

Partenaires du projet



Innovation, Sciences et
Développement économique Canada



OPTONIQUE



Développer et sécuriser les chaînes de valeur pour la microélectronique et la photonique au Québec

Version synthétique



Auteurs



Myrielle Robitaille

Directrice principale, Sia
Énergie, industrie et transport
Myrielle.robitaille@sia-partners.com



Mathieu Demoulin

Consultant superviseur sénior, Sia
Énergie, industrie et transport
Mathieu.demoulin@sia-partners.com



Catherine Kallas

Consultante sénior, Sia
Énergie, industrie et transport
Catherine.kallas@sia-partners.com



Aymen Ghorbel

Analyste sénior, Yole Group
Technologie et marché
Aymen.ghorbel@yolegroup.com

NB : Le contenu de ce document n'engage en aucune façon les organisations partenaires qui ont participé au financement de l'initiative. Les propos tenus n'engagent que les auteurs du document.

Sommaire exécutif

L'objectif de cette étude est d'appuyer le **positionnement et la croissance des industries de la microélectronique et de la photonique au Québec**, ainsi que des industries des minéraux, des matériaux et des composants situées en amont et au médian de leurs chaînes de valeur et d'approvisionnement, et ce, afin de soutenir la compétitivité des industries stratégiques (énergie, défense, aérospatiale, véhicules électriques, sciences de la vie, etc.). L'analyse a permis d'identifier **plusieurs créneaux distinctifs** dans ces filières, **où le Québec pourrait se démarquer**.



Une **analyse transversale de l'écosystème microélectronique et photonique, tant au Québec qu'à l'international**, a été menée. Elle s'appuie sur le balisage de plus de **500 acteurs**, dont **une centaine implantés au Québec/Canada**, la synthèse de plus de **150 rapports et études de référence**, ainsi que sur une **vingtaine d'entretiens** réalisés auprès de joueurs industriels et institutionnels.



L'analyse se concentre dans un premier temps sur **l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement** des filières microélectronique/photonique et sur **plus de 85 minéraux et matériaux** impliqués dans ces filières. L'étude approfondie s'est concentrée sur **13 segments d'intérêt** et **15 minéraux critiques et stratégiques**, identifiés comme représentant les **principales occasions d'affaires et de recherche** pour le secteur au Québec.



Les 13 segments ont fait l'objet d'une analyse approfondie, à l'échelle internationale et québécoise, selon quatre axes : **l'aperçu technologique, les perspectives de marché, l'identification des acteurs impliqués et les perspectives locales**. Parallèlement, l'étude des 15 minéraux critiques et stratégiques **s'est concentrée sur les dimensions géopolitiques, les restrictions à l'exportation, les vulnérabilités économiques, ainsi que le potentiel de production, raffinage et recyclage local**.



Finalement, l'étude a **fait émerger 7 thématiques majeures qui pourraient structurer les prochaines réflexions et initiatives** : les **ressources minérales critiques** et la **valorisation des résidus miniers** (y compris l'exploitation des mines urbaines), **l'intégration des chaînes de valeur**, la **R-D collaborative**, les défis liés au **passage à l'échelle industrielle**, la constitution **d'alliances stratégiques** et, enfin, le développement d'une culture favorisant **le rapprochement et les synergies inter-filières**.

Introduction et méthodologie	/ 01
Étude des grandes tendances	/ 02
Étude détaillée des segments	/ 03
Présélection et catégorisation des 13 segments	
Analyse approfondie des segments	
Minéraux et matériaux critiques	/ 04
Synthèse et conclusion – 7 thématiques d'intérêt	/ 05
Annexes	/ 06
ANNEXE A – Matrice d'analyse croisée: minéraux/matériaux vs technologies	
ANNEXE B – Abréviations, acronymes, termes techniques et glossaire des MCS	
ANNEXE C – Sources	



01

Introduction et méthodologie

Contexte | Rappel des grands objectifs du projet

Le projet **vise à appuyer davantage le positionnement et la croissance des industries** de la microélectronique et de la photonique au Québec, ainsi que **des industries de minéraux, de matériaux et de composants** situées en amont et au médian de leurs chaînes de valeur et d'approvisionnement. L'objectif est **d'identifier les créneaux distinctifs dans lesquels le Québec pourrait se démarquer**, pour le bénéfice des industries stratégiques du Québec (énergie, défense, aérospatiale, véhicules électriques, sciences de la vie, etc)

C'EST POUR CONTRIBUER À RÉPONDRE À CET OBJECTIF QU'EST NÉ UN PARTENARIAT IMPLIQUANT :

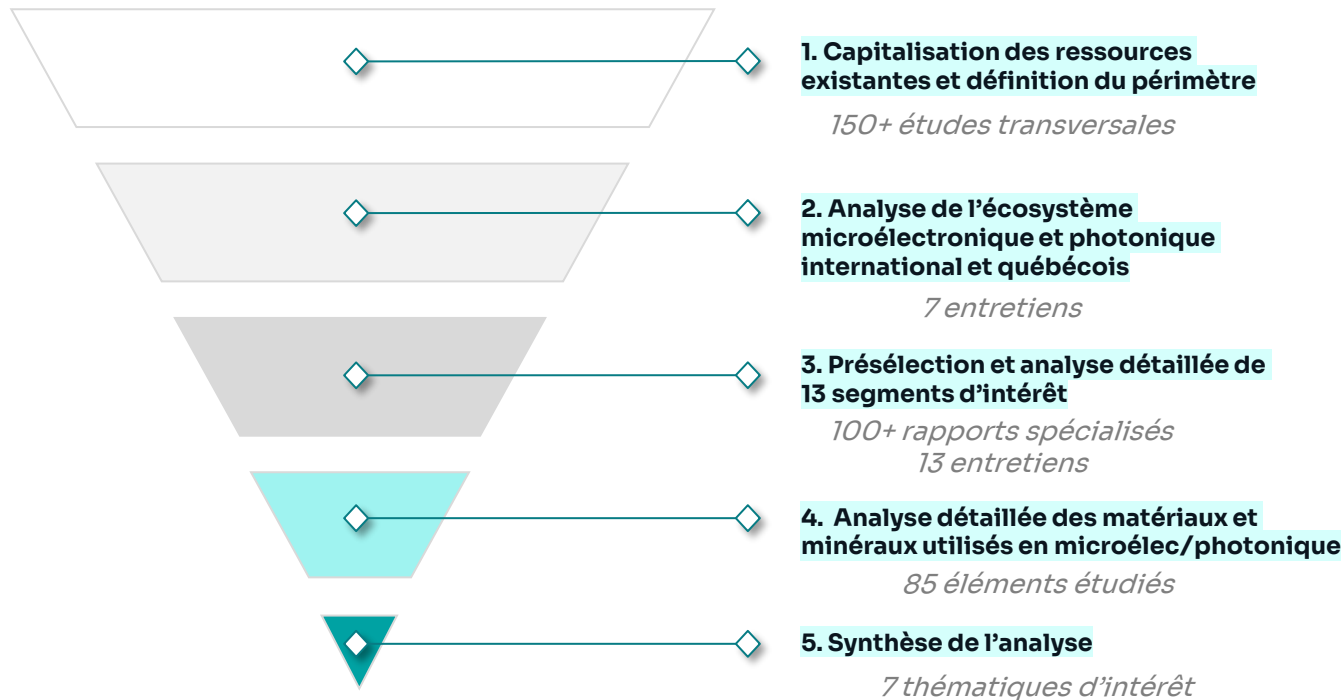


CE PARTENARIAT A MANDATÉ LE CONSORTIUM SIA/YOLE GROUP POUR MENER À BIEN CETTE ÉTUDE

Méthodologie | Vision d'ensemble



PHASES

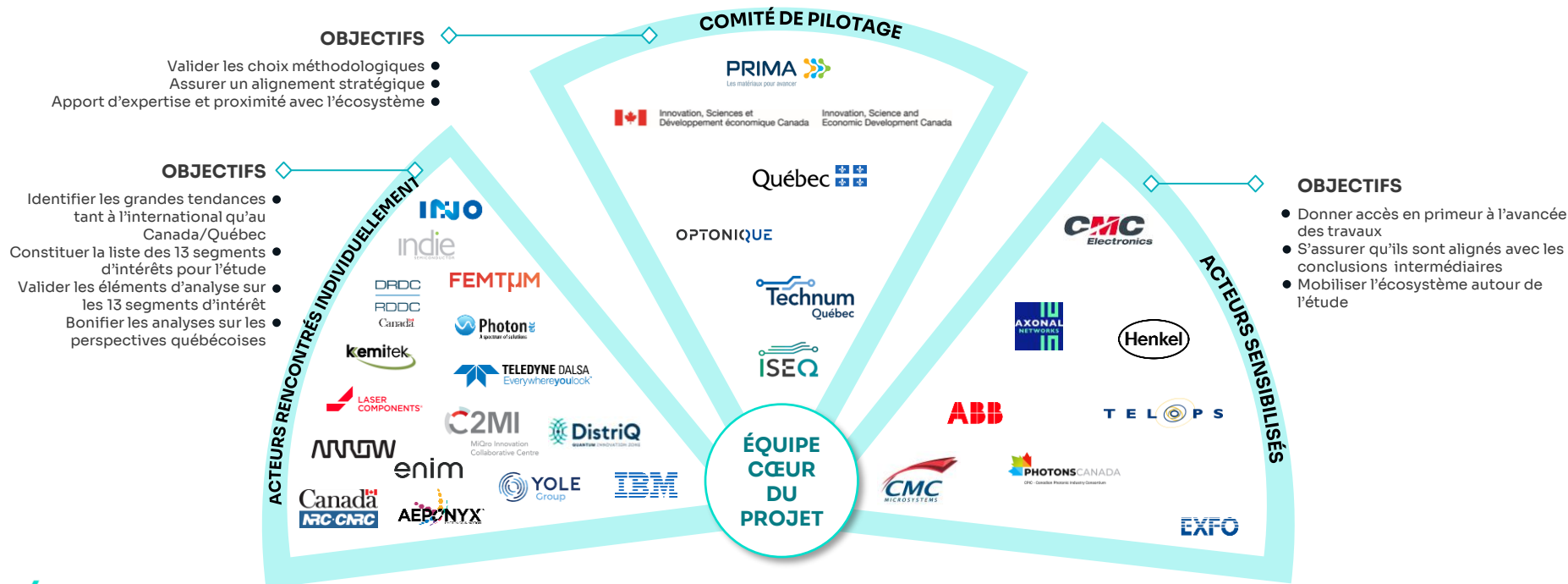


OBJECTIFS

- **Récolter, assimiler et catégoriser** les études existantes
- **Définir le périmètre** du mandat
- **Dessiner une vision globale** des dynamiques et des occasions d'affaires
- **Positionner le Québec** sur 13 segments : entreprises, expertise, etc.
- **Développer une intelligence d'affaire élevée** pour les 13 segments et le positionnement du QC
- **Identifier les ressources disponibles**, les **maillons stratégiques** et les leviers potentiels autour des matériaux utilisés en microélec/photonique
- **Identifier les principales thématiques d'intérêt** sur lesquelles agir

Mobilisation de l'écosystème | Leviers utilisés

La démarche s'est construite de manière collaborative avec l'écosystème. Des entretiens ciblés ont permis d'approfondir certains segments et de valider les spécificités du contexte québécois. Un comité de pilotage a été sollicité tout au long de l'étude pour guider les choix méthodologiques et assurer un alignement stratégique. Enfin, plusieurs acteurs de l'écosystème ont été sensibilisés aux analyses en cours, contribuant ainsi à une appropriation collective des constats.



02

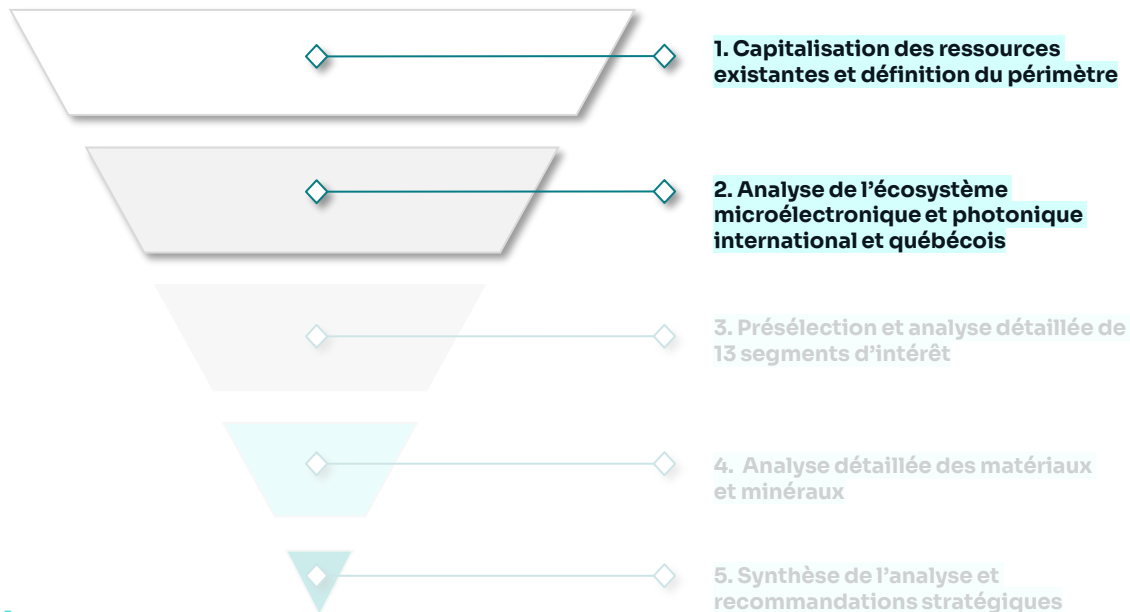
Étude des grandes tendances

- A. Tendances internationales
- B. Tendances québécoises
- C. Impacts sur la suite de l'étude

Étude des grandes tendances | Rappel des enjeux et objectifs

L'objectif principal de cette étape est de **mieux positionner et comprendre la place du Québec dans l'écosystème microélectronique/photonique mondial**. Il s'agit de structurer une vision globale des dynamiques technologiques et industrielles, de définir le périmètre pour les analyses approfondies, et d'identifier 13 segments à fort potentiel, en tenant compte de ses expertises et capacités industrielles.

Lien avec la méthodologie d'ensemble



PRINCIPAUX ENJEUX

- > Réaliser une analyse **suffisamment approfondie pour éclairer une première priorisation**, tout en évitant de s'enliser dans des détails superflus.
- > **Ancrer l'analyse dans la réalité terrain** en échangeant directement avec les acteurs du secteur.



PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE

- > Périmètre géographique - **International, Canada, Québec**
- > Périmètre sectoriel - **L'ensemble des chaînes de valeur de la microélectronique et photonique**

Analyse des tendances | Aide à la lecture

La revue documentaire d'une centaine de rapports/papiers, ainsi que les premiers entretiens ont **permis d'identifier 44 grandes tendances**, tant à l'international qu'au Québec, autour de la microélectronique et de la photonique. La section suivante **présente sous forme synthétique 12 de ces tendances**, retenues pour leur pertinence et leur apport stratégique à la suite de l'étude.

Grandes tendances/observations
révélées par la revue documentaire
et/ou les entretiens

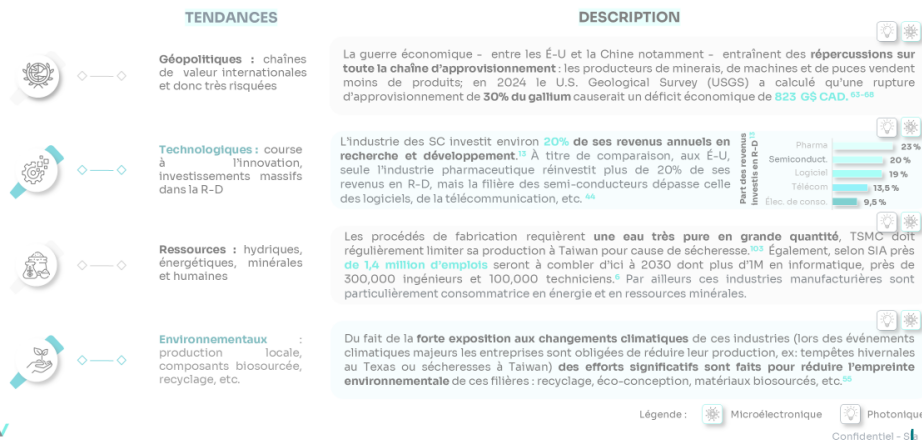
Description de l'idée et analyse de plusieurs
données/idées clés reliées

22

Analyse des tendances | Vision synthétique (1/3)

Vision synthèse

Aide à la
navigation



SIA

Légende permettant de distinguer les tendances spécifiques à la microélectronique, la photonique ou aux deux secteurs

Analyse des tendances | Vision synthétique (1/3)

TENDANCES



Géopolitiques : chaînes de valeur internationales et donc très risquées



Technologiques : course à l'innovation, investissements massifs dans la R-D



Ressources : hydriques, énergétiques, minérales et humaines



Environnementaux : production locale, composants biosourcée, recyclage, etc.

DESCRIPTION

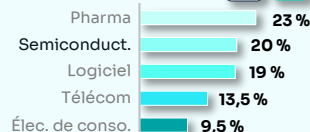


La guerre économique - entre les É-U et la Chine notamment - entraînent des **répercussions sur toute la chaîne d'approvisionnement** : les producteurs de minerais, de machines et de puces vendent moins de produits; en 2024 le U.S. Geological Survey (USGS) a calculé qu'une rupture d'approvisionnement de **30% du gallium** causerait un déficit économique de **823 G\$ CAD**.⁶³⁻⁶⁸



L'industrie des SC investit environ **20% de ses revenus annuels en recherche et développement**.¹³ À titre de comparaison, aux É-U, seule l'industrie pharmaceutique réinvestit plus de 20% de ses revenus en R-D, mais la filière des semi-conducteurs dépasse celle des logiciels, de la télécommunication, etc.⁴⁴

Part des revenus investis en R-D¹³



Les procédés de fabrication requièrent **une eau très pure en grande quantité**, TSMC doit régulièrement limiter sa production à Taiwan pour cause de sécheresse.¹⁰³ Également, selon SIA près de **1,4 million d'emplois** seront à combler d'ici à 2030 dont plus d'1M en informatique, près de 300,000 ingénieurs et 100,000 techniciens.⁶ Par ailleurs ces industries manufacturières sont particulièrement consommatrice en énergie et en ressources minérales.



Du fait de la **forte exposition aux changements climatiques** de ces industries (lors des événements climatiques majeurs les entreprises sont obligées de réduire leur production, ex: tempêtes hivernales au Texas ou sécheresses à Taiwan) **des efforts significatifs sont faits pour réduire l'empreinte environnementale** de ces filières : recyclage, éco-conception, matériaux biosourcés, etc.⁵⁵

Légende :



Microélectronique



Photonique

Analyse des tendances | Vision synthétique (2/3)

TENDANCES



Restrictions d'exportations sur les MCS : des impacts concrets déjà observés



Les **MCS du Québec** sont utilisées dans des produits clés de ces secteurs



Des tensions se manifestent au niveau des **équipements manufacturiers**



Les composants pour les **applications de défense et militaires** font face à des tensions croissantes

DESCRIPTION



En août 2023, la Chine a imposé **des restrictions d'exportations sur le gallium et le germanium**. **98%** de la production de gallium raffiné provient de Chine ainsi que **68%** du germanium.⁶³⁻⁶⁸ Début 2025, 5 nouveaux minéraux critiques font l'objet d'un **contrôle à l'export** depuis la Chine: **tungstène, tellure, bismuth, indium et molybdène**.⁷²



Le Québec exploite ou transforme déjà **plusieurs MCS nécessaires pour la microélectronique et la photonique** (indium – uniquement raffinage, niobium, palladium, etc.). Quelques projets pilotes pourraient également accroître le potentiel du Québec, à titre d'exemple à l'usine d'alumine de Vaudreuil (Rio Tinto) un projet de valorisation du gallium est en cours. *Ces éléments sont détaillés dans la section 4. « MCS et Matériaux critiques ».*



En 2023, les États-Unis ont renforcé, avec l'aide de l'UE, du Japon et d'autres acteurs majeurs, les restrictions d'exportations d'équipements avancés de fabrication de puces, impactant directement des entreprises chinoises comme Huawei et SMIC. À titre d'exemple, en 2023, le Japon a restreint l'exportation de **23 types de machines de production de semi-conducteurs** vers la Chine.⁶³⁻⁶⁸



ITAR impose des restrictions sur l'exportation de technologies liées à la défense, y compris certains **semi-conducteurs et équipements de fabrication**. Cela limite les échanges internationaux avec des pays considérés comme des "risques pour la sécurité nationale É-U.". Les tensions géopolitiques exacerbées par ITAR, ainsi que le cadre complexe lié à la conformité ITAR, poussent certains pays à **développer des alternatives "ITAR-free"** pour réduire leur dépendance.⁸⁰

Légende :



Microélectronique



Photonique

Analyse des tendances | Vision synthétique (3/3)

TENDANCES



Des MCS comme sous-produits de l'exploitation de minerais principaux



Le Québec a un **grand potentiel** à exploiter



Le recyclage est nécessaire pour diversifier les approvisionnements



L'absence d'un **cadre réglementaire** qui supporte le recyclage

DESCRIPTION



La majorité MCS indispensables à la fabrication des composants avancés (gallium, germanium, indium, tantale, tellure etc.), sont **des sous-produits de l'extraction et de la transformation** d'autres minerais : zinc, aluminium, cuivre etc.⁷⁹ Ce qui les rend dépendant de la demande/offre de ces minerais principaux.



La province possède de nombreuses ressources, avec notamment un **potentiel intéressant pour la production de gallium et de germanium** grâce aux activités de transformation du zinc/aluminium sur son territoire.⁷⁹ Néanmoins, ces minerais ne sont pas toujours exploités du fait **d'une rentabilité économique encore à déterminer**. Par ailleurs, il arrive que des minerais transformés au Québec **ne soient pas issus d'une extraction québécoise, et inversement** – entraînant une perte de valeur.⁷⁹



Le recyclage des composants électroniques nécessite encore de passer à l'échelle avec notamment des **infrastructures adaptées** – impliquant des investissements importants, et **une chaîne de valeur repensée** pour faciliter le recyclage dès la conception des produits afin de faciliter leur collecte, traitement et la récupération des matériaux stratégiques. De plus, l'absence d'un **modèle d'affaires rentable** freine son adoption par les entreprises.^{38,79}



Actuellement, au Québec, bien que les sous-produits miniers soient considérés comme des ressources minérales, **certains résidus de production sont classés comme «déchets»** – ce qui complique leur transport et leur réutilisation. Par exemple : les boues anodiques issues du raffinage du cuivre contiennent du tellure et du sélénium, mais sont classées comme déchets dangereux, rendant leur valorisation difficile.⁷⁹

Légende :



Microélectronique



Photonique

03

Étude détaillée des segments

- A. Présélection et catégorisation des 13 segments
- B. Analyse approfondie des segments

L'objectif de cette phase est **de sélectionner et d'étudier finement les segments les plus prometteurs**. L'idée est d'effectuer une analyse approfondie afin de **mieux caractériser les technologies, enjeux de R&D, structures et perspectives de marchés, l'environnement compétitif** etc. afin d'éclairer les choix de positionnement stratégique pour le Québec.

