Impact coût: 0.80

- **Alternative existante:**
 - Augmentation potentielle des coûts de 20-40% pour maintenir des performances acceptables avec des matériaux moins efficaces, nécessitant des ajustements majeurs des procédés de fabrication.
- **Alternative théorique:**

- Investissements initiaux très élevés pour le développement des nouvelles technologies mémoire, avec une trajectoire de réduction des coûts incertaine à moyen terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

StockageEMMC -> Silicium - Coefficient: 0.90

Faisabilité technique: 0.90

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Matériaux III-V pour certaines applications spécifiques, germanium pour améliorer certaines performances, substrats alternatifs comme le verre ou les polymères pour des applications de niche.
 - **Quel impact:** Augmentation significative des coûts et complexification des procédés de fabrication. Limitations majeures en termes d'intégration à grande échelle et de compatibilité avec les infrastructures existantes de production de mémoires.
- **Alternative théorique:**
 - **Lesquelles:** Technologies mémoire alternatives ne nécessitant pas de silicium comme substrat, mémoires organiques ou moléculaires, approches de stockage de données non conventionnelles.
 - **Quel impact:** Performances potentiellement différentes ouvrant de nouvelles possibilités d'application, mais avec des défis fondamentaux concernant la densité de stockage, la vitesse, l'endurance et la rétention des données.

Délai d'implémentation: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Adoption limitée d'alternatives pour des applications spécifiques possible dans un délai de 3-5 ans, mais remplacement complet du silicium comme substrat de base non envisageable à court ou moyen terme.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des technologies mémoire radicalement nouvelles estimés à 10-15 ans avant qu'elles puissent potentiellement concurrencer les technologies basées sur le silicium à grande échelle.

Impact coût: 0.90

- **Alternative existante:**
 - Augmentation drastique des coûts (3-10x) avec les matériaux alternatifs actuels, rendant ces solutions économiquement viables uniquement pour des applications à très haute valeur ajoutée.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements colossaux nécessaires pour développer des chaînes de production complètes basées sur de nouvelles approches, avec une incertitude significative sur la viabilité économique à long terme.

Sources

- [1] - Université Paris-Saclay. (2025).“M2 Matériaux fonctionnels et applications.”,

StockageEMMC -> Tantale - Coefficient: 0.64

Faisabilité technique: 0.70

- **Alternative existante:**
 - **Lesquelles:** Condensateurs céramiques multicouches (MLCC), condensateurs aluminium polymère, condensateurs au niobium comme mentionné dans [4] où “leurs propriétés chimiques [sont] très proches”.
 - **Quel impact:** Réduction de la fiabilité du stockage eMMC, particulièrement dans les environnements mobiles sujets aux coupures soudaines d'alimentation. Le tantale offre une combinaison unique de propriétés en termes de densité capacitive et de fiabilité à long terme.
- **Alternative théorique:**

- **Lesquelles:** Architectures de mémoire flash avancées avec protection intégrée contre les pertes de données, technologies de condensateurs à base de nanomatériaux.
- **Quel impact:** Potentiel de maintenir ou d'améliorer la protection des données, mais avec des défis d'intégration dans les formats eMMC standardisés utilisés dans les appareils mobiles.

Délai d'implémentation: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Transition vers des technologies alternatives possible dans un délai de 2-3 ans pour les applications moins critiques, mais comme indiqué dans [4], “il semble difficile de remplacer le tantalum dans les transistors miniatures”.
- **Alternative théorique:**
 - Développement et commercialisation des nouvelles technologies estimés à 4-6 ans avant adoption industrielle dans les produits grand public.

Impact coût: 0.60

- **Alternative existante:**
 - Impact variable selon les alternatives : certaines options moins coûteuses mais nécessitant plus d'espace, compromettant la miniaturisation essentielle pour les appareils mobiles utilisant eMMC.
- **Alternative théorique:**
 - Investissements initiaux importants en R&D, partiellement compensés à long terme par l'utilisation de matériaux potentiellement plus abondants que le tantalum, dont les ressources terrestres pourraient s'épuiser selon [4] “à l'horizon 2038”.