The diagram illustrates a five-step process for resource capitalization and analysis, represented by a funnel that narrows from top to bottom. Each step is connected to a diamond-shaped icon by a horizontal line. The steps are:

- 1. Capitalisation des ressources existantes et définition du périmètre**
- 2. Analyse de l'écosystème microélectronique et photonique international et québécois**
- 3. Présélection et analyse détaillée de 13 segments d'intérêt**
- 4. Analyse détaillée des matériaux et minéraux**
- 5. Synthèse de l'analyse et recommandations stratégiques**

PRINCIPAUX ENJEUX

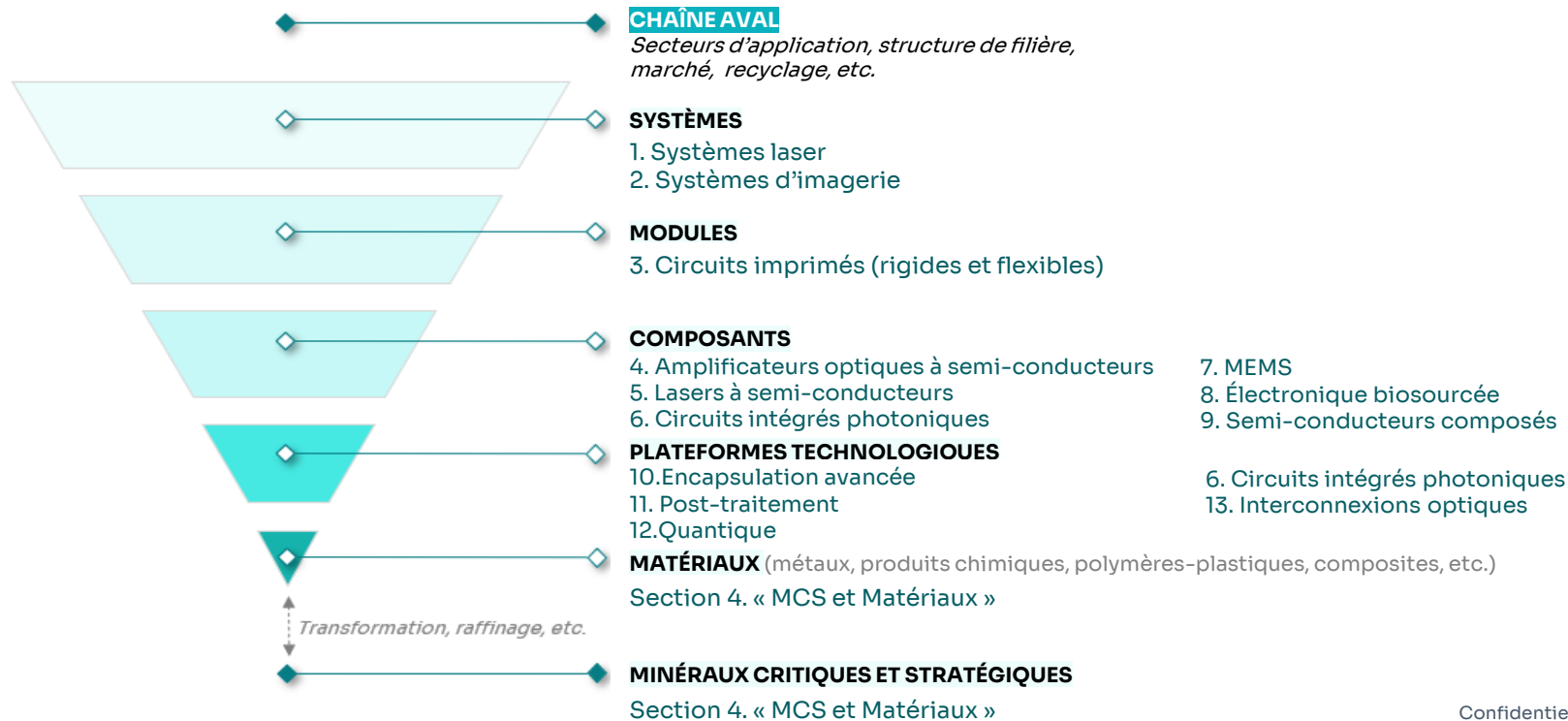
- > Explorer l'information sectorielle en profondeur, pour en **extraire uniquement les éléments à forte valeur ajoutée.**
- > **Croiser les résultats d'analyse avec la réalité exprimée par les acteurs industriels du milieu** afin de consolider ou réorienter les principaux résultats.



- > Périimètre géographique - International, Canada, Québec.
- > Périimètre sectoriel - Les 13 segments sélectionnés.

Sélection des segments d'intérêt | 13 segments retenus

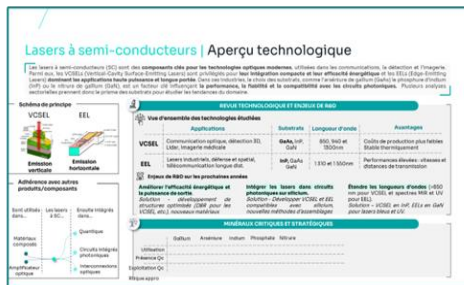
En s'appuyant sur les tendances internationales et québécoises ainsi que sur des entretiens avec des experts du secteur, **13 segments ont été retenus en raison de leur pertinence pour le Québec et de leur alignement avec les forces existantes.** Ils ont ensuite été analysée en détail pour décèler les occasions d'affaires pour le Québec.



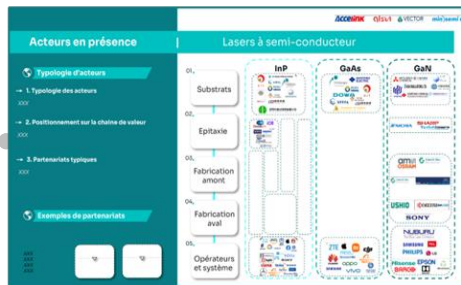
Analyse détaillée des segments | Prismes d'étude

CHACUN DES 13 SEGMENTS A ÉTÉ ANALYSÉ SUIVANT 4 ANGLES D'ÉTUDE :

1. Aperçu technologique



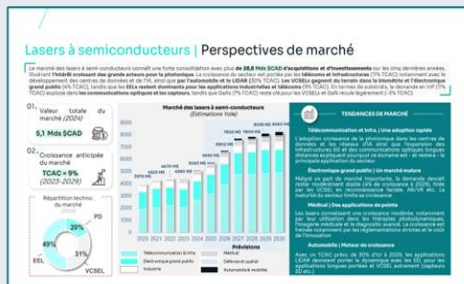
3. Acteurs en présence



Ces éléments sont détaillés pour l'ensemble des 13 segments.

Des analyses complémentaires portant sur **les perspectives de marché et le positionnement du Québec** sont regroupées en fin de section. (voir ci-bas)

2. Perspectives de marchés



4. Positionnement du Québec



Afin d'offrir une vision d'ensemble **concise et synthétique**, ces angles d'analyse ont été retravaillés et condensés en 4 diapositives pour l'ensemble des segments. Ils viennent clôturer la section.

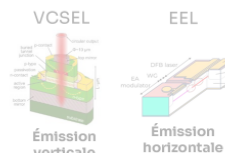
Fiches techniques par segment | Contenu et aide à la lecture 1/2

Description globale des enjeux

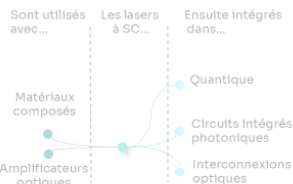
Lasers à semi-conducteurs | Aperçu technologique

Les lasers à semi-conducteurs (SC) sont des composants clés pour les technologies modernes, utilisées dans les communications, la détection et l'imagerie. Parmi eux, les VCSELs (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers) sont privilégiés pour leur intégration compacte et leur efficacité énergétique et les EELs (Edge-Emitting Lasers) dominent les applications haute puissance et longue portée. Dans ces industries, le choix des substrats, comme l'arséniure de gallium (GaAs) le phosphure d'indium (InP) ou le nitrure de gallium (GaN), est un facteur clé influençant la performance, la fiabilité et la compatibilité avec les circuits photoniques. Plusieurs analyses sectorielles prennent donc le prisme des substrats pour étudier les tendances du domaine.

Schéma de principe



Adhérences principales avec autres produits/composants



REVUE TECHNOLOGIQUE ET ENJEUX DE R&D



Vue d'ensemble des technologies étudiées

	Applications	Substrats	Longueur d'onde	Avantages
VCSEL	Communication optique, détection 3D, Lidar, imagerie médicale	GaAs, InP, GaN	600 à 1300 nm	Coûts de production plus faibles Stable thermiquement
EEL	Lasers industriels, défense et spatial, télécommunication longue dist.	InP, GaAs GaN, GaSb	400 à 3000 nm	Performances élevées : vitesses et distances de transmission



Enjeux de R&D sur les prochaines années

Améliorer l'efficacité énergétique et la puissance de sortie. <i>Solution - développement de structures optimisées (DBR pour les VCSEL, etc.), nouveaux matériaux</i>	Intégrer les lasers dans circuits photoniques sur silicium. <i>Solution - Développer VCSEL et EEL compatibles avec silicium, nouvelles méthodes d'assemblages</i>	Étendre les longueurs d'ondes (>850 nm pour VCSEL et spectres MIR et UV pour EEL). <i>Solution - VCSEL en InP, EELs en GaN pour lasers bleus et UV.</i>
---	---	--



PRINCIPAUX MINÉRAUX CRITIQUES/STRATÉGIQUES ET CHIMIE IMPLIQUÉS*

01 Substrats	02 Epitaxie	03 Fabrication amont	04 Fabrication aval
Matériaux de bases pour la croissance épitaxiale Ga As In P N Sb Al ₂ O ₃ Si C Si	Dépôt des couches actives et barrières H ₂ N ₂ AsH ₃ PH ₃ TMSb TMGa TMAI	Lithographie, gravure humide et sèche, nettoyage, métallisation, dopage SiH ₄ Se Te Zn Mg Be Au Ni Ge Ti Al Pt Pd H ₂ SO ₄ H ₂ O ₂ Cl ₂ BR ₂ SF ₆	Découpe, assemblage, encapsulation In Cu W Cu N ₂ Ar He Fe Ni Co

*Une analyse détaillée des tensions d'approvisionnement et du potentiel au Québec sera effectuée de manière transversale aux segments

Principaux minéraux critiques et stratégiques composant la technologie

Une analyse plus détaillée sera présentée dans la section 4. « MCS et Matériaux »

Confidentiel - Sia

Vision
schématique de
la technologie

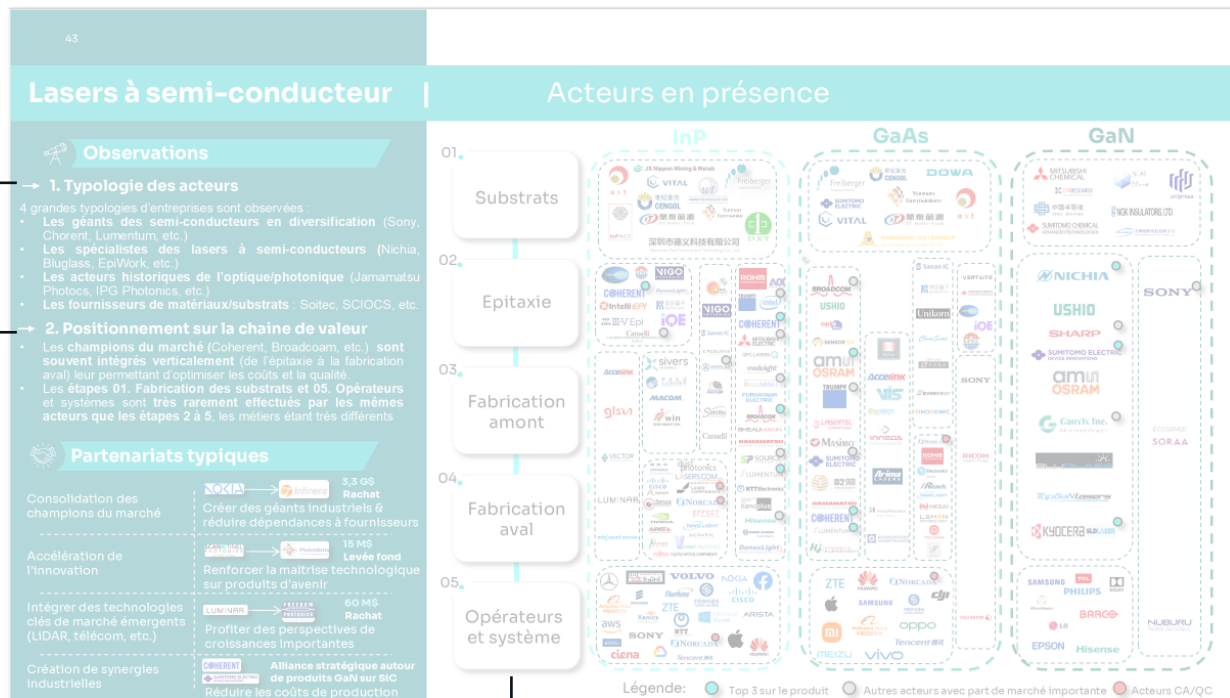
Revue des technologies et
enjeux de R-D associés
(Maturité, avantages, etc.)

Intégration et complémentarité
avec les autres segments

Fiches techniques par segment | Contenu et aide à la lecture 2/2

Typologie d'acteurs
en présence
(Cœur de métier,
etc.)

Positionnement sur
la chaîne de valeur
(verticalisation,
spécialisation, etc.)



Partenariats typiques
(Rachats, synergies industrielles, etc.)

Description fine des acteurs se positionnant sur la chaîne d'approvisionnement
(Composant, système, intégration, encapsulation, etc.)

Systèmes lasers | Vision d'ensemble

En 2024, le marché mondial des lasers atteint environ **20,5 G\$ CAD**. Les lasers à semi-conducteurs (VCSEL et diode notamment) sont en forte croissance portés par les communications optiques, l'IA, les capteurs 3D et les applications médicales. Les autres technologies (fibre, CO₂, excimère, disque, LPSSL) restent essentielles pour les usages industriels lourds (découpe, soudure, photolithographie), mais leur croissance est plus modérée, notamment pour les lasers CO₂ et excimères, confrontés à la maturité du marché et à la concurrence technologique.

Type de lasers	Description	Illustration	Applications principales	Avantages	Inconvénient	Part de marché	Évolution (G \$)		TCAC (2024-2029)
							2024	2029	
Diode (EEL)	Courant traverse jonction semi-conductrice générant un faisceau. Très répandu et modulable.		Télécom, détection, médecine, quantique	Compact, modulable, très répandu	Chauffe, puissance limitée par émetteur	24%	3.6	5.5	8,7%
Fibre	Fibre dopée pompée par diode produit un faisceau guidé, puissant et stable.		Industrie lourde, médical, détection	Efficace, peu de maintenance, haute puissance	Coût initial, sensible aux saletés	23%	3.5	4.3	4,2%
CO₂	Gaz CO ₂ excité électriquement dans un tube génère un faisceau IR continu ou pulsé.		Découpe, soudure, médical, lithographie	Robuste, faible coût, bon pour matériaux non métalliques	Alignement sensible, encombrement	17%	2.5	3.0	3,7%
DPSSL	Diode pompe un cristal dopé qui émet un faisceau cohérent. Précis et compact.		PCB, OLED, médecine ultrarapide	Précision, compacité, spectre varié	Coût modéré, refroidissement nécessaire	12%	1.8	2.6	7,2%
Excimère	Gaz halogène-noble excité par décharge haute tension produit des impulsions UV puissantes.		Photolithographie, écrans, ophtalmologie	Ultra-puissant en UV, idéal pour microfabrication	Encombrant, peu efficace, coûteux	9%	1.3	1.5	2,1%
VCSEL	Émet verticalement depuis une cavité Bragg intégrée à la surface d'une puce. Très compact et empilable.		Reconnaissance faciale, Lidar, RA/RV, électronique grand public	Faible consommation, intégration facile	Puissance unitaire faible, spectre limité	8%	1.1	2.0	11,6%
Disque	Disque mince dopé pompé par diodes, réfléchissant la lumière pour l'amplification. Refroidissement efficace.		Soudure auto, découpe fine, LMD	Bonne dissipation thermique, qualité de faisceau	Système optique complexe, coût élevé	4%	0.66	0.68	0,5%
LPSSL	Lampe excite un cristal dopé (ex : Nd:YAG), générant un faisceau visible ou IR. Utilisé en esthétique et sciences.		Dermatologie, capteurs, recherche	Conception simple, forte énergie impulsion	Maintenance élevée, durée de vie courte	3%	0.43	0.56	5,2%
Autres	Technologies diverses : colorants, peigne, QCL. Sources spécialisées pour spectroscopie, détection, quantique.		Détection gaz, spectroscopie, métrologie	Large spectre, niches scientifiques	Coût élevé, marché limité	1%	0.20	0.28	6,6%

Systèmes lasers | Zoom sur les lasers non semi-conducteurs

Les lasers non semi-conducteurs (CO₂, fibre, excimère, disque) **sont principalement utilisés dans l'industrie lourde** (découpe, soudage, marquage), la photolithographie, la défense et la recherche. **Leurs marchés sont stables ou matures, avec une croissance plus lente que les technologies émergentes** à base de semi-conducteurs. Dans ce secteur le **Québec est bien positionné sur les lasers à fibre**, notamment pour des applications dans la recherche, les télécoms et le traitement de matériaux et des acteurs spécialisés (MPB, Coractive, etc.).

Applications	Description	Fibre	CO ₂	DPSSL	Excimère	Disque	LPSSL	Autres
Traitement de matériaux à haute puissance (kW)	Découpe et soudage de métaux épais dans des secteurs tels que l'automobile et la construction navale.	X	X			X		
Traitement de matériaux à faible puissance	Traitement de matériaux fins (films, plastiques, céramiques), composants médicaux (stents, implants).	X	X	X	X	X	X	X
Marquage et gravure	Gravure sur métal, plastique, cuir ; marquage d'emballages, de composants, ou de produits de luxe	X	X	X				
Photolithographie	Gravure de circuits intégrés dans les procédés de lithographie EUV/DUV en microélectronique.		X		X			
Pompage optique	Source de pompage pour des lasers complexes (ex. lasers femtosecondes, Ti:saphire).							
Aérospatial et défense	Armes à énergie dirigée, désignation de cibles, télémétrie, capteurs militaires	X		X		X	X	X
Recherche et développement (R-D)	Recherche fondamentale et appliquée (physique, chimie, biologie, optique non linéaire, rayons X, diagnostics avancés).	X	X			X		X
Médecine et esthétique	Dermatologie (épilation, traitement des lésions vasculaires), ophtalmologie, dentisterie, chirurgie laser.	X	X	X	X		X	X



QUELQUES ACTEURS QC

MPB Communications - Fabrique des lasers à fibre et amplificateurs optiques. Marchés : télécom longue distance, spatial. Spécialisé dans la stabilité spectrale et la robustesse en environnements critiques.

Oselà - Conçoit des modules lasers visibles pour la vision industrielle et la métrologie. Spécialiste de la projection structurée et de l'alignement lasers en environnements manufacturiers.

ITF Technologies - Fournisseur de composants pour lasers à fibre (FBG, séparateurs). Marchés : télécommunications, intégrateurs OEM. Forte capacité de personnalisation optique passive et active.

Coractive - Fabrique des fibres dopées et lasers à fibre CW/pulsés. Marchés : traitement de matériaux et recherche. Intégration verticale avec une expertise en fibres actives.

Femtum - Développe des lasers à fibre optique spécialisés pour applications semi-conducteurs (nettoyage, correction). Cible des marchés en photonique intégrée (SiN, TFLN, IA, centres de données).

Dans la suite de l'étude, une emphase particulière sera mise sur les lasers à semi-conducteurs - ils ciblent des marchés en forte croissance et à haute valeur technologique, tandis que les systèmes industriels (CO₂, excimère...) sont plus matures, standardisés et moins dynamiques.

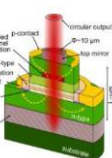
Lasers à semi-conducteurs | Aperçu technologique

Les lasers à semi-conducteurs (SC) sont des **composants clés pour les technologies modernes**, utilisées dans les communications, la détection et l'imagerie. Parmi eux, les VCSELs (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers) sont privilégiés pour **leur intégration compacte et leur efficacité énergétique** et les EELs (Edge-Emitting Lasers) **dominent les applications haute puissance et longue portée**. Dans ces industries, le choix des substrats, comme l'arséniure de gallium (GaAs) le phosphore d'indium (InP) ou le nitrure de gallium (GaN), est un facteur clé influençant **la performance, la fiabilité et la compatibilité avec les circuits photoniques**. Plusieurs analyses sectorielles prennent donc le prisme des substrats pour étudier les tendances du domaine.

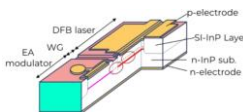
Schéma de principe

VCSEL

EEL

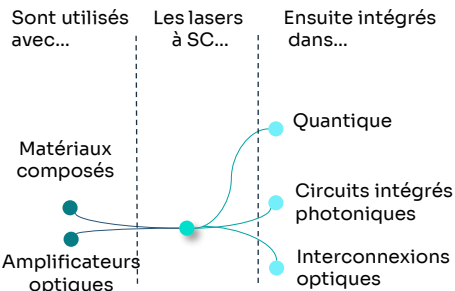


Émission
verticale



Émission
horizontale

Adhérences principales avec autres segments



REVUE TECHNOLOGIQUE ET ENJEUX DE R-D



Vue d'ensemble des technologies étudiées

	Applications	Substrats	Longueur d'onde	Avantages
VCSEL	Communication optique, détection 3D, LiDAR, imagerie médicale	GaAs, InP, GaN	600 à 1300 nm	Coûts de production plus faibles Stable thermiquement
EEL	Lasers industriels, défense et spatial, télécommunication longue distance	InP, GaAs GaN, GaSb	400 à 3000 nm	Performances élevées : vitesses et distances de transmission



Enjeux de R-D sur les prochaines années

Améliorer l'efficacité énergétique et la puissance de sortie.

Solution - développement de structures optimisées (DBR pour les VCSEL, etc.), nouveaux matériaux

Intégrer les lasers dans circuits photoniques sur silicium.

Solution - Développer VCSEL et EEL compatibles avec silicium, nouvelles méthodes d'assemblage

Étendre les longueurs d'ondes (>850 nm pour VCSEL et spectres MIR et UV pour EEL).

Solution - VCSEL en InP, EELs en GaN pour lasers bleus et UV.

PRINCIPAUX MINÉRAUX ET MATÉRIAUX REQUIS*



01.

Substrats

Matériaux de base pour la croissance épitaxiale

Ga | As | In | P | N | Sb
Al₂O₃ | Si | C | Si

02.

Epitaxie

Dépôt des couches actives et barrières

H₂ | N₂ | AsH₃ | PH₃
TMSb | TMGa | TMAI,

03.

Fabrication amont

Lithographie, gravure humide et sèche, nettoyage, métallisation, dopage

SiH₄ | Se | Te | Zn | Mg | Be
Au | Ni | Ge | Ti | Al | Pt | Pd
H₂SO₄ | H₂O₂ | Cl₂ | Br₂ | SF₆

04.

Fabrication aval

Découpe, assemblage, nettoyage, métallisation, dopage

In | Cu | W | Cu | N₂
Ar | He | Fe | Ni | Co

~ Légende ~
Très critique
Moyennement ou peu critique

Lasers à semi-conducteurs

Principaux acteurs en présence (liste non exhaustive)



Observations

→ 1. Typologie des acteurs

- Les géants des semi-conducteurs en diversification (Sony, Chorent, Lumentum, etc.).
- Les spécialistes des lasers à semi-conducteurs (Nichia, Bluglass, EpiWork, etc.).
- Les acteurs historiques de l'optique/photonique (Jamamatsu Photocs, IPG Photonics, etc.).
- Les fournisseurs de matériaux/substrats : Soitec, SCIOCS, etc.

→ 2. Positionnement sur la chaîne de valeur

- Les champions du marché (Coherent, Broadcoam, etc.) sont souvent intégrés verticalement (de l'épitaie à la fabrication aval) leur permettant d'optimiser les coûts et la qualité.
- Les étapes 01. Fabrication des substrats et 05. Opérateurs et systèmes sont très rarement effectués par les mêmes acteurs que les étapes 2 à 4, les métiers étant très différents.



Partenariats typiques

Consolidation des champions du marché

NOKIA → **Infineon** 3,3 G\$
Rachat
Créer des géants industriels et réduire dépendances à fournisseurs

Accélération de l'innovation

SCANLITECH → **Photonics** 15 M\$
Levée fond
Renforcer la maîtrise technologique sur les produits d'avenir

Intégrer des technologies clés de marchés émergents (LiDAR, télécom, etc.)

LUMINAR → **FREEM** 60 M\$
Rachat
Profiter des perspectives de croissance importantes

Création de synergies industrielles

COHERENT → **ALLIANCE**
Alliance stratégique autour de produits GaN sur SiC
Réduire les coûts de production

01.

Substrats

02.

Épitaie

03.

Fabrication amont

04.

Fabrication aval

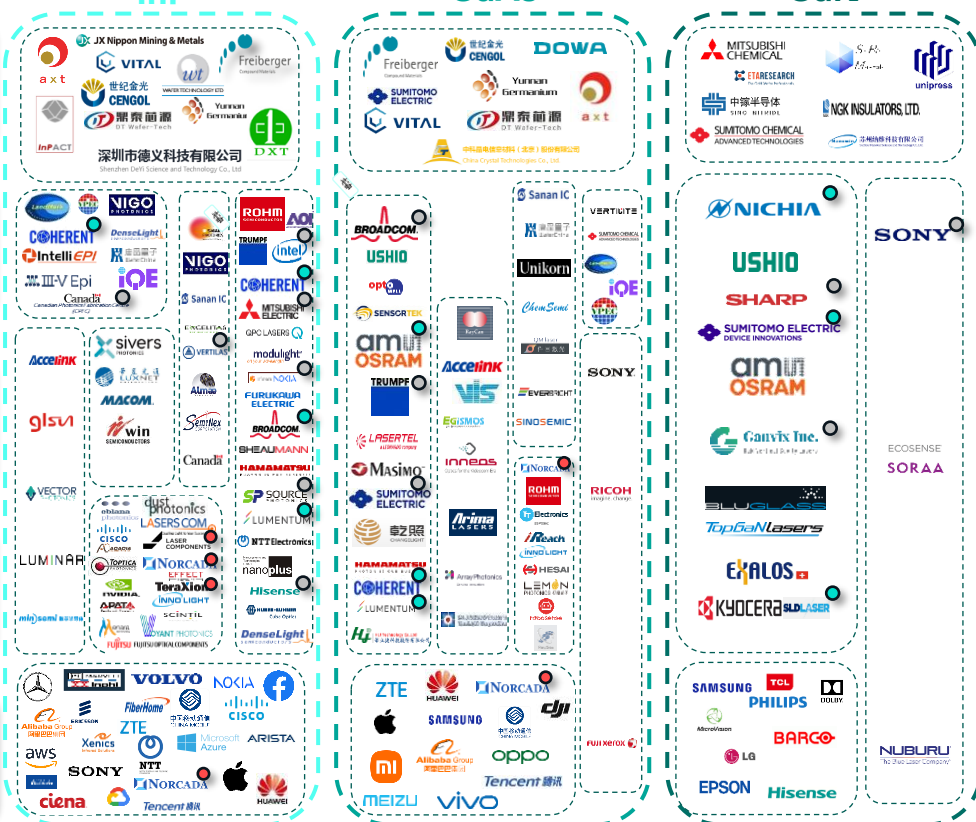
05.

Opérateurs et système

InP

GaAs

GaN



Légende:

● Top 3 sur le produit

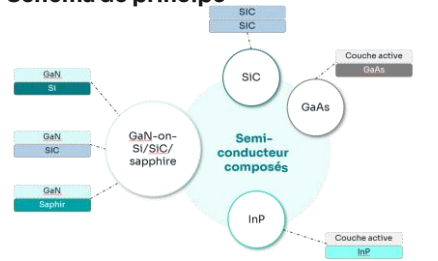
● Autres acteurs avec part de marché importante

● Acteurs CA/QC

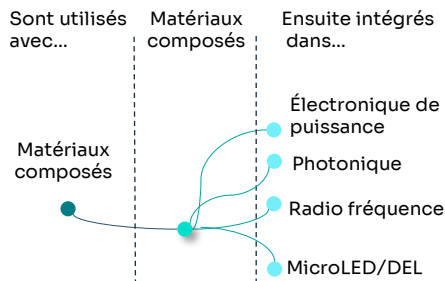
Semi-conducteurs composés | Aperçu technologique

La course à la performance dans l'industrie des semi-conducteurs **pousse à une innovation continue**. À l'échelle des matériaux, les semi-conducteurs composés permettent d'améliorer les performances de composants dans diverses filières historiquement basées sur le silicium. **Certains matériaux composés, comme le GaAs ou le GaN, ne sont pas nouveaux**. Le GaAs a été adopté depuis des décennies dans les secteurs de la radiofréquence et de la photonique. Le GaN sur saphir a connu une adoption massive pour les LED et a également été introduit ces 20 dernières années dans le domaine de la radiofréquence, notamment sous forme de GaN sur SiC, d'abord pour des applications de défense, puis dans les télécommunications. Plus récemment, **les matériaux, comme le SiC et le GaN sur silicium**, permettent des innovations majeures dans le secteur de la puissance et promettent une adoption importante dans les années à venir.

Schéma de principe



Adhérences principales avec autres segments



REVUE TECHNOLOGIQUE ET ENJEUX DE R-D

Applications	Couche active GaAs	Couche active InP	GaN Saphir	GaN SiC	GaN Si	SiC SiC	Couche active GaN
Photonique							
EEL							
VCSEL							
LED							
Écran et lumière							
RF							
Puissance							

LÉGENDE



En production



En développement



Application principale de ce matériau parmi les autres SC composés établis.

PRINCIPAUX MINÉRAUX ET MATÉRIAUX REQUIS*

01. Substrats	02. Epitaxie	03. Fabrication amont	04. Fabrication aval
Matériaux de base pour la croissance épitaxiale	Dépôt des couches actives et barrières	Lithographie, gravure humide et sèche, nettoyage, métallisation, dopage	Découpe, assemblage, encapsulation
Ga As In P N Sb Al ₂ O ₃ Si C Si	H ₂ N ₂ AsH ₃ PH ₃ TMSb TMGa TMAI	SiH ₄ Se Te Zn Mg Be Au Ni Ge Ti Al Pt Pd H ₂ SO ₄ H ₂ O ₂ Cl ₂ Br ₂ SF ₆	In Cu W Cu N ₂ Ar He Fe Ni Co

Légende

Très critique

Moyennement ou peu critique

Semi-conducteurs composés | Principaux acteurs en présence *(liste non exhaustive)*



Observations

Les **4 grandes typologies d'acteurs** que l'on retrouve sur le segment sont :

- **Les acteurs intégrés verticalement** (Wolfspeed, etc.) – produisent eux-mêmes leurs substrats et visent l'autosuffisance, particulièrement pour l'électronique de puissance SiC. Peuvent également fournir le substrat à des tiers.
- **Les fournisseurs dédiés aux substrats** spécialisés ou semi-spécialisés - Certains comme Sumitomo couvrent plusieurs matériaux (GaAs, Inp, SiC) et d'autres plus spécialisés (Freiberger en InP).
- **Les épitaxistes évoluant vers les substrats** (IQE, Soitec, etc.) – Capturent plus de valeur en amont en fournissant des tranches complètes.
- **Les fabricants de dispositifs** (non représentés) dépendent de fournisseurs tiers – Ne produisent pas les substrats eux-mêmes et se concentrent sur la conception et la fabrication de modules finis.



Partenariats typiques

Sécuriser les approvisionnements



115M\$
Accord

Signe un accord d'approvisionnement de 110 M\$ pour la période 2024-2026 avec un acteur chinois



1140 M\$
Rachat

Rachat de GaN system par Infineon



Alliance stratégique autour de produits GaN



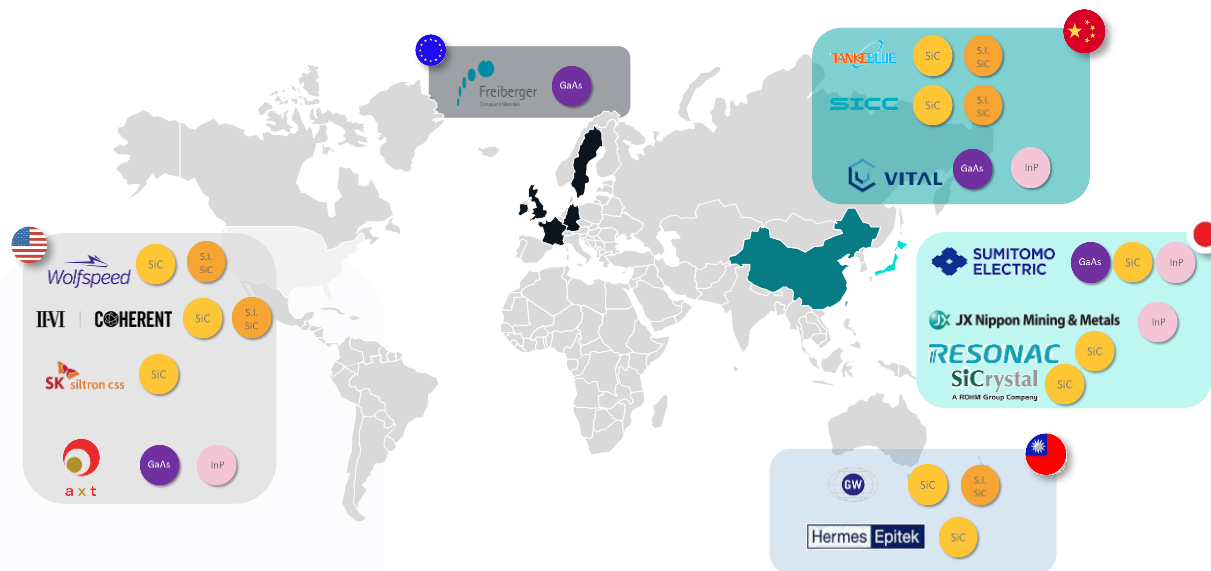
Réduire les coûts de production

Création de synergies industrielles

Principaux producteurs de substrats au niveau international

Cette cartographie présente les principaux acteurs mondiaux impliqués dans la production de **substrats cristallins** pour les semi-conducteurs composés **SiC**, **GaAs** et **InP**.

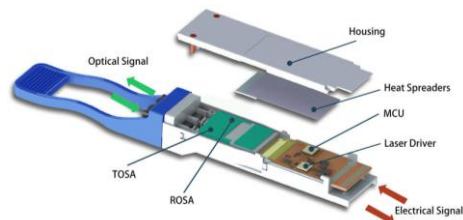
L'accent est mis ici sur la partie **amont de la chaîne d'approvisionnement**, car les étapes plus en aval telles que la croissance épitaxiale, la fabrication des composants actifs ou encore l'intégration dans des circuits et modules sont abordées en détail dans d'autres segments de cette analyse sectorielle.



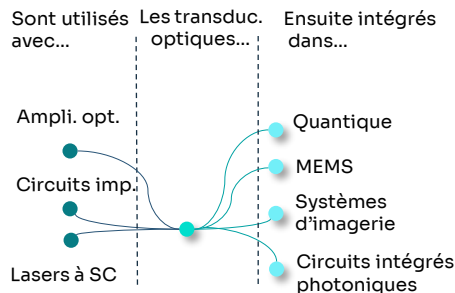
Transducteurs optiques | Aperçu technologique

En convertissant l'électricité en lumière et vice versa, les transducteurs optiques sont des composants essentiels à la transmission de données à très haut débit – représentant une caractéristique clé des infrastructures numériques : des télécommunications, aux centres de données (DataCom), en passant par les composants matériels. Dans le secteur des télécommunications, elles répondent à des besoins de transmission longue distance (jusqu'à >100 km), **avec des technologies cohérentes et complexes**. À l'inverse, les DataCom se concentrent sur les échanges à **courte portée, en forte croissance avec le développement de l'IA et des infrastructures de données**. Le marché du télécom. Étant plus stable et plus mature, **l'analyse se concentrera sur le domaine porteur du DataCom**.

Schéma de principe



Adhérences principales avec autres segments



REVUE TECHNOLOGIQUE ET ENJEUX DE R-D



Vue d'ensemble des technologies étudiées

	Interfaçages optiques	Cables optiques actifs (AOC)	Éthernet	Fibre chez l'abonné	Sans fil	Multi/Dépexage en longueur d'onde
Applications	Carte à carte ou puce à puce	Intra-baie	Inter-baie	Accès fibre jusqu'à l'abonné	Réseau 5G/6G	Réseau télécom longue distance
Portée	1 - 3 cm	3 - 50 m	50m - 10 km	< 100 km	10 - 200 km	100 - 800 km
Lasers	CW-DFB	VCSEL / CW-DFB	EML / DML / CW-DFB	DML / EML	EML	Basé sur InP



Enjeux de R-D sur les prochaines années

Réduire la consommation énergétique globale

Solution - Optique linéaire (LPO), pour limiter la consommation de la puce numérique de traitement du signal nouveaux matériaux plus efficaces (TFLN, BTO).

Réduire la latence et simplifier l'intégration.

Solution - Développement de co-intégration optique (CPO) et les interfaces optiques intégrés pour réduire distances à qq cm.

Atteindre des débits supérieurs à 200G/ligne

Solution - Optimisation du signal sur canal (SerDes 224G), lasers EML/CW-DFB optimisés, innovations sur encapsulation.

PRINCIPAUX MINÉRAUX ET MATÉRIAUX REQUIS*

01.

Composants photoniques

Lasers, TOSA, ROSA, Connecteurs, etc.

Similaires à lasers à semi-conducteurs
Ga | As | In | P | Ge Al₂O₃ | Si | C | Si

02.

Composants électroniques

DSP, TIA, Pilote LD, LA, etc.

Si | **Y | Ge | Er** | Cu | **Au | Sb | Se** | S |
 Hf | **Ni | Co** | H₂SO₄ | S | Cl₂ | BR₂ |
 SF₆

03.

Transducteurs optiques

Intégration pour solution finale

Al | N | F | Cu | N₂ Ar
 | **He** | Fe | **Ni | Co**

~ Légende ~

Très critique
 Moyennement
 ou peu critique

Transducteurs optiques



Observations

→ 1. Typologie des acteurs

- Les champions complètement intégrés (Coherent, Broadcom, Lumentum, AOI, etc.)
- Les spécialistes de sous-ensembles actifs et passifs - Acteurs clés de la production de sous-systèmes, souvent en co-traitance
- Les fournisseurs de composants élémentaires spécialisés (lasers, photodétecteurs)
- Les assembleurs/intégrateurs – Souvent sous marque blanche

→ 2. Positionnement sur la chaîne de valeur

- Les acteurs majeurs (Coherent, Lumentum, etc.) **intègrent l'ensemble de la chaîne de valeur** afin d'optimiser les coûts, accélérer la mise sur le marché et consolider leur position sur les marchés stratégiques. Cela permet également de maintenir une certaine opacité sur les étapes de fin de procédé et de test, préservant ainsi leur souveraineté technologique
- Les plus petits fournisseurs se concentrent sur la conception et l'innovation en abandonnant les étapes à faibles marges (ex: assemblage et test <20% de marge)



Partenariats typiques

Consolidation des champions du marché



Accès à de nouveaux marchés verticaux



Synergies autour de plateformes mixtes



Principaux acteurs en présence (liste non exhaustive)

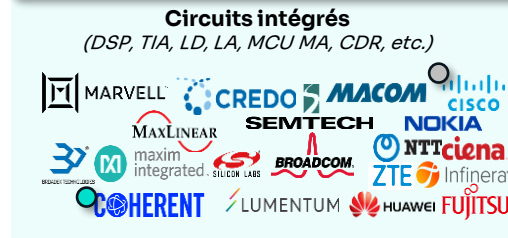
01.

Composants optiques



02.

Composants électroniques



03.

Intégration transducteurs optiques



Légende:

● Top 3 sur le produit

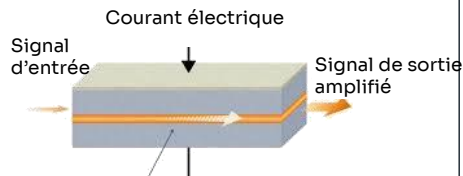
● Autres acteurs avec part de marché importante

● Acteurs CA/QC

Amplificateurs optiques à SC | Aperçu technologique

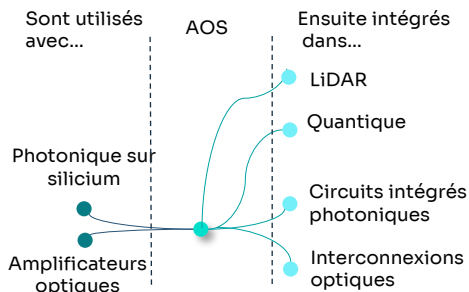
Un amplificateur optique à semi-conducteurs est un **dispositif optoélectronique** généralement basé sur **matériaux semi-conducteurs composés GaAs ou InP** ayant pour principe **d'amplifier un signal lumineux sans conversion en signal électrique**. Grâce aux propriétés physiques du GaAs ou de l'InP, lorsque le courant est injecté, l'émission de photons est stimulée amplifiant ainsi le signal. Ce dispositif est utilisé notamment pour **la télécommunication avec l'amplification de signaux dans les réseaux de fibre optique, la photonique intégrée et les systèmes de détection comme le LiDAR**.

Schéma de principe



Amplificateur optique à semi-conducteurs

Adhérences principales avec autres segments



REVUE TECHNOLOGIQUE ET ENJEUX DE R-D



Vue d'ensemble des technologies étudiées

	Longueur d'onde	Applications	Substrats	Avantages
Amplification par émission stimulée	1200–1700 nm	Télécommunications (réseaux à fibre optique)	InP	Large bande passante, compatible avec les réseaux WDM. Enjeu : réduire le bruit
Utilisation de puits quantiques	1300–1550 nm	Photonique intégrée	InGaAs/InP/GaAs	Gain élevé, faible consommation pour les applications intégrées.
Polarisation contrôlée	850–980 nm (LiDAR, capteurs 3D)	Systèmes LiDAR (détection et télémétrie)	GaAs	Compact, intégrable dans des systèmes optoélectroniques comme le LiDAR.



Enjeux de R-D sur les prochaines années

Réduction du bruit et amélioration du gain

Solutions - Optimiser la conception des structures à puits quantiques et les techniques de confinement pour maximiser le gain optique tout en réduisant le bruit et la distorsion de phase.

Polarisation et diaphonie

Solutions - La sensibilité à la polarisation et la diaphonie dans les applications multibandes (ex. LiDAR, WDM) nécessitent des conceptions avancées pour stabiliser les performances.

Bande passante

Solution - Pour les réseaux 5G/6G, les AOS doivent couvrir des bandes plus larges - ce qui implique des innovations dans les matériaux et les structures.

PRINCIPAUX MINÉRAUX ET MATÉRIAUX REQUIS*

01.

Substrats

Matériaux de base pour la croissance épitaxiale

Ga | As | In | P | N | Sb
Al₂O₃ | Si | C | Si | Zn | S

02.

Épitaxie

Dépôt des couches actives et barrières

H₂ | N₂ | AsH₃ | PH₃
TMSb | TMGa | TMAI

03.

Fabrication amont

Lithographie, gravure humide et sèche, nettoyage, métallisation, dopage

SiH₄ | Se | Te | Zn | Mg | Be
Au | Ni | Ge | Ti | Al | Pt | Pd
H₂SO₄ | H₂O₂ | Cl₂ | Br₂ | SF₆

04.

Fabrication aval

Découpe, assemblage, encapsulation

In | Cu | W | Cu | N₂
Ar | He | Fe | Ni | Co

Légende

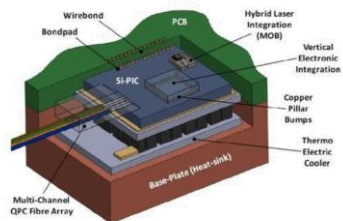
Très critique

Moyennement ou peu critique

Circuits intégrés photoniques | Aperçu technologique

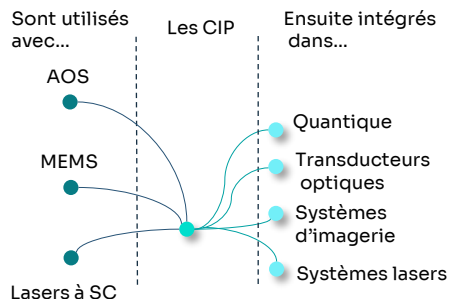
Les circuits intégrés photoniques (CIP) **intègrent sur une puce plusieurs composants optiques** (lasers, modulateurs, détecteurs, guides d'onde etc.) pour **traiter, transporter et analyser la lumière**. Contrairement aux circuits électroniques qui se basent sur des électrons, **ces circuits utilisent des photons, offrant faible latence, forte bande passante et faible consommation**. Basé sur des plateformes technologiques, chacun possède ses propres matériaux et caractéristiques : **SOI – compatible CMOS, InP – permet une intégration complète (en particulier des lasers) mais coûte cher, SiN – peu de perte mais sans modulation et LNOI – modulation rapide et efficace mais moins mature**. Leur adoption s'accélère avec la montée de l'IA, des centres de données et la capacité de les produire à plus grande échelle.

Schéma de principe



courtesy of Tyndall National Institute (Ireland) and SPIE

Adhérences principales avec autres segments



REVUE TECHNOLOGIQUE ET ENJEUX DE R-D



Vue d'ensemble des technologies étudiées

Plateformes technologiques

InP

SiN

SOI

LNOI

Blocs fonctionnels photoniques

LASERS

Lasers InP

MODULATEUR

Si MZ/MRM

TFLN

BTO

Polymère

EA InP modulateur

PHOTODIODE

SiGe

Ge

InGaAs

GUIDE D'ONDE

SiN

Si

SiO₂



Enjeux de R-D sur les prochaines années

Miniaturisation et densification des composants optiques

Solutions – Conception optimisée pour l'encapsulation, réduction de la surface de Si non utilisée, modulation haute efficacité et nouveaux matériaux (SiGe, BTO)

Montée en débit jusqu'à 200–400G/λ

Solutions – Intégration de modulateurs TFLN, BTO ou polymères sur SOI, optimisation SerDes 224G, optique co-encapsulée avec ELS pour dissiper la chaleur

Lenture du processus de caractérisation et test

Solutions – Développement de bancs de tests optiques, standardisation des interfaces optiques pour tests rapides, outils d'alignement actifs automatisés



PRINCIPAUX MINÉRAUX ET MATÉRIAUX REQUIS*

01.

Substrats

Matériaux de base pour la croissance épitaxiale

Ga | As | In | P | N | Sb
Al₂O₃ | Si | C | Si | LiNbO₃ | BaTiO₃ | Ge

02.

Epitaxie

Dépôt des couches actives et barrières

H₂ | N₂ | AsH₃ | PH₃
TMSb | TMGa | TMAI

03.

Fabrication amont

Lithographie, gravure humide et sèche, nettoyage, métallisation, dopage

SiH₄ | Se | Te | Zn | Mg | Be
Au | Ni | Ge | Ti | Al | Pt | Pd
H₂SO₄ | H₂O₂ | Cl₂ | Br₂ | SF₆

04.

Fabrication aval

Découpe, assemblage, encapsulation

In | Cu | W | Cu | N₂
Ar | He | Fe | Ni | Co

Légende

Très critique

Moyennement ou peu critique

Circuits intégrés photoniques | Principaux acteurs en présence *(liste non exhaustive)*



Observations

→ 1. Typologie des acteurs

- **Start-ups technologiques centrées sur les PIC** (Ayar Labs, Lightmatter, Xanadu) - Issues d'universités ou de spin-offs,
- **Fournisseurs de matériaux ou composants** (Soitec, IQE, Sumitomo Electric, AXT)
- **Fonderies**: Ligentec, TowerJazz, GlobalFoundries
- **Grands groupes télécom/optoélectroniques** (Lumentum, Coherent, Broadcom, Cisco, Huawei) - Groupes établis dans les composants optiques qui internalisent la conception ou la fabrication de PICs pour gagner en performance/coût
- **Spécialistes de la conception ou de la R-D collaborative** – (OpenLight, Luceda Photonics)

→ 2. Positionnement sur la chaîne de valeur

- Les acteurs majeurs (Coherent, Lumentum, etc.) **intègrent toute la chaîne de la conception à l'assemblage** pour contrôler les performances, les coûts et les délais et livrer des modules prêts à l'emploi
- Les **spécialistes technologiques** (IGE, PHIX, Openlight, etc.) se positionnent pour exceller sur un segment de la chaîne (conception, composant, etc.)