Sources

- [4] - Techniques de l'Ingénieur. (n.d.).“Le tantalum, un élément exceptionnel mais controversé.”,

Criticité spécifique

Semiconducteur -> Creuset Quartz - Coefficient: 0.74

Contexte : le creuset en quartz (silice fondue 5 N) est aujourd’hui indispensable pour tirer des lingots CZ de 300 mm destinés aux processeurs. Sa très faible contamination métallique (< 10 ppb) et son « auto-dopage » contrôlé en oxygène (< 30 ppm) n’ont pas d’équivalent industriel. Les essais de substitution visent surtout à réduire l’oxygène pour la micro-électronique de puissance ; ils ne sont pas encore qualifiés pour la logique haut volume.

Faisabilité technique : 0.80

Option	Niveau de maturité	Limites identifiées
Creuset graphite revêtu SiC	TRL 6 (pilote 200 mm)	Diffusion du carbone (> 1016 cm ⁻³) et épaisseur du revêtement instable après 2-3 cycles (Material evaluation for engineering a novel crucible setup for the ...)
Creuset tout Si ₃ N ₄ / SiC dense	TRL 4-5 (proto 200 mm)	Taux de casse élevé ; contrainte thermique > 200 MPa ; coûts frittage élevés (Si 3 N 4 /fused quartz composite crucible with enhanced thermal ...)
Float-Zone / Cold-Crucible (sans creuset)	Diamètre max 150 mm	Pas de solution 300 mm ; cadence trop faible HVM ([Float Zone - an overview]

Délai d'implémentation : 0.70

- **Qualification 300 mm** des creusets SiC/Si₃N₄ : besoins > 8 ans (scaling pilote → HVM, re-design des « hot-zones » des tireuses, modèle oxygène à recalibrer).
- **Float-Zone large diamètre** : horizon technologique > 10 ans, dépend des avancées en chauffage RF haute puissance et contrôle thermique.

Impact économique : 0.70

Poste	Écart vs. quartz
CAPEX équipement	+30-50 % (chambres, isolation, jeep, simulation procédé)
OPEX matériau	SiC/Si ₃ N ₄ 2-3 × plus cher, mais ré-utilisable partiellement (4-7 lingots)
Rendement initial	-3 à -5 % de premier-pass yield (défauts carbone/azote)

Synthèse

Paramètre	Résultat
Capacité de substitution	Faible – aucun matériau offre aujourd’hui pureté et compatibilité équivalentes au quartz pour 300 mm > 8 ans avant production de masse avec un autre creuset
Horizon réaliste	Contamination C/N, gestion oxygène, intégration équipement, coût CAPEX
Enjeux clés	Maintenir l’approvisionnement en quartz ultra-pur est critique pour la filière processeur x86.
Décision	

Sources

1. K. Wünsch *et al.* “Material evaluation for engineering a novel crucible setup for the Czochralski process,” *J. Crystal Growth* (2022) (Material evaluation for engineering a novel crucible setup for the ...)
2. Y. Zhao *et al.* “Si₃N₄/fused quartz composite crucible with enhanced thermal conductivity,” *J. Crystal Growth* (2015) (Si 3 N 4 /fused quartz composite crucible with enhanced thermal ...)
3. P. Rudolph *et al.* “Crucibles & Coatings for Silicon Melting,” *Prog. Crystal Growth* (2024) (Crucibles and coatings for silicon melting and crystallization)
4. M. Hauschild *et al.* “Long-term stability of novel crucible systems for CZ silicon,” *Crystals* **13**, 14 (2023) (Long-Term Stability of Novel Crucible Systems for the Growth ... - MDPI)
5. R. Mühlle “Float Zone crystal growth: limitations and prospects,” *ScienceDirect Topics* (Float Zone - an overview | ScienceDirect Topics)
6. Total Materia, “Cold-crucible induction melting,” tech-note (2023) (cold crucible induction melting | Total Materia)

Métallurgie & semi-conducteurs haute T°C -> Creuset graphite - Coefficient: 0.44

Contexte : les creusets en graphite isostatique ou extrudé (pur 4 N) sont les récipients de référence pour : • la fusion et le moulage des métaux de connexion (Cu, Ag, Au) ; • la croissance de cristaux III-V/SiC à > 2 400 °C par transport vapeur (PVT) ou Kyropoulos ; • la fonte d'alliages d'aluminium et de magnésium pour boîtiers électroniques.

Ils offrent une **résistance au choc thermique incomparable** et un faible coût, mais présentent deux faiblesses : 1. **Contamination carbone** des bains ou cristaux (jusqu'à 1016 cm⁻³)(Brevet Google)(eastcarb.com); 2. **Oxydation** à l'air au-delà de 550 °C, limitant la durée de vie.

Faisabilité technique : 0.50

Alternative	Maturité (TRL)	Limites majeures
Creuset silicium-carbure (SiC, RBSiC)	Commercial jusqu'à 1600 °C pour métaux précieux, pilotes 200 mm pour Si/GaN(lmine.com)(rdoinduction.com)×(rdoinduction.com)	Fragilité (module de rupture moitié du graphite), diamètre limité à 200 mm, coût > 1,7
Creuset alumine / zircone	Large volume pour fonderie, labo(Goodfellow - Innovation Delivered)(Amazon)	Choc thermique médiocre ; mouillage avec Cu/Al ; masse volumique > 2 × graphite
Creuset BN ou BN-revêtu W/Mo	Niche optoélectronique	Prix très élevé, format 150 mm
Solution “cold-crucible” (induction dans cuve Cu refroidie)	POC pour Si et alliages exigus	Rendement faible, limite 50 kg ; forte CAPEX

Délai d'implémentation : 0.50

- Métallurgie Cu/Ag/Al : passage à SiC ou alumine possible en **6-18 mois** (adaptation fours + profils de chauffe).
- Cristaux SiC/GaN **150-200 mm** : lignes pilotes déjà actives ; montée en cadence **3 ans** si investissements décidés.
- **Grand diamètre (> 200 mm)** : R&D encore nécessaire (revêtements anti-carbone, mécanique SiC) horizon **3-5 ans**.

Impact économique : 0.30

- **Prix unitaire** : SiC = **130 \$** vs graphite **74 \$** pour un creuset Ø 90 mm(rdoinduction.com) → + 75 %.
- **Cycle de vie** : SiC dure 2-3 × plus longtemps, atténuant le surcoût aux OPEX.
- **Investissements** : fours à zone chaude graphite → SiC nécessitent nouveaux porte-creusets et profils thermiques (CAPEX +10-20 %).

Synthèse

Paramètre	Résultat
Capacité de substitution	Moyenne – des solutions SiC/alumine prêtes pour la métallurgie, encore limitées pour les très grands cristaux
Horizon réaliste	1-3 ans pour les fonderies Cu/Ag/Al ; 3 ans pour le cristal III-V > 200 mm
Enjeux clés	Fragilité mécanique du SiC, maîtrise du gradient thermique, coûts > graphite, gestion contamination C/N
Décision	Sécuriser la chaîne SiC et accélérer la R&D grands formats afin de réduire la dépendance au graphite et la contamination carbone.

Sources

1. RDO Induction – « SiC crucibles durables, ne s'oxydent pas comme le graphite ; prix catalogue »(rdoinduction.com)
2. East Carbon – « Graphite plus poreux, contamination carbone ; porosité 15-20 % »(eastcarb.com)
3. Brevet US 20110192837 A1 – « Réaction Si fondu/graphite → contamination carbone ; SiC coating »(Brevet Google)
4. Raabe et al., *J. Crystal Growth* – « Réduction contamination C par revêtements SiC sur creuset »(ScienceDirect)
5. SGL Carbon – « Graphite indispensable zones chaudes croissance SiC, Sapphire, Si »(sglcarbon.com)