Partenariats typiques

Consolidation des champions du marché

 →  6,1 G\$ Rachat

Maîtriser l'intégration photonique avancée (cohérente)

Co-développement de solutions en se basant sur les expertises de chacun

 →  n.d. Partenariat

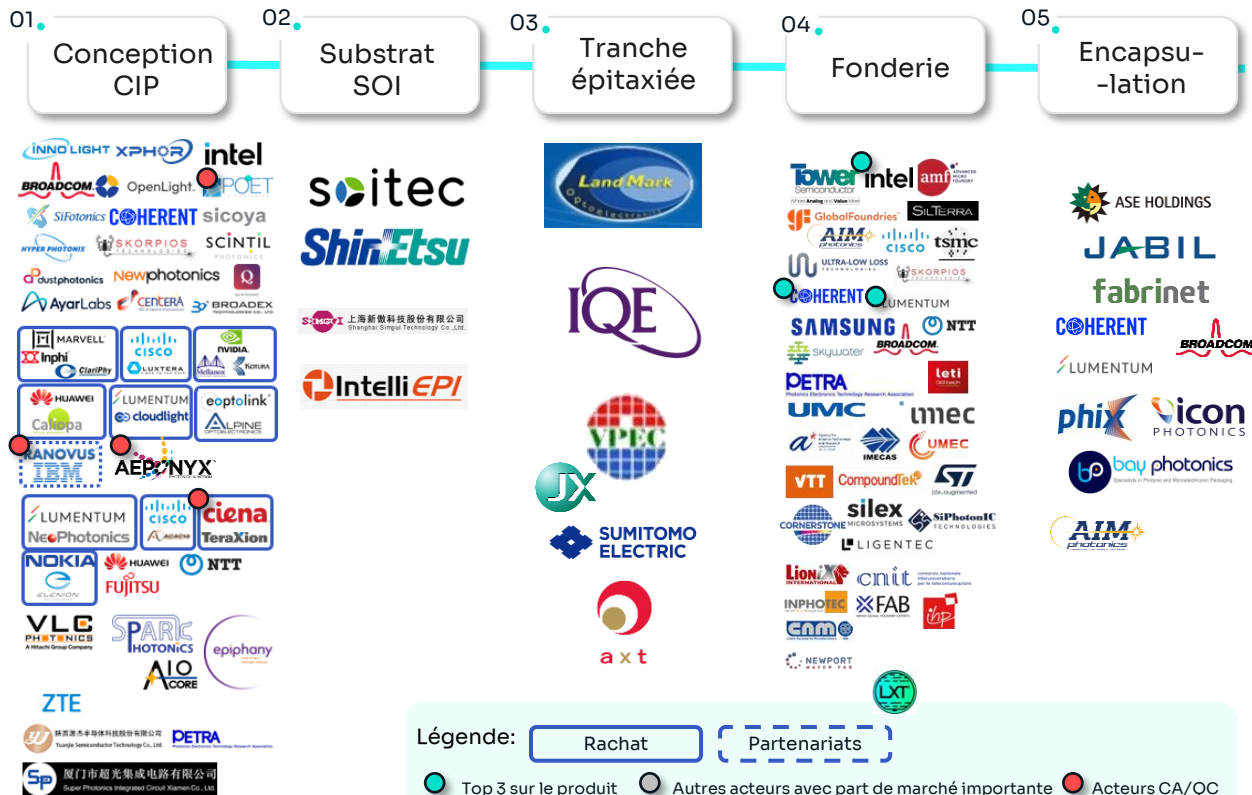
Co-développement de Odin

Développement d'un écosystème techno. complet

 →  44 M\$ Rachat

Intégrer leurs lasers et filtres dans ses CIP cohérents.

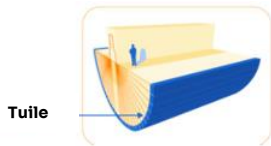
chaîne d'approvisionnement SOI *(la plus mature)*



Quantique | Aperçu technologique

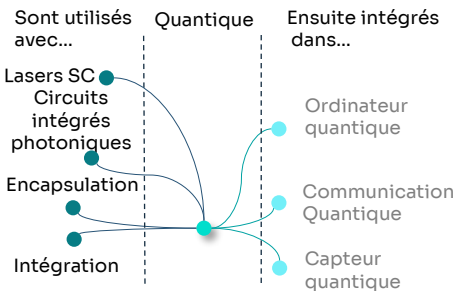
Les technologies quantiques se situent **au croisement de disciplines clés** telles que la physique, l'ingénierie, la fabrication avancée, le calcul haute performance, la télécommunication et la cybersécurité. Cette convergence en fait un **levier stratégique d'innovation**. Encore à un **stade précoce**, ces technologies présentent un **potentiel considérable** : renforcer la sécurité des communications, dépasser les capacités des superordinateurs classiques, et fournir des capteurs ultraprécis pour des applications variées comme la santé, la navigation ou les géosciences. Fâc à des **besoins croissants en puissance de calcul, en précision et en protection des données**, l'exploitation de technologies habilitantes telles que la superposition et l'intrication ouvre la voie à des systèmes plus performants et plus résilients.

Schéma de principe



Tuiles de modules quantiques

Adhérences principales avec autres segments



REVUE TECHNOLOGIQUE ET ENJEUX DE R-D



Vue d'ensemble des différents types d'ordinateurs quantiques

	Brève description	Horizon de développement	Nombre typique de qubits
Recuit	Optimisation par effet tunnel quantique	Aujourd'hui	Jusqu'à 5000+
Simulateur	Imitation directe de systèmes quantiques	Aujourd'hui	12 à 100aine
NISQ	Calcul limité par le bruit	5 à 10 ans	50 à 500
FTQC	Calcul universel avec correction d'erreurs	10 à 30 ans	Millions
Émulateur	Simulation logicielle sur ordinateur classique	Aujourd'hui et 5 à 10 ans	40 à 50



Enjeux de R-D sur les prochaines années

Correction d'erreurs quantiques

Solution – Réduire le nombre de qubits physiques nécessaires pour obtenir des qubits logiques fiables, condition essentielle au calcul quantique tolérant aux fautes.

Mise à l'échelle des plateformes de qubits

Solution – Aucun type de qubit ne s'est encore imposé, et les efforts se concentrent sur l'amélioration de la fidélité, et de la cohérence.

Communication, calcul et capteurs

Solution – Intégrer calcul, communication et détection quantique dans des architectures interopérables répondant aux besoins concrets de l'industrie.



PRINCIPAUX MINÉRAUX ET MATÉRIAUX REQUIS*

Néon | Si | **He** | Plaquettes de saphir | Rb | Terres rares | Ca | Isotopes de baryum

Principaux fournisseurs



Criticité

Faible

Moyennement ou peu critique
Criticité inconnue

Quantique

Principaux acteurs en présence *(liste non exhaustive)*



Observations

→ 1. Typologie des acteurs

- **Acteurs historiques du quantique:** IBM ou D-Wave ont investi dès les années 2010; Présence multisegment pour consolider leur rôle de pionniers.
- **Acteurs en diversification:** Google, Amazon, Microsoft, ou Intel voient dans le quantique une extension stratégique de leurs activités traditionnelles; Anticipation des ruptures technologiques
- **Acteurs spécialisés ou jeunes pousses intégrées:** Des jeunes pousses (Pasqal, Xanadu ou Quantinuum) adoptent une approche verticale dès le départ; nécessité de développer un écosystème propre de bout en bout palliant l'absence de normes partagées.
- **Les utilisateurs finaux stratégiques:** Préparation de leur transformation industrielle et co-construction de solutions adaptées

→ 2. Positionnement sur la chaîne de valeur

- **Forte hybridation des positions** - des acteurs présents sur plusieurs segments.
- **Cette intégration multi-niveau**, vise à compenser l'absence de standards industriels clairs, à garantir la cohérence technologique et sécuriser les composants critiques afin de maximiser la captation de valeur dans un secteur encore immature.



Partenariats typiques

Les partenariats verticaux: intégration technologique

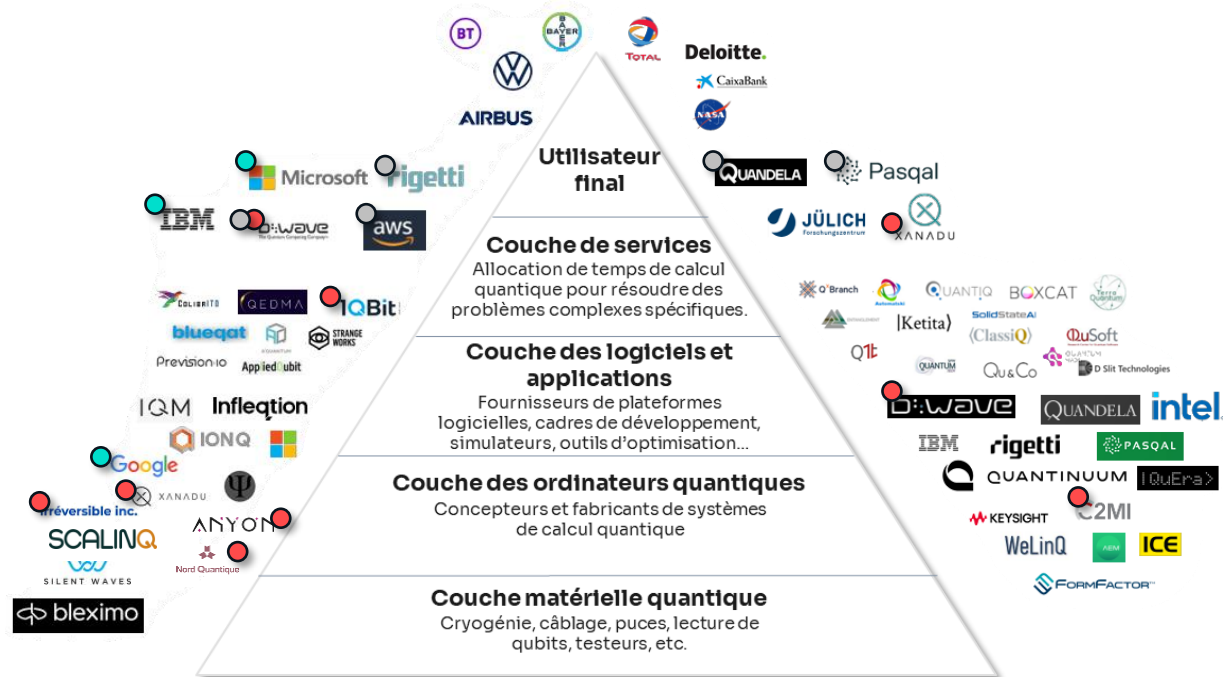
PASQAL Qubit ATOS
Alignement des couches technologiques

Les alliances public-privé: catalysation de l'innovation

QUANDELA CNRS
Projet QUANTERA

Codéveloppement de cas d'usage: apprendre par la pratique

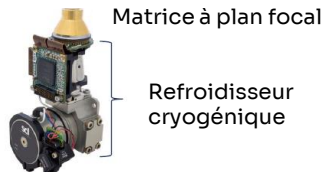
AIRBUS PASQAL
Simulation matériaux et optimisation industrielle



Systèmes d'imagerie | Aperçu technologique

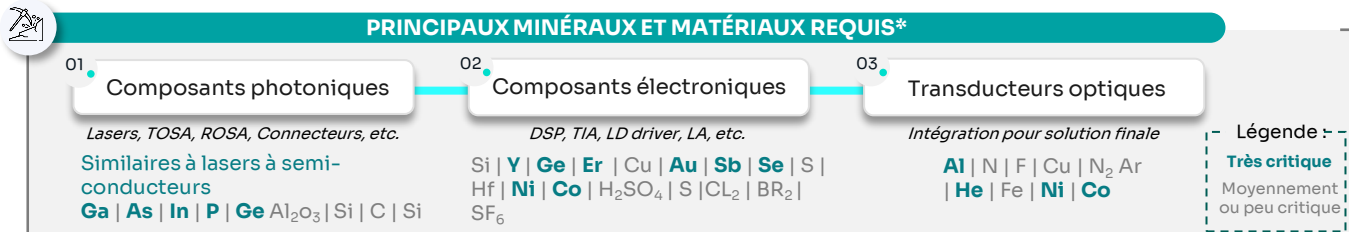
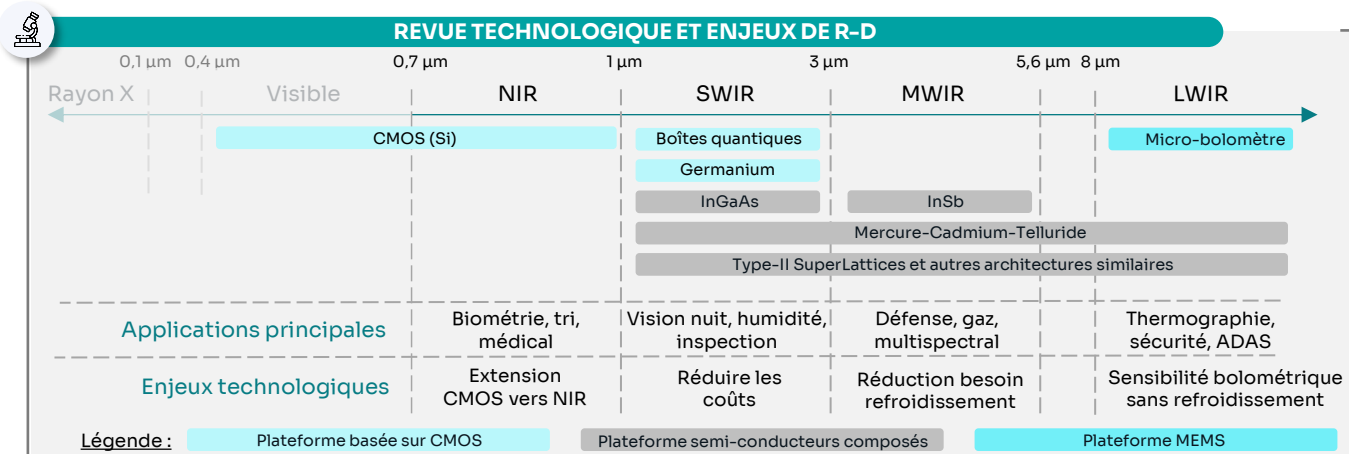
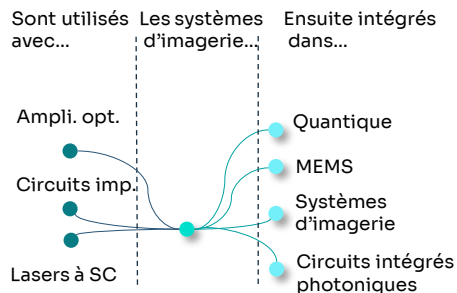
Les systèmes d'imagerie sont utilisés pour la **détection, la visualisation et l'analyse de scènes** pour différentes applications (secteurs médical, industriel, défense, automobile, etc.). Un système d'imagerie est généralement constitué **de composants optiques** (filtre, lentilles, etc.), **d'un capteur** (photodiode, micro-bolomètre, etc.), **d'un circuit de lecture** (ROIC), et, dans certains cas, **d'un système de refroidissement**. Ces systèmes couvrent plusieurs plages du spectre électromagnétique, **de l'infrarouge** (proche, moyen et lointain – NIR, SWIR, MWIR, LWIR) aux **rayons X**. Cette analyse se **concentre principalement sur l'IR**, segment porteur de croissance rapide d'ici à 2029.

Schéma de principe



Module capteur + refroidissement

Adhérences principales avec autres segments



Systèmes d'imagerie



Observations

→ 1. Typologie des acteurs

- Les intégrateurs verticaux historiques – vendent des systèmes complets (RTX, L3 Harris, BAE systems, etc..)
- Les spécialistes du SWIR, segmentés par marchés
- Les champions du micro-bolomètre (Teledyne Infraray et Hikmicro concentrent +60% du marché)
- Les développeurs de nouvelles technologies – Très engagés en R-D (TriEye – Germanium, SWIR Vision System et Emberion-boîtes quantiques, etc.)

→ 2. Positionnement sur la chaîne de valeur

- Les acteurs desservant le marché de la défense (RTX, L3 Harris, etc.) ont tendance à intégrer verticalement plusieurs étapes de production pour des raisons de confidentialité.
- Certains acteurs se positionnent sur plusieurs technologies pour élargir leur gamme de capteurs (Teledyne, Leonardo, etc.).



Partenariats typiques

Partenariats économiques pour développer R-D et/ou commercialisation



103 M\$
Levée de fonds
L'accès au financement a permis de commercialiser sa technologie au Ge, moins chère mais moins mature.

Intégration conjointe de systèmes



n.d.
Coentreprise
Cocréation de Lynred – Puis intégration des capteurs dans les systèmes de Thales (jumelles, viseurs, etc.) et de Safran (toureilles, applications navales, etc.)

Diversification et/ou consolidation technologique



n.d.
Rachats
Intégration de la technologie SWIR à boîtes quantiques dans ses capteurs CMOS

Principaux acteurs en présence (liste non exhaustive)

NB : Cette analyse se concentre principalement sur les fabricants de capteurs infrarouges, là où se situe la majeure partie de la valeur technologique et commerciale des caméras thermiques.



Capteurs SWIR



Micro-bolomètres



Autres (LWIR ET MWIR refroidis)

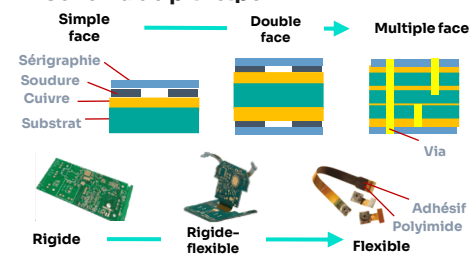


Légende: ● Top 3 sur le produit ○ Autres acteurs avec part de marché importante ● Acteurs CA/QC

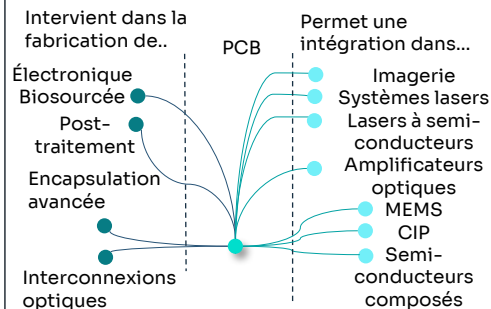
Circuits imprimés | Aperçu technologique

L'électronique imprimée offre une **alternative complémentaire à la microélectronique traditionnelle**, en misant sur des procédés additifs à basse température, compatibles avec des substrats souples, biodégradables ou plastiques. Elle permet une production plus flexible, locale et moins dépendante des matériaux critiques. Moins précise que la microélectronique, elle vise toutefois des **applications émergentes** comme les capteurs souples, les textiles intelligents ou la photonique intégrée. Elle mobilise des encres fonctionnelles et des techniques de dépôt innovantes comme l'aérosol jet ou la sérigraphie. Elle se distingue ainsi par sa capacité à répondre à des besoins spécifiques en matière de légèreté, de coût et de modularité des dispositifs.

Schéma de principe



Adhérences principales avec autres segments



REVUE TECHNOLOGIQUE ET ENJEUX DE R-D



Vue d'ensemble des technologies étudiées

	Composition	Finition	Applications typiques	Avantages clés
Circuit rigide	Substrat en FR4 (résine époxy + fibre de verre), conducteurs en cuivre	HASL, ENIG, etc.	Électronique grand public, informatique, automobile	Robuste, peu coûteux, technologie mature et bien commercialisée
Circuit rigide-flexible	Substrat en polyimide ou polyester, cuivre électrolytique ou laminé	ENIG majoritairement.	Téléphones, caméras embarquées, aéronautique	Compact, fiable, moins de connecteurs
Circuit flexible	Empilement de couches rigides (FR4) et flexibles (polyimide)	ENIG ou souple.	Connectique mobile, dispositifs portables, appareils médicaux	Léger, malléable/pliable, résistant aux vibrations/chocs
Circuit multicouche	FR4 ou polyimide multicouche avec micro-perçages et vias enterrés	Divers (HASL, ENIG, OSP)	Cartes mères, équipements réseau, satellites	Haute densité, performances électriques élevées
Circuit haute fréquence	Résines spéciales (BT, ABF) ou polyimide, multicouches haute performance	ENI, OSP	Radar, 5G, systèmes embarqués	Faibles pertes diélectriques, haute précision



Enjeux de R-D sur les prochaines années

Miniaturisation (densification)

Solution - Développement de PCB HDI multicouches avec microvias, vias enterrés et composants intégrés dans le substrat.

Compatibilité hautes fréquences (5G/6G)

Solution - Utilisation de matériaux à faible Dk/Df, plus souple et interconnexions à impédance contrôlée pour limiter les pertes de signal.

Gestion thermique et durée de vie (fiabilité)

Solution - Intégrer des vias thermiques et des substrats IMS permet de dissiper efficacement la chaleur et de renforcer la fiabilité des PCB haute densité.

PRINCIPAUX MINÉRAUX ET MATÉRIAUX REQUIS*



Circuits imprimés

Acteurs en présence



Observations

→ 1. Typologie des acteurs

- Fabricants de PCB polyvalents:** produisent directement les circuits imprimés (rigides, flexibles, rigides-flexibles). Ils opèrent à grande échelle industrielle (ex: TTM Technologies, Unimicron, Jabil, etc.)
- Assembleurs/intégrateurs:** ils interviennent sur l'assemblage des composants électronique sur les PCB, souvent pour des clients tiers (ex: Flexium, CMAC, BITTELE, etc.)
- Sous-traitants spécialisés:** offrent des services complémentaires ou spécialisés, tels que: la fabrication de petites séries, l'assemblage de composants complexes, la conception de prototypes, l'ingénierie ou le test de PCB (ex: Gentec, DSM, etc.)

2. Positionnement sur la chaîne de valeur

- Certains leaders industriels comme TTM, Jabil ou Unimicron **intègrent toutes les étapes de la chaîne de valeur** pour réduire les coûts et la mise sur le marché ou assurer une confidentialité accrue pour les clients sensibles (défense)
- Des PME comme Cogiscan ou SMT Intelligence sont très **spécialisées** et répondent aux besoins spécifiques de clients à haute valeur ajoutée tout en proposant une agilité plus grande face aux changements technologiques (ex: transition vers les PCB flexibles pour l'électronique portable ou embarquée)



Partenariats typiques

Partenariat client-fournisseur stratégique

Unimicron
Sécuriser les capacités de production

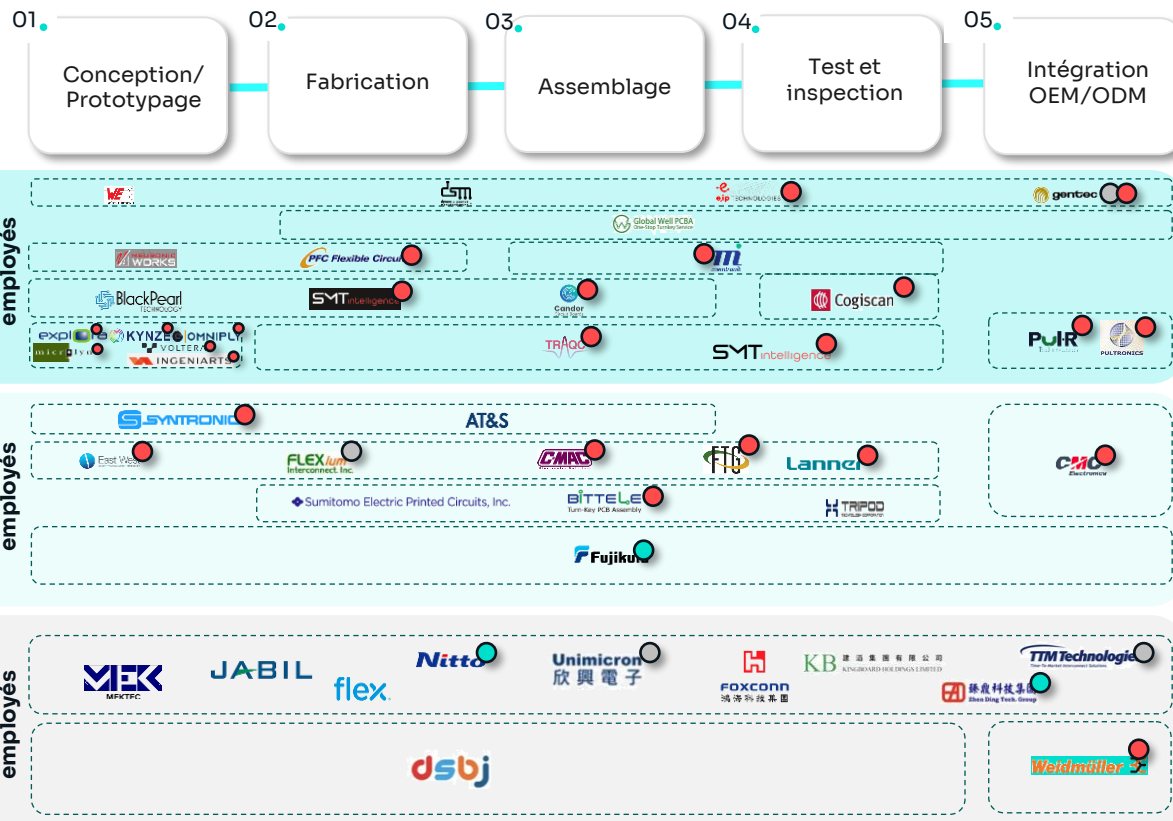


Partenariat technologique ou de R&D collaborative

TTM Technologies **Panasonic**
Partenariat R-D pour concevoir des PCB spécifiques à un marché local

Partenariat d'intégration verticale (fabrication + assemblage)

Alliance pour proposer une offre complète clé-en-main

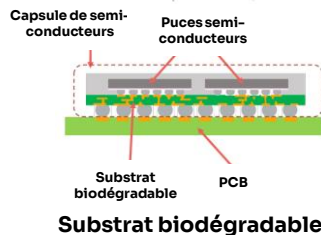


Légende: ● Top 3 sur le produit ○ Autres acteurs avec part de marché importante ● Acteurs CA/QC

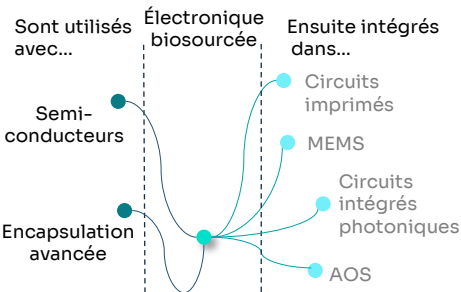
Électronique biosourcée | Aperçu technologique

L'électronique biosourcée émerge et occupe aujourd'hui une **position intermédiaire stratégique** dans le secteur électronique, en intégrant des **matériaux d'origine renouvelable** comme le PLA, la nanocellulose ou les polyuréthanes biosourcés. Utilisés **dans les substrats, les boîtiers, les composants souples ou les encres conductrices**, ces matériaux permettent de concevoir des dispositifs plus durables, flexibles et parfois biodégradables. Portée par des réglementations plus strictes, une demande croissante pour des technologies écoresponsables et des avancées en électronique imprimée, cette filière ouvre la voie à une nouvelle génération d'électronique. Toutefois, la gestion de la performance et de la fin de vie de ces dispositifs reste un défi.

Schéma de principe



Adhérences principales avec autres segments



REVUE TECHNOLOGIQUE ET ENJEUX DE R-D



Vue d'ensemble des technologies étudiées

	Matériaux utilisés	NMT	Exemples d'applications
Composants à base de biopolymères	PLA, PBAT, PE biosourcé, PET biosourcé, nanocellulose	7-9	Câbles, isolants, batteries rechargeables, écrans, substrats pour circuits
Composites conducteurs biosourcés	Composites PLA, nanofibres carbone ou graphène	4-6	Encres ou pistes conductrices pour circuits imprimés
Électronique flexible et portable	Polyuréthanes biosourcés, PLA flexible	5-7	Montres intelligentes, capteurs médicaux, énergie solaire et emballage alimentaire
Emballages et boîtiers en biopolymères	PLA, amidon, PHA, polyesters biosourcés	8-9	Boîtiers d'appareils électroniques, emballages biodégradables



Enjeux de R-D sur les prochaines années

Optimisation de la performance des matériaux biosourcés

Solution – Développer des composites dopés avec charges fonctionnelles pour améliorer la conductivité et la stabilité thermique.

Réduction de la dépendance aux minéraux critiques

Solution – Substituer l'argent et le cuivre par des encres conductrices à base de carbone biosourcé ou de nanocellulose fonctionnalisées.

Résistance des matériaux biodégradables aux températures et solvants standards

Solution – Mettre au point des procédés d'impression à basse température compatibles avec les substrats biodégradables et standardiser les performances.

PRINCIPAUX MINÉRAUX ET MATÉRIAUX REQUIS*



01.

Synthèse et formulation de matériaux

Création d'encres conductrices, substrats flexibles, composites fonctionnels

Ag | C | Cu | Ga | Ge | Sn | In

02.

Fabrication de composants électroniques

Impression ou intégration de circuits, capteurs, antennes, transistors sur substrats biosourcés

Ag | C | Mg | Zn | Br | Cl | Cu

03.

Assemblage et encapsulation

Regroupement de composants et protection du dispositif avec des matériaux biodégradables ou recyclables

Cu | Sn

04.

Intégration

Utilisation dans des produits électroniques: capteurs, textiles intelligents, boîtiers, étiquettes intelligentes

Cu | Li

Légende

Très critique

Moyennement ou peu critique

Électronique biosourcée

Principaux acteurs en présence *(liste non exhaustive)*



Observations

→ 1. Typologie des acteurs

- **Acteurs de la chimie et des matériaux:** positionnés majoritairement sur l'amont grâce à leur maîtrise de la transformation des ressources biosourcées en polymères
- **Acteurs de l'électronique traditionnelle:** très peu présents dans ce marché du fait des contraintes de performance, intégration dans les chaînes standardisées et des volumes faibles
- **Centres technologiques et instituts de recherche appliquée:** très présent sur la R-D des étapes 1 à 3, ils comblent le fossé entre innovation, matériau et applications électroniques, rôle pivot de validation des technologies avant leur industrialisation
- **Jeunes pousses:** positionnées sur les maillons 3 et 4, où elles visent des niches (portables, capteurs jetables, biocapteurs, etc.)

→ 2. Positionnement sur la chaîne de valeur

- Certains acteurs étendent leur présence vers l'assemblage en adaptant leurs formulations aux procédés de fabrication élec.
- La majorité des acteurs ne vont pas jusqu'à l'intégration finale en raison des coûts élevés ou du désalignement avec leur cœur de métier (ex. formulation vs conception de produit).
- Les jeunes pousses verticales (étapes 3 et 4) tentent de maîtriser plusieurs maillons pour garantir performance et circularité



Partenariats typiques

Approvisionnement en molécules plateformes

Molécules plateformes issues de la biomasse forestière résiduelle



Recherche collaborative

Des étiquettes aussi intelligentes que recyclables



Projets de démonstration

Premier circuit imprimé biodégradable dans le monde



01 Synthèse et formulation de matériaux fonctionnels

02 Fabrication de composants électroniques

03 Assemblage et encapsulation

04 Intégration

Biodégradable



Non-biodégradable

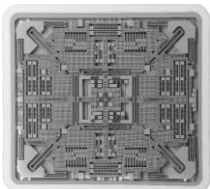


Légende: ● Top 3 sur le produit ○ Autres acteurs avec part de marché importante ● Acteurs CA/QC

MEMS | Aperçu technologique

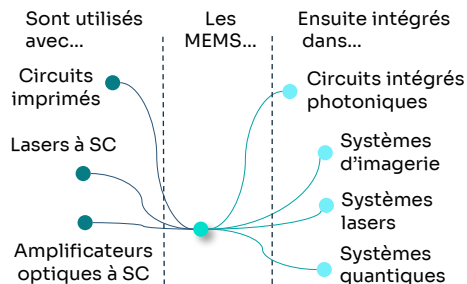
Les systèmes micro-électromécaniques (MEMS) intègrent des **fonctions mécaniques, électroniques et optiques miniaturisées**, jouant un rôle clé dans les systèmes embarqués. Leur développement s'appuie sur des avancées en performance, en réduction des coûts et en intégration de matériaux critiques. Plusieurs technologies restent en phase de R-D ou de validation marché, tandis que d'autres connaissent une large adoption. La dynamique d'innovation se concentre notamment sur la **récupération d'énergie, le refroidissement, les capteurs avancés et les structures photoniques, avec des jalons industriels attendus entre 2025 et 2029**.

Schéma de principe



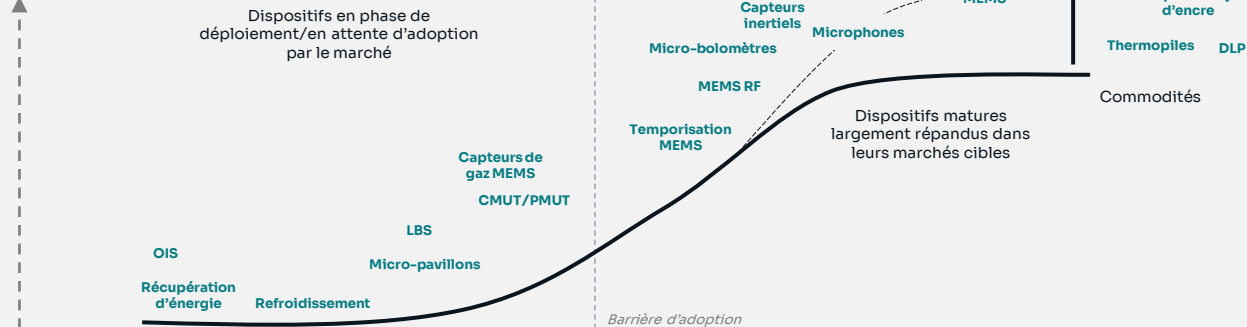
Gyroscope MEMS

Adhérences principales avec autres segments

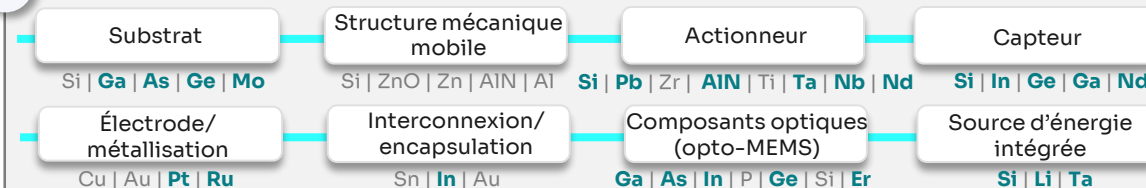


REVUE TECHNOLOGIQUE ET ENJEUX DE R-D

Maturité des technologies et adoption dans le marché



PRINCIPAUX MINÉRAUX ET MATÉRIAUX REQUIS*



Légende

Très critique
Moyennement ou peu critique

MEMS

Principaux acteurs en présence *(liste non exhaustive)*



Observations

→ 1. Typologie des acteurs

- Les **producteurs entièrement intégrés** conçoivent, fabriquent et intègrent leurs composants en interne, principalement pour l'automobile ou l'électronique grand public.
- Les **entreprises de sous-traitance** en fabrication se concentrent sur la production pour des clients tiers (concepteurs spécialisés).
- Les **assembleurs et testeurs** prennent en charge l'encapsulation et la vérification, étapes critiques dans des domaines sensibles comme la santé ou l'automobile.
- Les **concepteurs sans usine** se concentrent sur le développement de fonctions en externalisant la fabrication.

→ 2. Positionnement sur la chaîne de valeur

Les choix de positionnement traduisent différents modèles d'affaires

- Les **producteurs intégrés** cherchent à sécuriser leurs approvisionnements, à maîtriser la qualité et à optimiser les coûts
- Les **concepteurs spécialisés** misent sur l'innovation fonctionnelle (précision, miniaturisation, faible consommation) pour répondre à des besoins de plus en plus spécifiques.
- Les **sous-traitants et assembleurs** deviennent incontournables dans un contexte de complexification des composants et de standardisation accrue des procédés de production.



Partenariats typiques

Co-développement technologique entre industriels



Développement de capteurs MEMS intégrés aux pneus



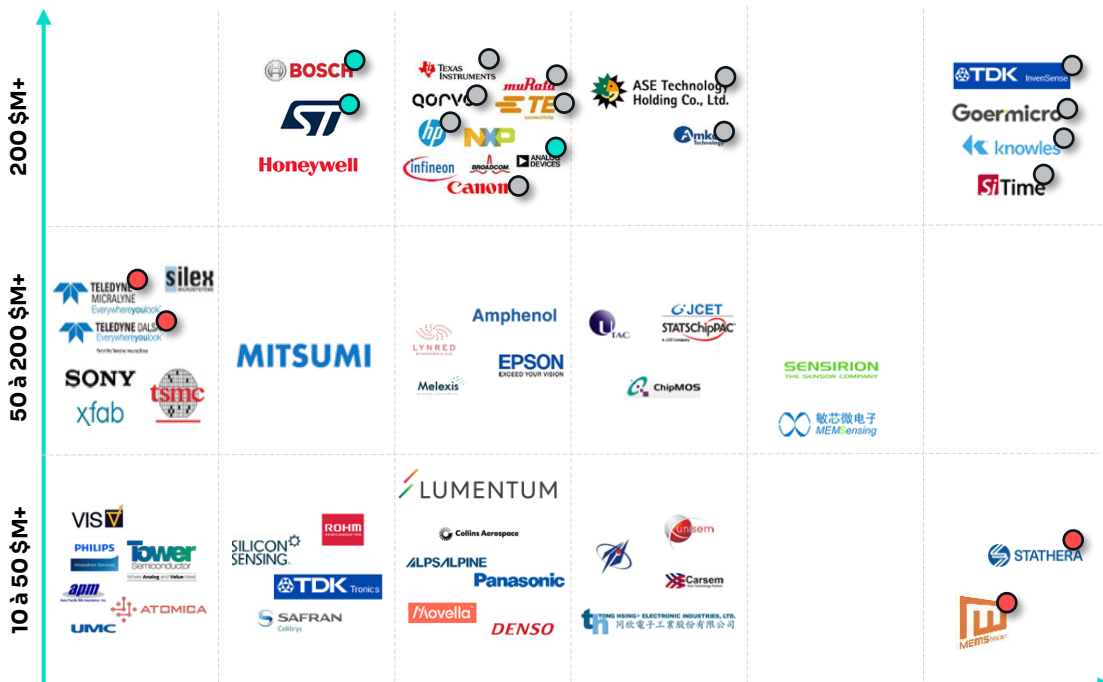
Création de solutions tactiles avancées intégrant des MEMS



Acquisition de l'usine MEMS de TDK par Precision Neuroscience

Investissements ou rachats d'actifs pour renforcer la chaîne de valeur

Revenus MEMS (2023)



Fonderies

IDM offrant des services de fonderie

Fabricants de dispositifs intégrés

Sous-traitants d'assemblage et de tests

Modèle semi-intégré

Sans usine

Légende:

● Top 3 sur le produit

● Autres acteurs avec part de marché importante

● Acteurs CA/QC

Post-traitement | Perspectives

Le marché du post-traitement des MEMS est estimé à environ **665 M\$ CAD à l'horizon 2028**. Il est aujourd'hui principalement utilisé pour des capteurs inertiels et des oscillateurs MEMS, mais reste limité à des volumes relativement faibles pour d'autres dispositifs comme les cMUT ou les capteurs de gaz. **Trois grandes approches technologiques coexistent chacune présentant des défis techniques.** Parmi les freins, on note la nécessité d'avoir des puces de taille comparable et une faible flexibilité de conception. Bien que la plupart des fonderies MEMS disposent des capacités techniques pour réaliser du post-traitement sur tranches CMOS, peu le font réellement, en raison du faible volume actuel de dispositifs recourant à ce type d'intégration.

01. Valeur totale du marché (2023)

486 M\$ CAD

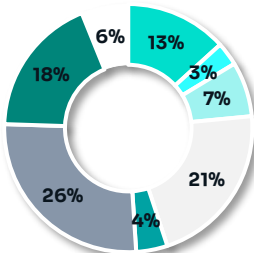


02. Croissance anticipée du marché

TCAC = 6,4%
(2023-2028)



Répartition du marché par dispositif (2023)



Quelques exemples d'applications du PT au niveau des MEMS (Analyse Yole)

Ajout d'éléments fonctionnels au niveau des têtes d'impression jet d'encre



HP utilise un procédé de gravure arrière pour créer les buses d'éjection sur les MEMS tandis que ST intègre des éléments chauffants CMOS pour le contrôle précis de l'encre.

Intégration hétérogène au niveau des capteurs inertiels



TDK s'appuie sur les fonderies de TSMC pour réaliser le collage eutectique (AIGe) entre l'ASIC et la structure MEMS.

Ajout de matériaux fonctionnels au niveau des thermopiles



TSMC fournit les tranches CMOS de base tandis que Sensirion réalise en aval la dernière étape de fabrication MEMS, incluant le micro-usinage thermique.

Encapsulation MEMS + ASIC au niveau de la synchronisation MEMS



SiTime conçoit les circuits ASIC pour l'horlogerie MEMS, Bosch fournit les structures MEMS oscillantes, et ASE réalise l'assemblage final.

Synchronisation MEMS
MEMS optiques

MEMS IMU
Thermopile

Accéléromètre MEMS
Gyroscope MEMS

Têtes d'impr.
Autre



TENDANCES DE MARCHÉ

Capteurs MEMS | Usage encore limité

Le recours au post-traitement reste marginal pour la majorité des dispositifs de capteurs MEMS. Les architectures monolithiques sont souvent difficiles à réaliser et leur adoption freine la flexibilité de conception, ce qui limite l'intérêt industriel du post-traitement dans ce segment.

Marché fort volume bien servi | Quelques acteurs majeurs

Les segments à fort volume comme les capteurs inertiels et les oscillateurs sont largement couverts par des acteurs dominants tels que TSMC et ASE, qui intègrent déjà les étapes critiques en interne. Le PT s'est également développé dans d'autres secteurs d'intérêt comme l'imagerie où les volumes élevés du marché permettent d'amortir les coûts d'intégration avancée.

Avènement MEMS sur tranches 300 mm | Intégration facilitée

D'ici 2028, un passage progressif vers des tranches MEMS de 300 mm est attendu pour certains types de dispositifs: notamment les transducteurs ultrasonores capacitifs (cMUT), les centrales inertiels (IMU) et les oscillateurs MEMS. Comme la majorité des tranches CMOS sont déjà fabriquées en 12 pouces (300 mm), l'adoption de ce format côté MEMS facilite le collage de tranches et renforce la compatibilité avec les approches de post-traitement intégré MEMS-CMOS.

Post-traitement | Vision Québec

Le Québec dispose d'**atouts stratégiques pour capter de nouvelles occasions d'affaires liées au post-traitement MEMS**, notamment grâce à la présence d'infrastructures spécialisées comme celles du C2MI et de Teledyne. Le territoire maîtrise déjà le format 200 mm, mais le 300 mm peut être envisageable pour répondre à des besoins spécifiques (ex: micro-assemblage, encapsulation hermétique) sur des segments porteurs (ex: CMUT, IMU, oscillateurs MEMS). Plusieurs acteurs cherchent des partenaires capables d'offrir une capacité de post-traitement adaptée à ces usages, idéalement de façon mutualisée pour assurer la rentabilité. Dans ce contexte, le Québec a l'occasion de structurer une **offre intégrée et flexible, attractive pour les clients en quête de solutions spécialisées et sur mesure**.

	Observations sur le segment	Spécificités québécoises
INFRASTRUCTURES	La fabrication MEMS nécessite des installations avancées pour les opérations de collage, encapsulation, tests, essentielles pour le post-traitement Le passage au 300 mm est crucial pour certains marchés à volume élevé; une compatibilité avec ce format permet d'attirer ces segments	Teledyne et C2MI : lignes MEMS/CMOS, collage, encapsulation, tests 200 mm maîtrisé ; potentiel à développer sur 300 mm pour des niches ciblées
EXPERTISES ET TALENTS	L'intégration MEMS/CMOS est au cœur du post-traitement; elle permet la compacité et la performance des dispositifs Le développement et l'opération de procédés complexes exigent une main-d'œuvre formée aux technologies MEMS, matériaux avancés et procédés hybrides	Présence de C2MI, CNRC, INRS, 3IT Université Laval, Sherbrooke et Polytechnique : expertise en procédés, matériaux, MEMS, photonique
MARCHÉ ET POSITIONNEMENT	Le post-traitement n'est rentable que si le volume est suffisant ou si le produit appartient à une niche à forte valeur ajoutée Un marché local actif où l'exportation permet de rentabiliser une ligne de production dédiée au post-traitement	Le QC ne peut pas concurrencer directement les grands centres asiatiques sur le volume, il doit donc se positionner sur des niches technologiques différenciantes où les marges sont élevées (ex: collage cryogénique, photonique intégrée, MEMS inertiels spécialisés et la micro-fluidique biomédicale) Le QC peut viser la consolidation du marché local (par mutualisation d'une ligne dédiée) ou le service à l'export vers l'Amérique du Nord où peu d'options existent pour du PT spécialisé
INTÉGRATION ET CHAÎNE DE VALEUR	Proposer un service intégré attire les clients qui cherchent un guichet unique	Écosystème structuré autour du C2MI, couvrant conception, fabrication, post-traitement et encapsulation avancée



QUELQUES ACTEURS QC

C2MI *Positionné*

Centre d'innovation collaboratif qui utilise des équipements et un environnement industriel pour faire des prototypes et des petits volumes de production dans les technologies de collage, de MEMS, de préparation de tranches et d'encapsulation. Maîtrise le développement de post-traitement sur tranches de 200 mm.

Teledyne *Positionné*

Site industriel avec des lignes de fabrication MEMS et possède l'expertise et l'expérience du post-traitement en 200 mm à haut volume.

INO *Positionné*

L'INO intervient en conception et prototypage optique, photonique et a les capacités de microfabrication pour supporter les prototypes de post-traitement en 200 mm. Avec leur excellente compréhension des requis au niveau conception des produits nécessitant le post-traitement, ils font partie intégrante de la chaîne de développement.

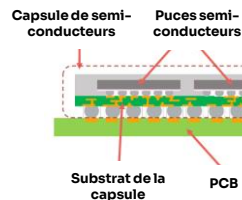
Technum Québec *Potentiel*

Souhaite développer cette capacité à moyen terme. Leur intérêt pour les lignes mutualisées (notamment en 300 mm pour microfluidique NGS) est stratégique.

Encapsulation avancée | Aperçu technologique

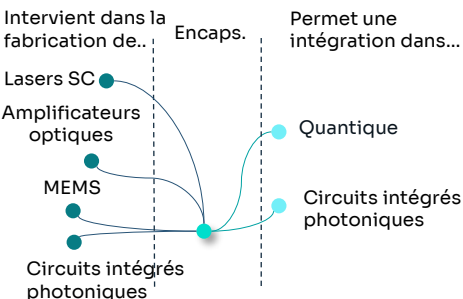
L'encapsulation avancée **transforme fondamentalement le rôle de l'assemblage dans l'industrie des semi-conducteurs**, en intégrant des fonctions critiques qui relèvent désormais de la performance système. Des technologies comme le collage hybride, l'intégration 2.5D/3D, ou encore les interconnexions optiques repoussent les limites des architectures traditionnelles. Les plateformes comme CoWoS, Foveros ou InFO marquent une **convergence entre miniaturisation, performance et modularité**. Cette évolution répond à la **demande croissante d'applications haute performance** (IA, CHP, RA/RV) tout en imposant de **nouveaux défis en matière de conception, de fabrication et de gestion de la chaleur**.

Schéma de principe



Semi-conducteurs encapsulés

Adhérences principales avec autres segments



REVUE TECHNOLOGIQUE ET ENJEUX DE R-D

Vue d'ensemble des technologies étudiées

	Principe	Applications typiques	Avantages clés
Encapsulation étendue	Redistribution des E/S via des couches LDR sur un moule sans substrat	Mobile, RF, SiP, systèmes en boîtier	Profil fin, faible coût, bonne densité
Puce retournée	Puce retournée reliée au substrat par des billes (Cu, Sn)	GPU, CPU, FPGA, mémoire	Densité E/S élevée, mature, compatible avec FC BGA/CSP
Interposeur 2.5D	Intégration latérale de plusieurs puces sur un interposeur Si	CHP, IA, centres de données	Large bande passante, interconnexion hétérogène
Encapsulation 3D	Empilement vertical de puces via TSV ou liaison hybride	HBM, circuit intégré 3D, capteurs d'images	Gain d'espace, réduction latence, efficacité
Intégration hétérogène	Intégration de puces variées dans un seul boîtier	HPC, IA, 5G, systèmes embarqués	Haute densité fonctionnelle, modularité, performance système



Enjeux de R-D sur les prochaines années

Réduction du pitch d'interconnexion

Solution - Collage hybride sans bosse (ex. TSMC SolC, Intel Foveros Direct) permet des connexions métal-à-métal/oxyde-à-oxyde ultra-denses.

Gestion thermique des empilements 3D et HBM

Solution - Collage hybride multicouche en cuivre (Samsung) et technologies comme le BSPDN.

Intégration hétérogène de chiplets

Solution - Plateformes de type EMIB (Pont d'interconnexion multipuces intégrées), CoWoS (Puce sur tranche sur substrat), VIPack (intégration verticale) qui assurent une modularité et un interfaçage performant.



PRINCIPAUX MINÉRAUX ET MATÉRIAUX REQUIS*

Encapsulation étendue	Puce retournée	Encapsulation étendue (UHD)	Encapsulation étendue (HD)
Cu Sn Au Si	Cu Sn Au Ni Co Si Ta	Cu Co Ni Sn	Cu Sn Ni Si
Interposeur 2.5D	Mémoire empilée 3D	Pont intégré en Si	Collage hybride
Si Cu Sn Ta Au Co	Cu Sn Au Co W Ge In	Si Cu Ni Sn Co	Cu Co Ta Ge In Hf

Légende :

Très critique
Moyennement ou peu critique

Encapsulation avancée



Observations

→ 1. Typologie des acteurs

- **Acteurs intégrés** (TSMC, Intel,): maîtrisent puce, interposeurs et encapsulation avec contrôle technologique vertical)
- **Pratitaires alternatifs d'assemblages et de tests** (ASE, Amkor, JCET) : Historiquement centrés sur milieu de gamme (encapsulation étendue, puce retournée), montent en gamme via investissements dans l'encapsulation étendue UHD et l'intégration chiplet.
- **Fournisseurs spécialisés** (UMC, Adeia, Micron) : Actifs sur briques techniques clés (TSV, bridges, HBM), souvent en co-développement avec des fabricants de puces.