Criticité par minerai

Aluminium

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
ProcesseurX86	0.50	0.50	0.40	0.60
EcranMiniLED	0.50	0.50	0.40	0.60
ProcesseurASIC	0.47	0.50	0.40	0.50
Connectivite	0.47	0.50	0.40	0.50
ProcesseurARM	0.47	0.50	0.40	0.50
DisqueDur	0.47	0.50	0.40	0.50
CarteMere	0.43	0.40	0.30	0.60
EcranOLED	0.40	0.40	0.30	0.50
MemoireRAM	0.33	0.30	0.20	0.50
EcranLCD	0.30	0.30	0.20	0.40

Antimoine

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Audio	0.60	0.60	0.50	0.70
Batterie	0.60	0.60	0.50	0.70
Camera	0.60	0.60	0.50	0.70
Capteurs	0.60	0.60	0.50	0.70
CarteMere	0.60	0.60	0.50	0.70
Connecteurs	0.60	0.60	0.50	0.70
Connectivite	0.60	0.60	0.50	0.70
DisqueDur	0.60	0.60	0.50	0.70
ProcesseurARM	0.60	0.60	0.50	0.70
ProcesseurASIC	0.60	0.60	0.50	0.70
ProcesseurX86	0.60	0.60	0.50	0.70

Argent

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
CarteMere	0.61	0.70	0.50	0.60
Connecteurs	0.61	0.70	0.50	0.60

Beryllium

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Connecteurs	0.64	0.70	0.60	0.60
Connectivite	0.64	0.70	0.60	0.60

Cerium

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Camera	0.71	0.80	0.70	0.60
EcranLCD	0.70	0.70	0.70	0.70
EcranOLED	0.64	0.70	0.60	0.60

Chrome

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Boitier	0.39	0.30	0.40	0.50

Cobalt

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Batterie	0.57	0.60	0.60	0.50

Creuset Quartz

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Semiconducteur	0.74	0.80	0.70	0.70

Creuset graphite

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Métallurgie & semi-conducteurs haute T°C	0.44	0.50	0.50	0.30

Cuivre

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
CarteMere	0.81	0.90	0.80	0.70
Connecteurs	0.81	0.90	0.80	0.70

Dysprosium

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Audio	0.70	0.70	0.70	0.70

Erbium

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Connectivite	0.74	0.80	0.70	0.70

Etain

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
CarteMere	0.60	0.60	0.60	0.60
Connecteurs	0.60	0.60	0.60	0.60

Europium

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
EcranLCD	0.81	0.90	0.80	0.70
EcranMiniLED	0.81	0.90	0.80	0.70

Gadolinium

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Capteurs	0.74	0.80	0.70	0.70

Gallium

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Audio	0.47	0.50	0.40	0.50
Batterie	0.47	0.50	0.40	0.50
Camera	0.47	0.50	0.40	0.50
Capteurs	0.47	0.50	0.40	0.50
Connecteurs	0.47	0.50	0.40	0.50
DisqueDur	0.47	0.50	0.40	0.50
Connectivite	0.47	0.50	0.40	0.50
Camera	0.41	0.50	0.40	0.30
EcranLCD	0.41	0.50	0.40	0.30
EcranOLED	0.41	0.50	0.40	0.30
EcranMiniLED	0.41	0.50	0.40	0.30
EcranSpecifique	0.41	0.50	0.40	0.30
CreusetGraphite	0.37	0.40	0.30	0.40

Germanium

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Audio	0.64	0.70	0.60	0.60
Batterie	0.64	0.70	0.60	0.60
Camera	0.64	0.70	0.60	0.60
Capteurs	0.64	0.70	0.60	0.60
CarteMere	0.64	0.70	0.60	0.60
Connecteurs	0.64	0.70	0.60	0.60
Connectivite	0.64	0.70	0.60	0.60
DisqueDur	0.64	0.70	0.60	0.60
ProcesseurARM	0.64	0.70	0.60	0.60
ProcesseurASIC	0.64	0.70	0.60	0.60
ProcesseurX86	0.64	0.70	0.60	0.60