→ 2. Positionnement sur la chaîne de valeur

- Maîtriser l'ensemble de la chaîne, permet d'optimiser les performances et de garder le contrôle technologique: approche adoptée par TSMC, Intel ou Samsung.
- À l'inverse, certains acteurs comme ASE ou Amkor, **investissent dans la gamme moyenne**.
- D'autres, tels qu'UMC ou Micron, se concentrent sur des briques spécifiques comme les interposeurs ou la réalisation des bosses pour interconnexion.



Partenariats typiques

Codéveloppement technologique

Développement commun de plateformes hybrides

Accords de licence technologique

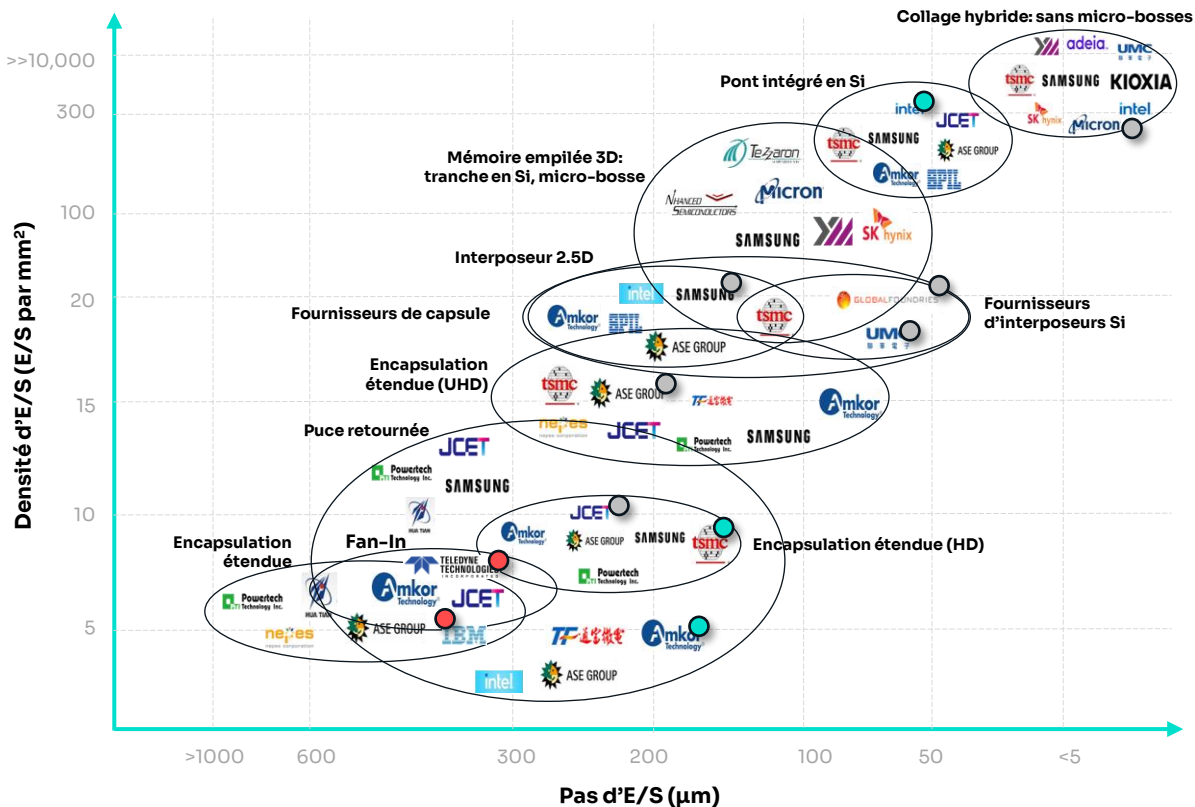
adeia KIOXIA
Utilisation de brevets pour hybrid bonding

Joint ventures industriels

Implanter des usines OSAT dans les pays émergents (Inde, Vietnam)



Principaux acteurs en présence (liste non exhaustive)



Synthèse | Perspectives de marché et croissance (1/2)

Les marchés étudiés en microélectronique et photonique montrent des dynamiques contrastées: **croissance stable pour les circuits imprimés et les MEMS, expansion rapide pour l'encapsulation avancée, les transducteurs optiques et les lasers à semi-conducteurs, et segmentation technologique marquée pour l'imagerie infrarouge.** Ces évolutions sont portées par des applications variées allant de l'électronique grand public et la mobilité à la défense, aux télécoms et aux centres de données.

Segment	Description d'ensemble du marché	Taille du marché* 2024	Principales applications* 2024			Évolution* (G\$)		TCAC* (2024-2029)
			2024	2029		2024	2029	
CIRCUITS IMPRIMÉS	Le marché des circuits imprimés, croît avec l'électronique, la 5G et l'IoT . Les modèles flexibles progressent , la production reste dominée par la Chine, posant des enjeux de souveraineté pour l'Europe et les États-Unis.	102 G\$	 36 %	 21 %	 16 %	102	165	5,8 %
ENCAPSULATION AVANCÉE	Le marché de l'encapsulation avancée évolue rapidement, stimulé par l'IA et le CHP . Devenue un levier stratégique, elle dépasse le rôle classique d'assemblage pour renforcer performance, compétitivité et souveraineté dans l'écosystème mondial des semi-conducteurs.	60 G\$	 73 %	 12 %	 10 %	60	97	11 %
MEMS	Le marché mondial des MEMS est porté par les secteurs de l'automobile, la santé, l'industrie et l'électronique grand public . Utilisés pour détection, actionnement et synchronisation , ils s'intègrent dans des dispositifs intelligents et connectés.	21 G\$	 52 %	 19 %	 18 %	21	27	5 %
TRANSDUCTEURS OPTIQUES	La DataCom croît rapidement grâce à l'IA et aux centres de données , adoptant la photonique sur silicium pour liaisons courtes. Les télécommunications évoluent plus lentement, misant sur solutions cohérentes longue distance.	18 G\$	 61 %	 39 %		18	31	11 %
SYSTÈMES D'IMAGERIE	Le marché de l'imagerie infrarouge se divise entre SWIR en croissance (inspection, défense), MWIR militaire , LWIR refroidi pour environnements exigeants et micro-bolomètres LWIR non refroidis , dominants en automobile et industrie.	6,8 G\$	 1 ^{ER}	 2 ^{ÈME}	 3 ^{ÈME}	6.8	9.1	6 %
LASER À SEMI-CONDUCTEURS	Consolidé par de forts investissements (>28G\$) , le marché croît avec les télécoms, les centres de données, l'IA, l'automobile et LiDAR. VCSELs progressent en biométrie, EELs dominant industrie et télécoms.	3,9 G\$	 41 %	 37 %	 13 %	3.9	6.6	17 %

*Source : Étude de marché
– Yole Group

Légende :



Électronique grand public



Automobile et mobilité



Télécom.



Datacom.



Défense



Industrie

Synthèse | Perspectives de marché et croissance (2/2)

Les marchés en forte croissance se concentrent sur les **semi-conducteurs composés**, les **amplificateurs optiques à semi-conducteurs**, le **quantique** et les **circuits intégrés photoniques**, chacun porté par des applications clés allant de l'électronique de puissance et des télécoms aux centres de données, au calcul haute performance et au LiDAR. L'**électronique biosourcée**, encore émergente, ouvre parallèlement une voie vers des solutions plus durables, notamment dans la santé, l'agroalimentaire et l'IoT.

Segment	Description d'ensemble du marché	Taille du marché 2024	Principales applications* 2024	Évolution* (G\$)		TCAC* (2024-2029)
				2024	2029	
SEMI-CONDUCTEURS COMPOSÉS	Le marché se structure autour de plusieurs applications: le SiC et le GaN en électronique de puissance pour les véhicules, le GaAs et le GaN en RF pour la 5G, la défense et les communications satellitaires , l'InP et le GaAs en photonique pour les transducteurs optiques et la détection 3D, ainsi que les DEL conventionnelles et les microLED dans l'affichage.	2,1 G\$	 65 %  20 %	2.1	4.5	17 %
AMPLIFICATEURS OPTIQUES À SC	Le marché se répartit entre les télécommunications , la photonique intégrée en forte croissance avec les circuits photoniques sur silicium pour centres de données , le LiDAR pour véhicules autonomes et télédétection, ainsi que des usages complémentaires comme la spectroscopie et les lasers accordables.	1,6 G\$	 80 %  20 %	1.1	2.1	11 %
QUANTIQUE	Le marché se divise entre le calcul , en voie de domination avec les services QaaS et les ordinateurs à recuit, les communications limitées aux liaisons point-à-point mais appelées à évoluer avec l'arrivée des répéteurs quantiques , et la détection encore de niche mais porteuse pour les mesures ultraprécises.	1,3 G\$	 1 ^{ER}  2 ^{ÈME}	1.3	5.2	31 %
CIRCUITS INTÉGRÉS PHOTONIQUES	Le marché couvre un éventail d'applications, allant des télécommunications et centres de données , au CHP et à l'IA. Des applications émergentes comme la détection et le biomédical exploitent également des plateformes variées soutenues par des efforts de R-D et l'intégration de nouveaux matériaux.	0,4 G\$	 1 ^{ER}  2 ^{ÈME}  3 ^{ÈME}	0.4	2.4	43 %
ÉLECTRONIQUE BIOSOURCÉE	Le marché s'appuie sur l'électronique flexible hybride pour des applications variées en santé, agroalimentaire et IoT . Cette approche ouvre la voie à des matériaux renouvelables et compostables, adaptés à l'économie circulaire, avec des opportunités dans l'électronique portable grâce aux biopolymères légers et durables.	0,1 G\$	 1 ^{ER}  2 ^{ÈME}	0.12	0.24	16 %

*Source : Étude de marché
– Yole Group

Légende :



Électronique grand public



Automobile et mobilité



Télécom.



Datacom.



Défense



Industrie



Détection

Synthèse | Positionnement du Québec (1/2)

Le Québec présente un positionnement diversifié, avec des atouts reconnus en encapsulation avancée, MEMS, transducteurs optiques et imagerie, ainsi qu'un potentiel émergent en circuits imprimés et électronique imprimée. **Porté par un écosystème industriel actif, des bases scientifiques solides et des initiatives régionales structurantes, le territoire dispose de compétences clés et de relais d'innovation qui lui permettent de répondre aux besoins technologiques stratégiques et de renforcer sa souveraineté.**

Segment	Description d'ensemble du positionnement	Exemples d'acteurs QC	Spécificités du Québec	Intérêt/ Capacités
CIRCUITS IMPRIMÉS	Le Québec est un acteur modeste en PCB rigides mais dispose d'un écosystème d'assemblage solide. L' électronique imprimée offre une voie complémentaire, favorisant la production locale et de nouvelles applications en photonique et IoT.	 	- Pôle couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur Atouts scientifiques majeurs	Nouveaux marchés et avantage concurrentiel - Projets structurants
ENCAPSULATION AVANCÉE	Le Québec dispose de solides capacités technologiques et un différenciateur en termes d' encapsulation sur mesure . Plusieurs initiatives régionales visent à structurer une offre cohérente sur ce segment.	 	- Proximité des fonderies américaines - Infrastructure existante solide	- Acteurs à la fine pointe - Manque à combler au niveau des volumes
MEMS	Le Québec réunit des conditions favorables au développement d'une filière MEMS compétitive, grâce à un écosystème industriel actif , une base scientifique reconnue et des leviers publics structurants .	 	Spécialisation des PME dans niches technologiques Chaîne d'innovation intégrée	- Critiques pour secteurs d'avenir Prototypage et mise à l'échelle
TRANSDUCTEURS OPTIQUES	Le Québec possède des compétences reconnues en test, en photonique sur silicium, en composants passifs, en connectique et en architectures réseau qui se complètent avec les capacités d'intégration présentes ailleurs au Canada .	 	Écosystème complémentaire (ex: composants passifs) - Excellence en test optique	Transition vers photonique intégrée Souveraineté technologique
SYSTÈMES D'IMAGERIE	Le Québec possède un écosystème d' imagerie avancée intégrant optique, IA et traitement de données , avec plusieurs acteurs spécialisés, mais sans chaîne complète de capteurs .	 	- Spécialisé dans niches techno. à haute complexité - Fort maillage fonctionnel	Secteurs sensibles (défense, sécurité, etc.) Noyau d'entreprise solide

Synthèse | Positionnement du Québec (2/2)

Le Québec présente des atouts différenciés dans plusieurs segments stratégiques. Ses forces en recherche et innovation soutiennent le développement des lasers à semi-conducteurs, des semi-conducteurs composés et du quantique, tandis que ses compétences couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur renforcent son positionnement en circuits intégrés photoniques. L'électronique biosourcée bénéficie d'un écosystème structuré mais reste freinée par le manque de fournisseurs spécialisés.

Segment	Description d'ensemble du positionnement	Exemples d'acteurs QC	Spécificités du Québec	Intérêt/ Capacités
LASER À SEMI-CONDUCTEURS	Le Québec se démarque dans les lasers à semi-conducteurs par sa recherche-développement, ses centres de formation spécialisés et sa capacité d'innovation, avec un potentiel renforcé pour l'industrialisation et le passage à l'échelle .	 	• Niche stratégique (biomédical, imagerie avancée) • Sur mesure comme différentiateur stratégique	• Nombre limité d'acteurs industriels • Fabrication locale envisagée
SEMI-CONDUCTEURS COMPOSÉS	Le Québec se distingue par ses ressources en minéraux critiques et ses applications de niche , renforçant la nécessité de structurer des chaînes d'approvisionnement photonique locales et intégrées.	 	• Position forte sur les circuits hybrides • Plateformes de prototypage avancé sur semi-composé III-V	• Levier différentiateur • Faible coordination entre amont minier et aval techno-industriel
QUANTIQUE	Le Québec s'affirme comme un acteur clé du quantique , porté par un écosystème associant recherche de pointe, entreprises innovantes et soutien gouvernemental , avec une forte articulation entre science fondamentale et applications industrielles.	 	• Plateformes mutualisées pour l'expérimentation industrielle • Base solide de jeunes pousses	• Créneau renforcé en photonique intégrée • Souveraineté technologique
CIRCUITS INTÉGRÉS PHOTONIQUES	Les circuits intégrés photoniques, au croisement de l'IA, du quantique, de la microélectronique et de la photonique, placent le Québec en position favorable grâce à ses compétences couvrant la conception, le test, l'encapsulation et des plateformes technologiques prometteuses .	 	• Écosystème complémentaire/fort maillage fonctionnel • Spécialisation dans niches technologiques à forte complexité	• Marchés applicatifs stratégiques • Absence de fonderie dédiée
ÉLECTRONIQUE BIOSOURCÉE	Le Québec dispose d'un écosystème structuré combinant chimie verte, biomasse et électronique imprimée, propice aux collaborations en réseau. Plusieurs acteurs intègrent déjà ces technologies, mais l' absence de fournisseurs de molécules plateformes et de substrats adaptés reste un défi.	 	• Présence d'acteurs innovants spécialisés • Accès privilégié la biomasse	• Potentiel champion nord-américain de l'électronique durable • Manque de fournisseurs de molécules plateformes

04

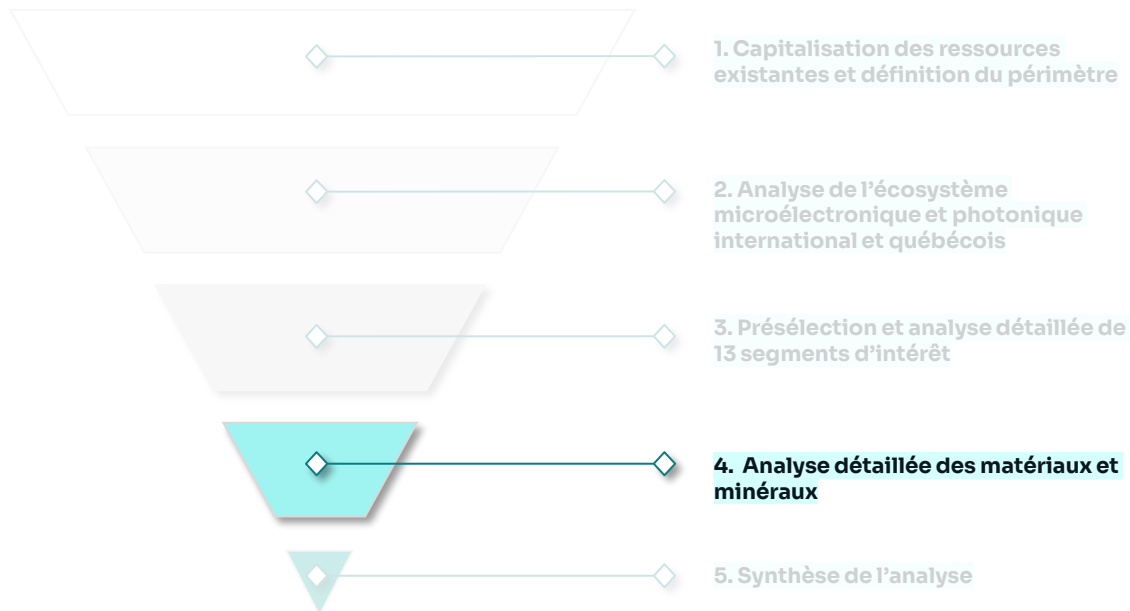
Minéraux et matériaux critiques

- A. Méthodologie
- B. Répartition géographique des ressources
- C. Étude approfondie de 15 MCS
- D. Vision et occasions d'affaires pour le Québec

Minéraux et matériaux critiques | Rappel des enjeux et objectifs

Cette section **analyse les minéraux et matériaux critiques utilisés en photonique et microélectronique**, afin d'évaluer la position actuelle du Québec dans ces chaînes de valeur. L'objectif est d'**identifier les ressources disponibles, les maillons stratégiques et les leviers potentiels permettant à la province de renforcer son rôle dans ces filières technologiques prioritaires.**

Lien avec la méthodologie d'ensemble



PRINCIPAUX ENJEUX

- > **Complexité et nombre élevé de matériaux et minéraux impliqués dans ces chaînes de valeur** : plus de 85 éléments ont été recensés
- > **Accès à la donnée des projets d'exploration, production et transformation des matériaux** : le MRNF et l'ISDE ont permis le recueil et la compilation de ces informations



PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE

- > Périmètre géographique - **International, Québec**
- > Périmètre d'étude - **Matériaux, Minéraux et Réactifs/Précurseurs**

Grandes catégories de minéraux/matériaux | Classification

Plus de **85 éléments distincts ont été recensés** dans le cadre de l'analyse croisée entre matériaux et technologies. La diversité de leurs natures, fonctions et états de transformation rend leur classification directe complexe. Afin de faciliter leur lecture, leur analyse comparative et leur traitement, une structuration en trois grandes catégories fonctionnelles a été retenue : les **matières premières brutes**, les **matériaux transformés** et les **réactifs/précurseurs de procédés**.



MATIÈRES PREMIÈRES BRUTES – 42 ÉLÉMENTS IDENTIFIÉS

DESCRIPTION

Éléments chimiques ou minéraux extraits directement du sol (sous forme de minerai, gaz ou sel brut), nécessitant peu ou pas de transformation chimique avant leur intégration dans des procédés industriels ou de fabrication.

CARACTÉRISTIQUES CLÉS

- Issues de l'extraction minière, métallurgique ou gazière
- Peu transformées chimiquement à ce stade

EXEMPLES

Métaux

Cu Ni Co Ga

Non métaux

Si As P S



MATÉRIAUX TRANSFORMÉS – 9 ÉLÉMENTS IDENTIFIÉS

DESCRIPTION

Matériaux ayant subi une transformation physique ou chimique avancée à partir de matières premières, pour obtenir des composés à propriétés spécifiques (optiques, électriques, mécaniques, diélectriques).

CARACTÉRISTIQUES CLÉS

- Résultent d'un ou plusieurs procédés de transformation
- Peuvent servir de substrats, couches actives, etc.

EXEMPLES

Céramiques

Al₂O₃ BaTiO₃ LiNbO₃

Autres

SiC SiO₂



RÉACTIFS OU PRÉCUSEURS DE PROCÉDÉS – 34 ÉLÉMENTS IDENTIFIÉS

DESCRIPTION

Éléments chimiques ou composés (souvent gazeux, liquides ou volatils) utilisés dans les procédés de fabrication avancée (dépôt chimique, dopage, gravure, passivation) mais n'entrant pas directement dans la composition finale du produit ou n'y étant présents qu'à l'état de traces.

CARACTÉRISTIQUES CLÉS

- Jouent un rôle temporaire ou indirect (transporteur, catalyseur, etc.)
- Utilisés dans des technologies comme le CVD, MOCVD, etc.

EXEMPLES

Gaz de dépôt

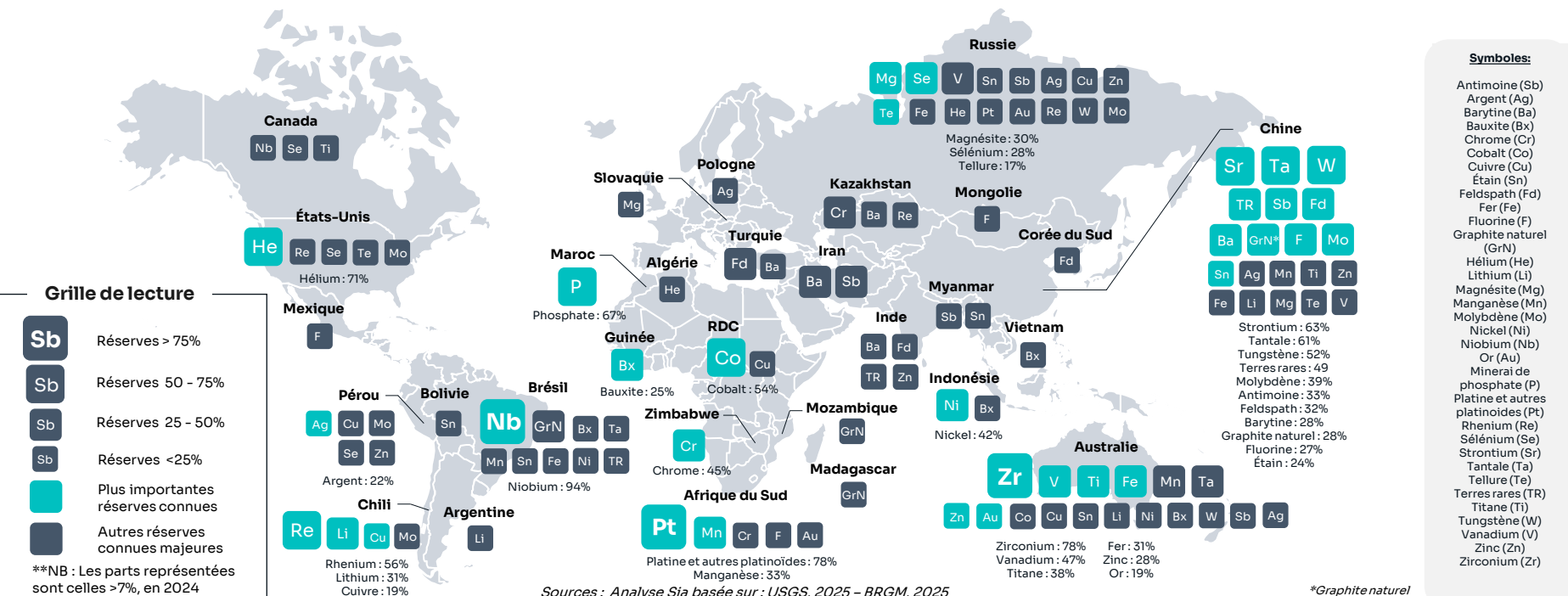
Cl₂ SF₆ BCl₃

Agent de dopage

H₂O₂ SiCl₄ PH₃

Répartition géographique | Réserves***

Malgré une répartition des réserves mondiales relativement équitable, **la Chine et l'Australie** figurent parmi les **3 premiers détenteurs** pour près de **la moitié des 33 minéraux critiques et stratégiques analysés****. La **très forte concentration des réserves** – un seul pays détient plus d'un tiers des ressources pour plus de la moitié des minéraux – renforce la centralisation des chaînes d'approvisionnement et leur vulnérabilité aux tensions géopolitiques. **Sur les 15 minéraux critiques présents au Canada**, soit 45% des MCS analysés, **seuls 3 dépassent 7 % des réserves mondiales**.



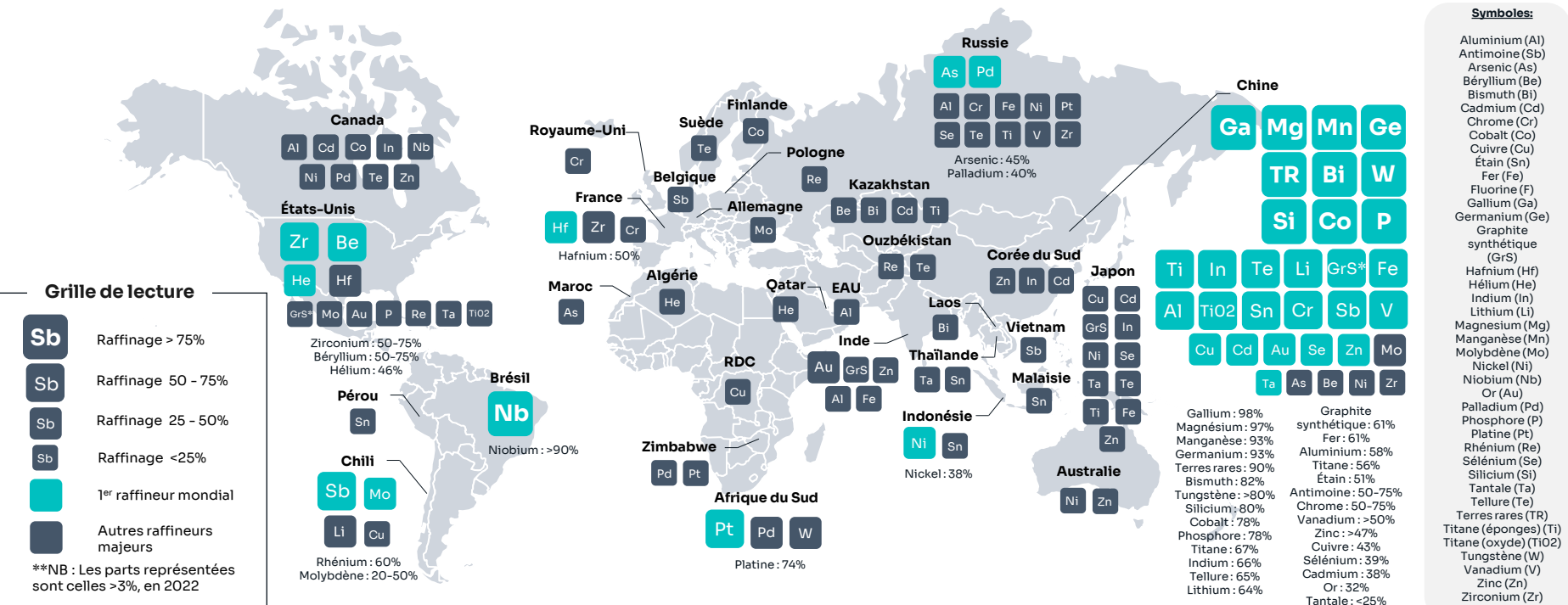
Répartition géographique | Production

La **concentration des capacités s'accroît en progressant dans la chaîne de valeur**. Sur les 39 minéraux critiques analysés**, le **premier producteur mondial contrôle au moins un tiers de la production dans près de 80 % des cas**. Un quart des minéraux affiche une concentration de 65 % ou plus, donc une situation de monopole. La Chine, **premier producteur dans près de la moitié des cas**, regroupe à elle seule **près des deux tiers de ces monopoles**. Peu visible sur la carte (en raison de parts inférieures au seuil de 7 %), le Canada participe néanmoins à **plus de 1 % de la production mondiale pour plus du tiers des minéraux étudiés**.



Répartition géographique | Raffinage

Le raffinage présente la plus importante concentration des activités à l'échelle internationale. Sur les 40 minéraux critiques analysés**, le premier raffineur détient au moins **50 % des capacités mondiales** dans près de **75 % des cas** et au moins **un tiers dans 95 % d'entre eux**. La Chine, **première productrice pour 75 % de ces minéraux**, représente 13 des 16 monopoles (où un acteur concentre 65 % ou plus de la production mondiale). Le Canada doit renforcer ses capacités sur cette étape de la chaîne de valeur. Bien qu'ayant des capacités de raffinage sur 11 des 40 MCS analysés, **seules 9 d'entre elles dépassent 3% de la capacité de raffinage mondiale** (et sont donc représentées sur la carte).



Analyse détaillée | 15 MCS sélectionnés

Dans la suite des travaux, **15 minéraux ont été retenus pour une analyse approfondie** en raison de **leur rôle central en photonique et microélectronique, de leur criticité élevée à l'échelle mondiale et du positionnement stratégique que pourrait occuper le Québec dans leur extraction, transformation ou valorisation/recyclage**. Cette sélection vise à étudier plus finement les matières premières essentielles à la structuration des filières photoniques et microélectroniques.

QUELQUES ÉLÉMENTS D'ANALYSE SUR LES 15 MCS ÉTUDIÉS :

Al	Utilisé pour interconnexions et structure de puce. Critique notamment à cause de sa production très énergivore.
Ti	Sert de barrière de diffusion et pour les alliages. Dépendance marquée à la Russie.
Cu	Conducteur clé en microélectronique. Forte demande et pression sur l'extraction mondiale.
Sc	Alliage aluminium-scandium pour batteries et composants RF. Approvisionnement extrêmement limité, filière émergente.
Pd	Contacts et catalyseurs. Hautement critique, dominé par la Russie, substitution difficile.
Co	Alliages et batteries. Approvisionnement concentré en RDC, risques géopolitiques et éthiques élevés.
Ga	Semi-conducteurs composés. Critique pour sa dépendance quasi totale à la Chine.
Ge	Optoélectronique et infrarouge. Approvisionnement restreint, fortement dépendant de la Chine.

Ni	Alliages et contacts métalliques. Approvisionnement concentré, raffiné majoritairement en Chine.
In	Écrans, lasers et semi-conducteurs composés. Sous-produit rare, chaîne d'approvisionnement dominée par la Chine.
Li	Intégration croissante dans dispositifs optoélectroniques. Criticité liée à la croissance rapide de la demande mondiale.
Nb	Utilisation pour alliages superconducteurs, TFLN et LiNbO ₃ . Approvisionnement concentré au Brésil et au Québec.
Si	Base des semi-conducteurs. Abondant mais nécessite pureté très élevée maîtrisée par peu d'acteurs.
Gr*	Anodes, capteurs et électronique flexible. Chaîne dominée par la Chine, stratégique dans l'électrification.
ETR**	Aimants, dopants, alliages. Criticité élevée pour leur rôle transversal et approvisionnement dominé par Chine/Russie.

*Gr: Graphite

**Éléments de terres rares (en dehors de Scandium)

Analyse détaillée | Tensions et restrictions commerciales

Depuis 2022, un **accroissement des tensions commerciales autour des minéraux critiques et stratégiques** est observé. La position dominante de la Chine, par exemple, en fait un **levier géoéconomique** puissant, lui permettant **d'influencer directement les flux commerciaux**. Pour d'autres grands producteurs (Congo, Russie, etc.), les restrictions à l'exportation servent également d'outil pour **contrôler l'offre sur les marchés internationaux, encourager la transformation locale ou exercer des sanctions ciblées à l'échelle mondiale**.



RISQUES COMMERCIAUX

- ▷ **Risque géopolitique élevé** : restrictions à l'export ou contrôle élevé par la Chine



- ▷ **Politiques commerciales spécifiques** : interdiction d'exportation pour favoriser la transformation locale



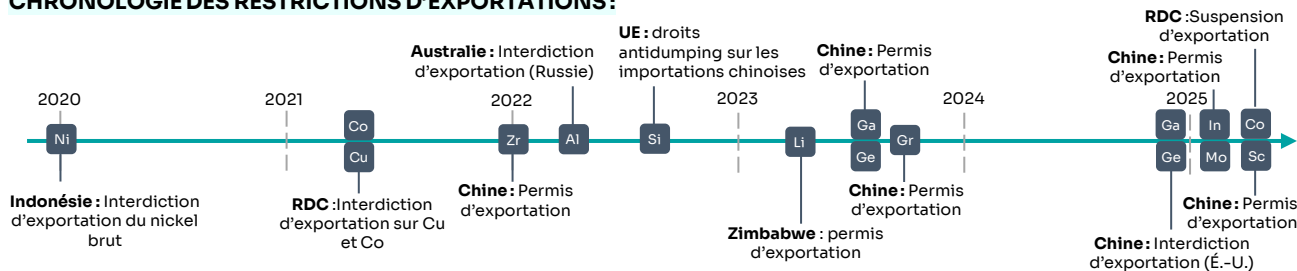
- ▷ **Restrictions ciblées** : contexte spécifique lié à l'instabilité russe, imposition de droits de douane



- ▷ **Risque latent** : concentration appro. - vulnérabilité à un possible resserrement des exportations



CHRONOLOGIE DES RESTRICTIONS D'EXPORTATIONS :



TENDANCES GÉNÉRALES

Contrôle renforcé de la Chine – La Chine est le pays qui impose le plus de restrictions à l'exportation de MCS, notamment via des permis exigés pour 7 des 15 minéraux analysés. Ces permis permettent d'examiner, voire de bloquer, certains flux sortants. Le **gallium** et le **germanium** font l'objet d'un contrôle renforcé en raison de leurs usages militaires, avec une interdiction explicite d'exportation vers les États-Unis.

Interdiction des exportations de minerais bruts – L'Indonésie a interdit les exportations de **nickel** non transformés en janvier 2020 pour développer sa transformation locale. La RDC a suivi une logique similaire avec l'interdiction, en février 2025, des exportations de **cobalt** non transformé, entraînant un rebond des prix de 67 %.

Sanctions liées au conflit en Ukraine – Les MCS sont également utilisés comme un moyen de sanction envers la Russie. L'Australie a interdit ses exportations d'aluminium vers la Russie et le G7 a banni l'importation d'or russe.

Contournement et négociation stratégique – Les États-Unis ont contourné les restrictions chinoises via des pays tiers comme la Belgique, où les exportations de **germanium** ont bondi de 224 % entre 2022 et 2024, malgré une baisse globale. Ce détournement montre les limites des contrôles. En parallèle, les tarifs américains ont servi de levier menant à un accord en juin 2025, par lequel la Chine a accepté d'émettre des licences temporaires pour réexporter certains MCS vers les États-Unis.

Analyse détaillée | Étude des principales applications

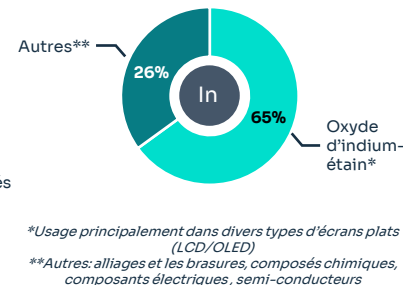
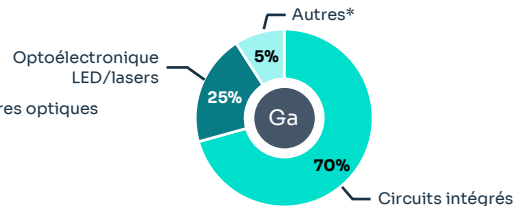
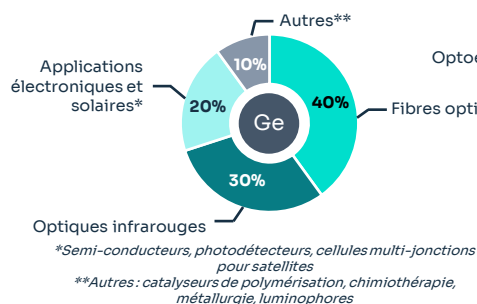
Bien que stratégiques, **les secteurs de la microélectronique et de la photonique ne constituent pas les principaux débouchés pour la majorité des MCS analysés**. Par ailleurs, les exigences de pureté très élevée limitent davantage l'accès aux matériaux, dans un contexte où d'autres filières en forte croissance — comme les batteries, le solaire ou l'aéronautique — mobilisent déjà une part importante de l'offre disponible. **Cette dépendance excessive à ces filières dominantes rend l'approvisionnement plus vulnérable** : toute instabilité ou réorientation stratégique dans ces marchés affectent directement la disponibilité des MCS.



CONCENTRATION SECTORIELLE

- ▶ **Batteries** : l'essor de l'utilisation des batteries accapare une part majeure de certains minéraux avec **87%** de la demande en **Li**, **73%** de la demande en **Co**, **40%** du **Gr** mondial et **16%** du **Ni** mondial.
- ▶ **Solaire** : la demande en PV représente **95%** de la demande en **Si** de haute pureté, soit environ 1/3 de la demande globale en **Si**.
- ▶ **Piles à combustibles à oxydes solide** : représente 55% de la consommation mondiale en **Sc**.
- ▶ **Aéronautique et applications industrielles** : accaparent **85%** de la demande mondiale en **Ti**.
- ▶ **Automobile** : l'usage du **Pd** dans les pots catalytiques automobiles, représentent de loin le principal usage avec **80%** de la demande.

APPLICATIONS PRINCIPALES DU GERMANIUM, DU GALLIUM, ET DE L'INDIUM :



COMPÉTITION DES APPLICATIONS

Usage dominant en microélectronique/photonique - Seuls le germanium, le gallium et l'indium présentent une spécialisation marquée en microélectronique et photonique.

Forte concurrence d'autres secteurs - Le lithium, le cobalt et le graphite sont majoritairement utilisés dans les batteries ; le silicium de haute pureté dans le solaire ; l'or comme réserve de valeur ; le titane dans l'aéronautique ; et le palladium dans l'automobile, rendant ces matériaux particulièrement vulnérables dans les applications microélectroniques/photoniques

La concentration de la demande autour de secteurs en forte croissance (solaire, batteries, aéronautique), combinée à la faible capacité de substitution de certains MCS, accroît le risque de tensions d'approvisionnement. Tout nouvel apport risque d'être immédiatement capté par ces marchés dominants, limitant l'accès pour les filières de la microélectronique et de la photonique.

Recyclage et valorisation | Occasions d'affaires pour le Québec

Les effluents et déchets de l'industrie minière regorgent des sources secondaires à exploiter. Le Québec dispose d'atouts considérables pour développer ces filières et n'est qu'au début de la structuration de son approche d'économie circulaire. Pour tirer pleinement parti de son avantage en matière de recyclage, **l'approche circulaire doit évoluer vers une intégration systématique des acteurs — mines, fonderies, centres de recherche et zones d'innovation —** afin de réduire la fragmentation de la filière. Cette synergie industrielle **permet de transformer les contraintes environnementales en leviers économiques autour des MCS** par l'innovation collaborative promue par les RSRI.



PRINCIPAUX CONSTATS



QUELQUES ÉLÉMENTS D'INTÉRÊT DE LA FILIÈRE AU QC

Une volonté politique forte autour du recyclage – Le MRNF et le MEIE ont conjointement investi plus de 14M\$ depuis 2022 à travers leurs différents programmes de soutien pour garantir une meilleure circularité des MCS au QC.

- **Nickel, cobalt, cuivre** : Bénéficient d'une large part des fonds (respectivement 46%, 42% et 25%*) en raison de leur polyvalence, notamment en microélectronique et dans les batteries
- **Indium, gallium, scandium** : Malgré l'absence de production primaire au Québec, ne reçoivent respectivement que 3 %, 2 % et 2 % des financements

Une filière en cours d'industrialisation – Plusieurs initiatives uniques québécoises en recyclage des MCS sont en phase de maturation, porté par un cadre actuel favorable. Le MRNF, via le CRITM et PRIMA, soutient des projets visant à développer et favoriser le recyclage. Par ailleurs, la modification de la Loi des mines précise maintenant la notion d'exploitation de résidus miniers et mentionne l'économie circulaire.

- **GreeNovel** : Extraction de plus 65 métaux et éléments à partir de sources non conventionnelles comme le pétrole et les déchets électroniques
- **Rio Tinto Fer et Titane (RTFT)** : Valorisation des résidus issus de la production de dioxyde de titane pour extraire de l'oxyde de scandium



CHAMPIONS QUÉBÉCOIS

	Pr Nd Nb Co	Recyclage des terres rares contenues dans les aimants
	Li Co Gr Ni	Recyclage des batteries
	Pd Cu	Revalorisation des métaux issus des mines urbaines
	Te In Zn Sb	Plus grand complexe de traitement du tellure au monde



Zoom sur quelques projets d'intérêt

Ressources Géoméga : appuyée par 3 M\$ du Québec, le projet de récupération des terres rares représente la première usine pilote du genre en Amérique du Nord;
enim : appuyée par plus de 6,8 M\$ du fédéral et du provincial, l'entreprise exploite une unité pilote (200 t/an) pour recycler des déchets électroniques sans cyanure ni mercure;
RTFT : premier producteur nord-américain de scandium de haute pureté.



ÉLÉMENTS DIFFÉRENCIANTS AU QC

Potentiel dans des minéraux extrêmement critiques – Un projet pilote à Vaudreuil est en cours à l'usine de production d'aluminium de Rio Tinto pour en extraire le **gallium**. De même, des tests ont été effectués pour extraire le **germanium** des sous-produits du zinc.

Projets stratégiques déjà enclenchés – Le Québec se distingue par des projets pionniers comme Géoméga (terres rares) et RTFT (scandium), premiers du genre en Amérique du Nord.

Expertise locale – Le Québec dispose d'un savoir-faire reconnu en métallurgie et en ingénierie chimique, essentiel à la valorisation des minéraux critiques.

Écosystème de recherche – Un réseau actif combinant centres de recherche (CNETE, CTTÉI, CTRI, Corem, etc.) et d'entreprises (enim, NeoCtech...) développe des procédés de recyclage pour les minéraux critiques.

Soutien politique clair – La stratégie provinciale soutient activement le développement des capacités de recyclage et de valorisation des résidus miniers par le biais d'aides financières ciblées

**Somme supérieur à 100% car projets miniers croisés*

Matériaux et minéraux | Occasions d'affaires pour le QC

Le Québec se positionne particulièrement bien pour exploiter la valeur sur les chaînes amont de la microélectronique/photonique. Certains MCS extrêmement critiques et à la chaîne d'approvisionnement restreinte, comme **l'indium, le gallium ou le germanium**, présentent un fort potentiel de valorisation locale. Combiné à une **base industrielle existante pour le silicium, l'aluminium ou, à moyen terme, les terres rares**, ce potentiel ouvre la voie à une stratégie de développement ciblée.

	Criticité au niveau international	Utilisation en microélectronique/photonique	Potentiel au QC
Indium	●●●● Offre dominée par la Chine et restrictions exportation	●●●● Indispensable en photonique (écrans, SC, etc.)	●●●○ Valorisation déjà présente + potentiel résidus zinc
Aluminium	●●●○ 60% de la fourniture provenant de Chine	●●○○ Interconnexions et alliages optoélectroniques (AlGaAs)	●●●● Chaîne mature (8 alumineries)
Titane	●●●○ 68% du titane métal provenant de Chine	●●●○ Barrière conductrice dans les puces avancées	●●●○ Exploitation d'ilménite et bon potentiel au QC
Cuivre	●●○○ Offre mondialisée mais applications concentrées	●●●● Métal d'interconnexion incontournable	●●●● Potentiel élevé et fonderie/mine présente
Scandium	●●●● Production mondiale en faible quantité et concentrée en CN/RU	●●○○ Utilisé en dopage laser et alliages conducteurs	●●●● RTFT, RTA et Scandium Canada développent filière Sc
Palladium	●●●● Forte dépendance à la Russie	●○○○ Plaquage anticorrosion de fils/contacts	●●○○ Potentiel géologique élevé, produit en petite qté
Cobalt	●●●● Dépendance extrême à la RDC	●●○○ Utilisé pour les contacts de puces avancées	●●●● Une mine en opération, production de 200t/an
Gallium	●●●● 98% de la production primaire en Chine	●●●● Incontournable dans lasers, LED, puces, etc.	●●○○ Projet pilote pour valorisation résidus Al
Germanium	●●●● La Chine représente plus de 60% du marché mondial	●●●● Indispensable en photonique, notamment	●●○○ Valorisation mineure, potentiel dans les résidus de zinc
Nickel	●●●○ Extraction concentrée en Indonésie et Philippines, raffinage en CN	●●○○ Contacts métalliques, électrodes et MEMS	●●●● Production de 42kt/an, potentiel géologique élevé
Lithium	●●●● Chine concentre 60% du raffinage, demande qui explose	●●●● LiNbO ₃ + Batterie dans dispositifs électroniques	●●●○ Potentiel géologique élevé + plusieurs projets actifs
Niobium	●●●○ Approvisionnement concentré au Brésil (>85%)	●●○○ LiNbO ₃ , TFLN, et autres composants superconducteurs	●●●● 6% de la prod. mondiale, 2 ^{ème} producteur mondial
Silicium	●○○○ Ressources abondantes en quartz	●●●● Base des semi-conducteurs	●●●○ Exploite la silice via 2 mines, 2 producteurs de Si métal
Graphite	●●●● Forte dépendance à la Chine	●●○○ Matériaux anodes + électronique flexible	●●●○ Usine de graphite et usine de graphène
Terres rares	●●●● Criticité extrême - concentration en Chine	●○○○ Aimants permanents, modulateurs optiques	●●○○ Plusieurs projets de valorisation en cours

Légende:

●○○○ / ●●●●
Faible ▲ / ▲Élevé

05

**Synthèse et conclusion –
7 thématiques d'intérêt**

Synthèse et conclusion | Introduction



TECHNOLOGIES ET MARCHÉS



PREMIÈRE ÉTAPE DE PRIORISATION COMPLÉTÉE

Sur le plan technologique et commercial, les **13 segments** photoniques et microélectroniques ainsi que les **15 minéraux et matériaux** stratégiques associés, précédemment analysés, ont été identifiés comme **représentant les principales occasions d'affaires et de recherche pour le secteur au Québec.**



Ces occasions d'affaires permettraient :



Une réduction de la **dépendance aux importations**



Une **diversification des marchés d'exportation** vers des pays alliés



Un **renforcement des capacités nationales** en matière de sécurité et de défense



POLITIQUES CANADIENNES ET QUÉBÉCOISES

Plusieurs initiatives majeures sont à prendre en compte pour **appuyer et servir**, en particulier, **de locomotives publiques** au développement et à une meilleure intégration des chaînes de valeur des produits photoniques et microélectroniques :

Budget et investissement défense - En tant que membre de l'OTAN, le Canada s'est engagé à augmenter ses dépenses annuelles en défense et sécurité de 1,3% du PIB en 2023 à 5% en 2035, **passant de 41 G\$ par an à plus de 150 G\$.**

Collaboration Canada/Québec - Les gouvernements du Canada et du Québec entendent collaborer à la mise en œuvre de projets majeurs miniers, énergétiques et industriels, tout en contribuant à mieux intégrer les MCS dans les chaînes d'approvisionnement nationales.

Plan québécois pour la valorisation des minéraux critiques et stratégiques - Une nouvelle mouture de la stratégie québécoise sur les MCS et le recyclage est en cours d'élaboration par le gouvernement.

Cela constitue une invitation aux entreprises québécoises et aux organisations qui les soutiennent **de jauger ces occasions et prendre en compte celles qui leur semblent les plus pertinentes** dans leurs stratégies de positionnement, dans leurs actions et services d'appui. Dans la suite de cette étude, **7 thématiques d'intérêt**, sur lesquelles nous recommandons de concentrer l'action, sont présentées.

Thématique d'intérêt | Les ressources minérales critiques



UN POTENTIEL IMPORTANT EN RESSOURCES MINÉRALES CRITIQUES

Le Québec dispose d'atouts considérables en minéraux critiques pour la microélectronique et photonique. Certains MCS extrêmement critiques et à la chaîne d'approvisionnement restreinte (comme **l'indium, le gallium ou le germanium**), présentent un fort potentiel de valorisation locale.

Combiné à une base industrielle existante **pour le silicium, le nickel, le cuivre, l'aluminium** ou, à moyen terme, **les terres rares**, ce potentiel pourrait soutenir les filières microélectroniques et photoniques locales et à l'export.

ÉLÉMENTS DE RÉFLEXION À CONSIDÉRER – Un renforcement des liens industriels entre les MCS et leurs applications dans des secteurs stratégiques (défense, télécoms, datacom, etc.), conjugué à une meilleure cohérence entre les stratégies canadienne et québécoise sur les MCS et les priorités sectorielles permettrait de maximiser les retombées économiques et technologiques.

Pour le développement de filières locales, il pourrait être intéressant de concilier deux logiques complémentaires : **la recherche de volumes suffisants pour atteindre une masse critique** sur le marché, et **la prise en compte des impératifs de souveraineté**, y compris pour des productions de plus faible envergure.