Graphite

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Batterie	0.51	0.60	0.50	0.40
CreusetGraphite	0.44	0.50	0.30	0.50

Hafnium

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
ProcedeEUV	0.90	0.90	0.90	0.90
ProcesseurASIC	0.84	0.90	0.80	0.80
ProcesseurX86	0.84	0.90	0.80	0.80
CarteMere	0.81	0.90	0.80	0.70
ProcesseurX86	0.81	0.90	0.80	0.70
ProcesseurARM	0.81	0.90	0.80	0.70
ProcesseurASIC	0.81	0.90	0.80	0.70
MemoireRAM	0.80	0.80	0.80	0.80
ProcesseurARM	0.80	0.80	0.80	0.80
SSD25	0.80	0.80	0.80	0.80
SSDM2	0.80	0.80	0.80	0.80
StockageEMMC	0.80	0.80	0.80	0.80

Holmium

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Camera	0.84	0.90	0.80	0.80
Capteurs	0.84	0.90	0.80	0.80

Lanthane

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Camera	0.64	0.70	0.60	0.60
Batterie	0.54	0.60	0.50	0.50

Lithium

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Batterie	0.51	0.60	0.50	0.40

Magnesium

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Boitier	0.50	0.50	0.40	0.60

Manganèse

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Audio	0.60	0.60	0.50	0.70
Capteurs	0.50	0.50	0.40	0.60
Batterie	0.40	0.40	0.30	0.50
Boitier	0.40	0.40	0.30	0.50

Neodyme

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Audio	0.47	0.50	0.50	0.40

Nickel

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Connecteurs	0.50	0.50	0.40	0.60
Batterie	0.44	0.50	0.40	0.40

Or

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Connecteurs	0.64	0.70	0.60	0.60
ProcesseurARM	0.60	0.60	0.60	0.60
ProcesseurASIC	0.60	0.60	0.60	0.60

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
ProcesseurX86	0.60	0.60	0.60	0.60

Palladium

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
CarteMère	0.50	0.50	0.40	0.60
Connecteurs	0.50	0.50	0.40	0.60
ProcesseurARM	0.50	0.50	0.40	0.60
ProcesseurX86	0.50	0.50	0.40	0.60

Phosphore

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Audio	0.50	0.50	0.40	0.60
Batterie	0.50	0.50	0.40	0.60
Camera	0.50	0.50	0.40	0.60
Capteurs	0.50	0.50	0.40	0.60
CarteMère	0.50	0.50	0.40	0.60
Connecteurs	0.50	0.50	0.40	0.60
Connectivite	0.50	0.50	0.40	0.60
DisqueDur	0.50	0.50	0.40	0.60
ProcesseurARM	0.50	0.50	0.40	0.60
ProcesseurASIC	0.50	0.50	0.40	0.60
ProcesseurX86	0.50	0.50	0.40	0.60

Platine

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Camera	0.71	0.80	0.70	0.60
Capteurs	0.70	0.70	0.70	0.70
DisqueDur	0.64	0.70	0.60	0.60

Praseodyme

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Audio	0.41	0.50	0.40	0.30

Quartz

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
CreusetQuartz	0.74	0.80	0.70	0.70

Samarium

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Capteurs	0.74	0.80	0.70	0.70
Connectivite	0.64	0.70	0.60	0.60

Scandium

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
ProcesseurARM	0.70	0.70	0.70	0.70
ProcesseurASIC	0.70	0.70	0.70	0.70
ProcesseurX86	0.70	0.70	0.70	0.70

Silicium

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Audio	0.90	0.90	0.90	0.90
Batterie	0.90	0.90	0.90	0.90
Camera	0.90	0.90	0.90	0.90
Capteurs	0.90	0.90	0.90	0.90
CarteMere	0.90	0.90	0.90	0.90
Connecteurs	0.90	0.90	0.90	0.90
Connectivite	0.90	0.90	0.90	0.90
DisqueDur	0.90	0.90	0.90	0.90
MemoireRAM	0.90	0.90	0.90	0.90
ProcesseurARM	0.90	0.90	0.90	0.90
ProcesseurASIC	0.90	0.90	0.90	0.90
ProcesseurX86	0.90	0.90	0.90	0.90
SSD25	0.90	0.90	0.90	0.90
SSDM2	0.90	0.90	0.90	0.90
StockageEMMC	0.90	0.90	0.90	0.90

Tantale

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
MemoireRAM	0.71	0.80	0.70	0.60
CarteMere	0.70	0.70	0.80	0.60
SSD25	0.70	0.70	0.70	0.70
SSDM2	0.70	0.70	0.70	0.70
StockageEMMC	0.64	0.70	0.60	0.60

Terbium

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
EcranLCD	0.81	0.90	0.80	0.70
EcranMiniLED	0.81	0.90	0.80	0.70

Titane

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Boîtier	0.67	0.70	0.60	0.70

Tungstene

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Audio	0.61	0.70	0.50	0.60
ProcesseurARM	0.60	0.60	0.50	0.70
ProcesseurASIC	0.60	0.60	0.50	0.70
ProcesseurX86	0.60	0.60	0.50	0.70

Yttrium

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
EcranMiniLED	0.74	0.80	0.70	0.70
EcranOLED	0.70	0.70	0.70	0.70

Zinc

Composant	ICS	Faisabilité technique	Délai d'implémentation	Impact économique
Batterie	0.30	0.30	0.20	0.40
Boîtier	0.30	0.30	0.20	0.40

Tableau de synthèse

Composant	Minerai	ICS
Batterie	Silicium	0.90
Audio	Silicium	0.90
ProcedeEUV	Hafnium	0.90
Connectivite	Silicium	0.90
CarteMere	Silicium	0.90
Connecteurs	Silicium	0.90
Capteurs	Silicium	0.90
Camera	Silicium	0.90
SSDM2	Silicium	0.90

Composant	Minerai	ICS
ProcesseurARM	Silicium	0.90
DisqueDur	Silicium	0.90
MemoireRAM	Silicium	0.90
ProcesseurX86	Silicium	0.90
SSD25	Silicium	0.90
StockageEMMC	Silicium	0.90
ProcesseurASIC	Silicium	0.90
Capteurs	Holmium	0.84
Camera	Holmium	0.84
ProcesseurX86	Hafnium	0.84
ProcesseurASIC	Hafnium	0.84
EcranMiniLED	Terbium	0.81
EcranLCD	Terbium	0.81
EcranMiniLED	Europium	0.81
ProcesseurARM	Hafnium	0.81
Connecteurs	Cuivre	0.81
CarteMere	Hafnium	0.81
ProcesseurX86	Hafnium	0.81
ProcesseurASIC	Hafnium	0.81
EcranLCD	Europium	0.81
CarteMere	Cuivre	0.81
MemoireRAM	Hafnium	0.80
ProcesseurARM	Hafnium	0.80
SSD25	Hafnium	0.80
SSDM2	Hafnium	0.80
StockageEMMC	Hafnium	0.80
Semiconducteur	Creuset Quartz	0.74
Capteurs	Gadolinium	0.74
Capteurs	Samarium	0.74
CreusetQuartz	Quartz	0.74
Connectivite	Erbium	0.74
EcranMiniLED	Yttrium	0.74
Camera	Cerium	0.71
Camera	Platine	0.71
MemoireRAM	Tantale	0.71
SSDM2	Tantale	0.70
Audio	Dysprosium	0.70
SSD25	Tantale	0.70
EcranLCD	Cerium	0.70
Capteurs	Platine	0.70
CarteMere	Tantale	0.70
EcranOLED	Yttrium	0.70
ProcesseurX86	Scandium	0.70
ProcesseurARM	Scandium	0.70
ProcesseurASIC	Scandium	0.70
Boitier	Titane	0.67
Audio	Germanium	0.64
EcranOLED	Cerium	0.64
ProcesseurX86	Germanium	0.64
ProcesseurASIC	Germanium	0.64
StockageEMMC	Tantale	0.64
ProcesseurARM	Germanium	0.64
DisqueDur	Platine	0.64
DisqueDur	Germanium	0.64
Connecteurs	Germanium	0.64

Composant	Mineraï	ICS
CarteMere	Germanium	0.64
Connecteurs	Beryllium	0.64
Connecteurs	Or	0.64
Connectivite	Germanium	0.64
Camera	Germanium	0.64
Capteurs	Germanium	0.64
Camera	Lanthane	0.64
Connectivite	Beryllium	0.64
Connectivite	Samarium	0.64
Batterie	Germanium	0.64
Audio	Tungstene	0.61
CarteMere	Argent	0.61
Connecteurs	Argent	0.61
Audio	Antimoine	0.60
Audio	Manganese	0.60
ProcesseurASIC	Or	0.60
ProcesseurX86	Tungstene	0.60
ProcesseurX86	Or	0.60
ProcesseurX86	Antimoine	0.60
ProcesseurARM	Or	0.60
ProcesseurARM	Tungstene	0.60
ProcesseurARM	Antimoine	0.60
ProcesseurASIC	Tungstene	0.60
Batterie	Antimoine	0.60
Connecteurs	Antimoine	0.60
CarteMere	Etain	0.60
CarteMere	Antimoine	0.60
Camera	Antimoine	0.60
Connectivite	Antimoine	0.60
Connecteurs	Etain	0.60
DisqueDur	Antimoine	0.60
Capteurs	Antimoine	0.60
ProcesseurASIC	Antimoine	0.60
Batterie	Cobalt	0.57
Batterie	Lanthane	0.54
Batterie	Graphite	0.51
Batterie	Lithium	0.51
Audio	Phosphore	0.50
Boitier	Magnesium	0.50
Batterie	Phosphore	0.50
ProcesseurARM	Phosphore	0.50
EcranMiniLED	Aluminium	0.50
ProcesseurASIC	Phosphore	0.50
ProcesseurX86	Aluminium	0.50
ProcesseurX86	Phosphore	0.50
ProcesseurX86	Palladium	0.50
Connecteurs	Phosphore	0.50
ProcesseurARM	Palladium	0.50
CarteMere	Phosphore	0.50
Capteurs	Phosphore	0.50
DisqueDur	Phosphore	0.50
Connecteurs	Palladium	0.50
CarteMere	Palladium	0.50
Camera	Phosphore	0.50
Capteurs	Manganese	0.50

Composant	Minerai	ICS
Connectivite	Phosphore	0.50
Connecteurs	Nickel	0.50
ProcesseurARM	Aluminium	0.47
Camera	Gallium	0.47
Capteurs	Gallium	0.47
Connecteurs	Gallium	0.47
Batterie	Gallium	0.47
Audio	Neodyme	0.47
Audio	Gallium	0.47
ProcesseurASIC	Aluminium	0.47
Connectivite	Gallium	0.47
DisqueDur	Aluminium	0.47
DisqueDur	Gallium	0.47
Connectivite	Aluminium	0.47
Batterie	Nickel	0.44
Métallurgie & semi-conducteurs haute T°C	Creuset graphite	0.44
CreusetGraphite	Graphite	0.44
CarteMere	Aluminium	0.43
EcranLCD	Gallium	0.41
EcranOLED	Gallium	0.41
Audio	Praseodyme	0.41
EcranMiniLED	Gallium	0.41
EcranSpecifique	Gallium	0.41
Camera	Gallium	0.41
Batterie	Manganese	0.40
Boitier	Manganese	0.40
EcranOLED	Aluminium	0.40
Boitier	Chrome	0.39
CreusetGraphite	Gallium	0.37
MemoireRAM	Aluminium	0.33
Batterie	Zinc	0.30
Boitier	Zinc	0.30
EcranLCD	Aluminium	0.30