ÉLÉMENTS DE RÉFLEXION À CONSIDÉRER – Un soutien accru à la R-D collaborative et à la mise en production locale de substrats et matériaux de prochaine génération (GaN, LNOI, polymères biosourcés, BTO, etc.), s'appuyant sur des forces déjà présentes au Québec (dont des expertises québécoises en chimie des matériaux et en nanofabrication par exemple), contribuerait à favoriser une meilleure captation de la valeur liée à la transformation de ces ressources.

Thématique d'intérêt | Intégration des chaînes de valeur



DES CHAÎNES DE VALEUR FRAGMENTÉES ET INCOMPLÈTES

La chaîne de valeur québécoise en MCS, photonique et microélectronique est fragmentée, avec peu de connexions entre **les maillons amont, médian et aval**. Les matières premières (minéraux et alliages) sont majoritairement exportées sans transformation locale, tandis que de nombreux intrants intermédiaires (composants, matériaux raffinés) sont importés, **donc vulnérables aux tarifs et aux restrictions à l'exportation** de pays étrangers.

Par ailleurs, il existe **peu de passerelles entre les développeurs de technologies et les secteurs utilisateurs finaux**. Cette situation freine l'émergence de chaînes de valeur intégrées et stratégiquement positionnées. Ces filières présentent des complémentarités qui pourraient être davantage exploitées.

EXEMPLE DE SYNERGIES INTERFILIÈRES – La valorisation du gallium issu de résidus industriels permet d'alimenter la fabrication de composants photoniques (lasers, semi-conducteurs composés, etc.). À l'inverse, les technologies de caméras infrarouges, sont utilisées en exploration minière pour analyser les carottes et identifier des minéraux critiques.

Une meilleure coordination permettrait de mieux relier **les maillons amont** (extraction, raffinage) **aux applications aval** (défense, télécoms, datacoms, etc.), en identifiant les synergies et les chaînons manquants.

ÉLÉMENTS DE RÉFLEXION À CONSIDÉRER – Plusieurs acteurs au Québec semblent graviter autour des technologies de semi-conducteurs composés et des circuits intégrés photoniques, notamment en lien avec des activités de photonique quantique, de photonique sur silicium ou d'encapsulation avancée. Toutefois, ces dynamiques s'inscrivent dans un contexte où une capacité locale de fabrication apparaît comme un maillon encore manquant.

Thématique d'intérêt | R-D collaborative



RENFORCER LES CHAÎNES DE VALEUR PAR L'INNOVATION COLLABORATIVE

L'**innovation collaborative** constitue un levier essentiel pour dé-risquer et faire émerger un **leadership technologique** dans plusieurs domaines sur lesquels **le Québec est bien positionné** et **qui sont en forte croissance mondiale**, tels que la photonique quantique, les composants pour centres de données, la photonique sur silicium ou les systèmes d'imagerie avancés.

Au Québec, plusieurs PME innovantes sont actives dans ces domaines, **et pourraient être accélérées par des passerelles solides entre recherche et industrie** pour faciliter le passage de la R&D à l'industrialisation.

Ce rôle de l'innovation collaborative ne se limite toutefois pas à l'aval technologique. Il s'étend à l'ensemble de la chaîne de valeur, y compris à **l'amont** (transformation des minéraux, chimie des matériaux) et **aux étapes intermédiaires** (procédés de fabrication, encapsulation, recyclage, etc.).

EXEMPLE DE SUJETS DE R-D COLLABORATIVE EN AMONT DE LA CHAÎNE DE VALEUR – La R-D sur les minéraux, matériaux et procédés est essentielle pour surmonter les principaux défis à la compétitivité des projets québécois; par exemple, obtenir des oxydes de haute pureté, recycler des produits électroniques ou valoriser à moindre coût des sous-produits, développer des produits nouveaux ou des matériaux se substituant à d'autres plus rares.

Pour soutenir ces initiatives et **renforcer le lien entre industrie et recherche**, il pourrait être pertinent de **s'appuyer sur les regroupements sectoriels de recherche industrielle (RSRI)**, dont c'est le métier de rapprocher les besoins industriels de l'expertise en recherche. Leur pratique **d'une culture de collaboration intersectorielle** et de mise en relation entre acteurs de différentes filières constitue un levier structurant pour accélérer le développement de projets collectifs.

EXEMPLE DE SUJETS DE R-D COLLABORATIVE SUR LE RECYCLAGE/LA VALORISATION DE RÉSIDUS – Le recyclage des produits électroniques et la valorisation à moindre coût des sous-produits représentent des leviers importants pour renforcer l'autonomie en matériaux critiques. Dans le cas des mines urbaines, par exemple, la réintégration des MCS dans des chaînes de production exige l'atteinte de niveaux de pureté très élevés.

Thématique d'intérêt | Résidus miniers et mines urbaines



LES EFFLUENTS ET DÉCHETS DE L'INDUSTRIE MINIÈRE ET ÉLECTRONIQUE REGORGENT DES SOURCES SECONDAIRES À EXPLOITER

Le Québec dispose d'un **important gisement de ressources secondaires issues des résidus miniers, des flux industriels et des déchets électroniques**, offrant un réel potentiel pour renforcer l'approvisionnement en minéraux critiques et stratégiques.

Des initiatives ont déjà émergé dans le recyclage de batteries, de circuits électroniques et la valorisation de sous-produits miniers, appuyées par le lancement du Plan québécois pour la valorisation des MCS (PQVMCS) en 2020. Le rapprochement des filières, **connectant les secteurs minier, métallurgique, électronique et les centres de recherche**, permettrait d'accélérer la structuration de cet écosystème.

Le **concept de mines urbaines**, encore peu mobilisé, constitue également une voie prometteuse pour récupérer des MCS à partir de déchets électroniques à forte valeur ajoutée (cuivre, terres rares, gallium, etc.). **Réutiliser/réintroduire les MCS** en microélectronique ou en photonique, pour s'assurer des bons niveaux de pureté, devra faire appel aux capacités de recherche existantes.

EXEMPLE INTERNATIONAL – À l'international, plusieurs pays renforcent leur encadrement des flux de déchets électroniques pour créer des mines urbaines locales. L'Union européenne, par exemple, restreint plus strictement les exportations de déchets électroniques, tandis que les États-Unis étudient actuellement des propositions législatives en ce sens. Ces initiatives visent à limiter les pertes de matériaux critiques et encourager le retraitement local.

EXEMPLE LOCAL – Rio Tinto a produit du gallium primaire à partir de l'affinage de l'alumine et prévoit une usine commerciale au Saguenay-Lac-Saint-Jean (40 t/an, soit 5 à 10 % de la production mondiale), sous réserve de résultats concluants. Plusieurs projets similaires sont en opérations ou à l'étude pour valoriser l'oxyde de scandium, ou le germanium.

Thématique d'intérêt | Passage à l'échelle industrielle



L'ACCÈS AUX MARCHÉS ET AU FINANCEMENT SONT DES FACTEURS STRUCTURANTS

Le marché québécois demeure de taille limitée, ce qui incite les acteurs de la microélectronique et de la photonique à élargir leur présence au-delà du territoire provincial pour soutenir leur développement. Ainsi, **la majorité des clients des acteurs québécois sont à l'extérieur du territoire** (par exemple, 75 % des clients du Centre de photonique canadien d'Ottawa sont étrangers).

L'accès **aux marchés et la capacité de commercialisation** sont des conditions essentielles pour permettre aux entreprises de **passer à l'échelle industrielle**.

ÉLÉMENTS DE RÉFLEXION À CONSIDÉRER - Le recours **aux marchés publics** pourrait contribuer à **stimuler la demande locale** et soutenir la commercialisation des technologies québécoises. **L'intégration de critères favorisant les composants électroniques et photoniques développés localement**, dans des secteurs stratégiques (défense, télécom, datacom, etc.), permettrait de sécuriser un volume d'activité initial et de faciliter l'industrialisation.

EXEMPLE INTERNATIONAL - Le Département américain de la Défense applique depuis les années 2000 un programme de "Trusted Foundry" pour ses microcircuits : **il réserve certains approvisionnements critiques à des fonderies et assembleurs domestiques approuvés**, garantissant ainsi un marché captif aux acteurs nationaux tout en assurant la sécurité d'approvisionnement pour l'armée.

Par ailleurs, l'accès au capital pour passer de la R-D à l'industrialisation reste un défi au Québec. Le Québec excelle pour la R-D et le prototypage mais **le manque de capitaux pour les phases de croissance pousse plusieurs entreprises à chercher du financement à l'international**.

Le passage difficile des subventions R&D aux capitaux de risques, **peut limiter le développement local et favoriser des acquisitions précoces**. Par ailleurs, en photonique particulièrement, **la structuration verticale des grands groupes mondiaux**, qui concentrent l'innovation et la valeur, contribue à accélérer les acquisitions d'entreprises en croissance.

Thématique d'intérêt | Formation d'alliances



NÉCESSITÉ D'ALLIANCES POUR ÉLARGIR L'ACCÈS AUX MARCHÉS

Bien que dynamique, **le marché et l'écosystème québécois présentent certaines limites en matière d'ampleur et d'accès**. Le développement de **collaborations interprovinciales, notamment avec l'Ontario et l'Alberta**, mais aussi de partenariats entre PME et grandes entreprises — tant au Québec qu'au Canada — permettrait de mutualiser les ressources, de renforcer la complémentarité des chaînes d'approvisionnement et d'accroître la portée commerciale des solutions développées localement.

EXEMPLE DE COLLABORATION – Par exemple, des collaborations déjà engagées entre le CPFC, qui possède des capacités de fabrication de semi-conducteurs composés, et l'écosystème québécois d'encapsulation avancée/lasers et circuits intégrés photoniques ouvrent la voie à une intégration plus poussée des chaînes de valeur entre les deux provinces

Sur le plan international, des partenariats complémentaires pourraient être développés **en s'appuyant sur les collaborations existantes avec les États-Unis**, tout en **intensifiant de nouvelles voies de collaborations avec des écosystèmes européens et asiatiques**.

Cette approche contribuerait à **renforcer la résilience des chaînes de valeur, développer de nouveaux marchés internationaux pour l'exportation, à élargir les sources de financement** et à **stimuler l'innovation**, sans remettre en cause les relations établies.

EXEMPLE DE COLLABORATION INTERNATIONALE – Le partenariat États-Unis-Japon dans les semi-conducteurs vise le co-développement de puces avancées, la recherche sur les technologies post-2 nm et le renforcement des chaînes d'approvisionnement. Il mobilise des acteurs publics et industriels et renforce les liens commerciaux entre les deux pays.

Thématique d'intérêt | Culture de rapprochement des filières



EMERGENCE D'UNE CULTURE DE COLLABORATION ET D'UNE VISION PARTAGÉE

L'étude a permis **d'amorcer un premier travail de cartographie des filières québécoises en MCS, matériaux avancés, microélectronique et photonique**, en identifiant les forces, faiblesses et occasions d'affaires des principaux maillons des chaînes de valeur et segments technologiques présents au Québec ainsi que **les interconnexions entre ces secteurs**.

Ce travail a également **mis en évidence plusieurs sujets d'intérêt collectif**, ainsi que **des complémentarités potentielles entre ces filières**. Des analyses complémentaires, ciblées sur certains créneaux et axes spécifiques, seront toutefois nécessaires pour **approfondir les constats, confirmer les opportunités identifiées et préciser les leviers** à mobiliser.

En parallèle de ses apports analytiques, l'étude a contribué dans une certaine mesure **à favoriser un rapprochement entre les acteurs impliqués dans le développement de ces filières**. En réunissant des représentants issus de milieux variés (industrie, organismes de soutien, institutions publiques, etc.), elle a permis de susciter **une prise de conscience plus large** quant aux interdépendances existantes le long des chaînes de valeur.

Cette dynamique a pu renforcer la perception d'un intérêt commun, contribuant à faire **émerger les bases d'une culture de filière plus intégrée, propice au développement de projets concertés** et à une meilleure cohérence stratégique entre initiatives existantes.

ÉLÉMENTS DE RÉFLEXION À CONSIDÉRER - Encourager des initiatives qui favorisent le rapprochement, les échanges et la collaboration entre ces acteurs contribue à consolider la dynamique naissante d'une culture partagée entre les acteurs des filières microélectroniques, photoniques, matériaux avancés et MCS, à renforcer la cohérence des actions collectives et à structurer un écosystème plus intégré.

06

Annexes

ANNEXE A – Matrice d'analyse croisée: minéraux/matériaux vs technologies

ANNEXE B – Abréviations, acronymes, termes techniques et glossaire des MCS

ANNEXE C – Sources

Minéraux et matériaux | Tableau de correspondance 1/4

Cette analyse croisée a permis de mettre en évidence **les liens entre chaque technologie et les matériaux qu'elle mobilise**, afin d'identifier les **occurrences de chaque matériau**, les **chevauchements critiques** et **construire ainsi une vision d'ensemble**.

Produit	MATIÈRES PREMIÈRES BRUTES																										
	Si	In	Al	Ti	Ni	Ga	As	P	Ge	Sb	Zn	Au	N	Pd	Co	C	Pt	Cu	Sn	Sc	Li	Ta	Nd	Fe	Pb	Ag	
Transducteur optique	X	X	X		X	X	X	X	X				X		X	X											
Lasers à SC	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X			X										
Systèmes d'imagerie	X	X	X		X	X	X	X	X	X			X		X	X		X		X	X			X			
Quantique	X																						X				
Encapsulation avancée	X	X	X	X	X				X			X		X	X		X	X	X	X		X					
MEMS	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X		X		
CIP	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X									X			
Circuits imprimés	X	X	X	X	X					X	X	X		X	X			X	X			X	X		X	X	
Electronique biosourcée				X							X					X		X	X		X					X	
SC composés	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X										
Amplificateurs optiques à SC	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X										
TOTAL	10	9	9	8	8	7	7	7	7	7	7	7	6	6	5	5	5	5	4	3	3	3	3	2	2	2	

Minéraux et matériaux | Tableau de correspondance 2/4

Cette analyse croisée a permis de mettre en évidence **les liens entre chaque technologie et les matériaux qu'elle mobilise**, afin d'identifier les **occurrences de chaque matériau**, les **chevauchements critiques** et construire ainsi une vision d'ensemble.

	MATIÈRES PREMIÈRES BRUTES															MATÉRIAUX									
Produit	Ne	Rb	Ca	Mo	Zr	Nb	Er	Gd	Y	Br	S	Bi	Mg	Dy	Pr	Al ₂ O ₃	Si ₃ N ₄	SiC	SiO ₂	HfO ₂	Ba	AlN	LiNbO ₃	BaTiO ₃	
Transducteur optique																X	X	X							
Lasers à SC																X			X	X					
Systèmes d'imagerie																X	X	X							
Quantique	X	X	X											X	X	X					X				
Encapsulation avancée																									
MEMS				X	X	X	X	X	X													X			
CIP																X	X		X				X	X	
Circuits imprimés										X	X	X							X						
Electronique biosourcée													X												
SC composés																X		X							
Amplificateurs optiques à SC																X	X								
TOTAL	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7	4	3	3	1	1	1	1	1	

Minéraux et matériaux | Tableau de correspondance 3/4

Cette analyse croisée a permis de mettre en évidence **les liens entre chaque technologie et les matériaux qu'elle mobilise**, afin d'identifier les **occurrences de chaque matériau**, les **chevauchements critiques** et **construire ainsi une vision d'ensemble**.

RÉACTIFS ET PRÉCURSEURS DE PROCÉDÉS

Produit	N ₂	Cl ₂	He	H ₂	AsH ₃	PH ₃	HCl	Se	Te	Be	Hf	H ₂ SO ₄	Cl	SF ₆	BR ₂	SiCl ₄	Ar	TMGa	TMIn	F	Ru	SiH ₄	B ₂	H ₂ Se
Transducteur optique	X	X	X								X	X	X			X	X						X	
Lasers à SC	X	X		X	X	X	X	X	X	X				X				X	X					X
Systèmes d'imagerie	X	X	X								X	X			X	X	X			X				
Quantique			X																					
Encapsulation avancée											X										X			
MEMS																					X			
CIP	X		X	X	X	X	X	X	X	X			X					X	X					
Circuits imprimés													X							X				
Electronique biosourcée																								
SC composés	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X		X	X							X		
Amplificateurs optiques à SC	X	X		X	X	X	X	X	X	X				X	X							X		
TOTAL	6	5	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1

Minéraux et matériaux | Tableau de correspondance 4/4

Cette analyse croisée a permis de mettre en évidence **les liens entre chaque technologie et les matériaux qu'elle mobilise**, afin d'identifier les **occurrences de chaque matériau**, les chevauchements critiques et construire ainsi une vision d'ensemble.

RÉACTIFS ET PRÉCURSEURS DE PROCÉDÉS

Produit	BCl ₃	O ₂	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	Br ₂	TMSb	TMAI	H ₂ O ₂
Transducteur optique								
Lasers à SC	X	X	X	X	X			
Systèmes d'imagerie								
Quantique								
Encapsulation avancée								
MEMS								
CIP						X	X	
Circuits imprimés								
Electronique biosourcée								
SC composés								X
Amplificateurs optiques à SC								
TOTAL	1	1	1	1	1	1	1	1



Dans l'analyse – **une emphase particulière a été mise sur les matières premières brutes** du fait de leur importance stratégique, du potentiel d'extraction/raffinage/recyclage au Québec et de leur rôle critique en amont des chaînes de valeur

Abréviations

Amplificateurs optiques à semi-conducteurs

AOS	Amplificateur optique à semi-conducteurs
FMCW	Onde Continue à Modulation de Fréquence
LA	Amplificateur limiteur
LiDAR	Téledétection par laser (Light Detection and Ranging)

Circuits imprimés

ABF	Fil de résine Ajinomoto Build-up
BT	Résine bismaléimide-triazine
Df	Facteur de dissipation
Dk	Contante diélectrique
ENEPIG	Finition or/palladium/nickel chimique
ENI	Finition nickel chimique
ENIG	Finition or/nickel chimique
FR4	Résine époxy renforcée à la fibre de verre
HASL	Finition étain-plomb par refusion à air chaud
HDI	Interconnexion à haute densité
IHM	Interaction homme-machine
IMS	Substrat métallique isolé
ODM	Fabricant de conceptions d'origine
OSP	Protection organique de surface

Circuits intégrés photoniques

LiNbO3	Niobate de lithium
LNOI	Niobate de lithium sur isolant
OSFP-XD	Format de connecteur optique de très haute densité pour les transmissions à très haut débit

Électronique biosourcée

PE	Polyéthylène
PET	Polytéréphtalate d'éthylène
PHA	Polyhydroxyalkanoates
PLA	Acide polylactique

Encapsulation avancée

BSPDN	Réseau d'alimentation par l'arrière
CHP	Chiplet ou sous-unité modulaire de puce
CoWos	Puce sur tranche sur substrat
CSP	Boîtier à l'échelle de la puce
EMIB	Pont d'interconnexion multi-puce intégré
FC BGA	Boîtier BGA
Foveros	Emballage 3D Foveros
HBM	Mémoire à large bande passante
HPC	Calcul haute performance
InFO	Encapsulation étendue intégrée

Abréviations

LDR	Ligne de redistribution
SoIC	Système sur puce intégré
VIPack	Emballage intégré polyvalent
Post-traitement	
ASIC	Circuit intégré spécifique à une application
DMDs	Dispositifs à micro-miroirs numériques
impr.	Impression
NGS	Séquencage de nouvelle génération
xMR	Famille de capteurs magnétorésistifs
Quantique	
FTQC	Calcul quantique tolérant aux fautes
NISQ	Quantique bruitée de taille intermédiaire
Q Saas	Logiciel quantique en tant que service
Qaas	Calcul quantique en tant que service
Semi-conducteurs composés	
DC-DC	Courant continu
FR3	Plage de fréquence 3
MBE	Épitaxie par jets moléculaires
MOCVD	Dépôt chimique en phase vapeur assisté par des composés organométalliques
OBC	Chargeur embarqué

Systèmes d'imagerie

InSb	Antimoine d'indium
kU	Millier d'unités
LWIR	Infrarouge à ondes longues
MWIR	Infrarouge à ondes moyennes
NIR	Infrarouge proche
SWIR	Infrarouge à ondes courtes
TIA	Amplificateur de transimpédance

Systèmes lasers

EUV	Lithographie en ultraviolet extrême
FBG	Réseau de Bragg
LMD	Dépôt métallique par laser
LPSSL	Laser à solide pompé par laser

Transducteurs optiques

AOC	Cables optiques captifs
BOSA	Sous-ensemble optique bidirectionnel
CDR	Récupération d'horloge et de données
CPO	Photonique co-intégrée
DML	Laser à modulation directe
DSP	Processeur de signal numérique
DWDM	Multiplexage de longueur d'onde dense

Abréviations

EML	Lasers modulés par électro-absorption (Electro-absorption Modulated Lasers)
FTTx	Fibre jusqu'à...
GPON	PON Gigabit
LPO	Optique linéaire
MCU	Microcontrôleur
PON	Réseau optique passif
TOSA	Sous-ensemble optique émetteur
XGS-PON	PON symétrique 10 Gb/s
Transverse	
ADAS	Systèmes avancés d'aide à la conduite
BTO	Titanate de baryum
CA	Canada
CAD	Dollars canadiens
CCTT	Centre collégial de transfert de technologies
CI	Circuits intégré
CIP	Circuits intégrés photoniques
cm	Centimètres
CMOS	Semi-conducteur à oxyde métallique complémentaire
CMUT	Transducteurs ultrasonore micromécanique capacitif
CW	Onde continue

Datacom.	Communication des données
DFB	Laser à rétroaction distribuée
DLPs	Projecteurs à micro-miroirs numériques
DPSSL	Laser à solide pompé par diode
DUV	Lithographie en ultraviolet profond
E/S	Entrée/Sortie
EEL	Lasers à émission latérale (Edge-Emitting Lasers)
É-U	États-Unis
Flex	Flexible
G	Milliards
GaAs	Arséniure de gallium
GaN	Nitride de gallium
Gb/s	Gigabit par seconde
GE	Grandes entreprises
Ge	Germanium
GHz	Gigahertz
Gouv.	Gouvernement
IA	Intelligence artificielle
IMU	Unité de mesure inertielle
InGaAs	Arséniure de gallium et d'indium
InP	Phosphure d'indium

Abréviations

IoT	Internet des objets (Internet Of Things)
IR	Infrarouge
km	Kilomètres
kW	Kilowatt
LD	Pilote de diode laser
LED	Diode électroluminescente
M	Millions
m	Mètres
MA	Matériaux avancés
MCS	Minéraux critiques et stratégiques
MEMS	Microsystème électromécanique (Micro Electromechanical System)
mm	Millimètres
n.d.	Non déterminé
NDT	Essais non destructifs (Non-Destructive Testing)
nm	Nanomètres
OEM	Fabricant d'équipement d'origine
OLED	Diode électroluminescente organique
PCB	Carte de circuit imprimé (Printed Circuit Board)
PI	Propriété Intellectuelle
PME	Petites et moyennes entreprises

PMUT	Transducteurs ultrasoniques piezoélectriques micro-usinés
QC	Québec
RA	Réalité augmentée
R-D	Recherche et Développement
RF	Radiofréquence
ROSA	Sous-ensemble optique récepteur
RU	Royaume-Uni
RV	Réalité virtuelle
SC	Semi-conducteurs composés
SCIAN	Système de classification des industries de l'Amérique du Nord
SiC	Carbure de silicium
SiGe	Silicium-germanium
SiN	Nitrure de silicium
SiP	Système dans boîtier
SiPh	Photonique sur silicium
SOI	Silicium sur isolant
Tb	Terabit
Tb/s	Terabit par seconde
TCAC	Taux de croissance annuelle composé
TFLN	Couches minces de Niobate de Lithium sur isolant
TPE	Très petites entreprises

Abréviations

TRL	Niveau de maturité technologique (Technology Readiness Level)
UE	Union Européenne
USD	Dollars américains
UV	Ultraviolet
VCSEL	Lasers à émission par la surface (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers)
W	Watts
WDM	Multiplexage en longueur d'onde
ZR	Module optique ZR (Zero-Radius ou standard ZR)

Acronymes

3IT	Institut interdisciplinaire d'innovation technologique
ALLS	Advanced Laser Light Source
C2MI	Centre de collaboration MiQro innovation
CAIRN	Centre d'applications et d'innovations en robotique au Québec
CFPC	Centre de fabrication en photonique du Canada
CIFAR	Institut Canadien de Recherche Avancée
CII	Centre d'innovation industrielle
COPL	Centre d'optique, photonique et lasers
CQMF	Consortium de recherche et d'innovation en transformation métallique
CRIAQ	Consortium de recherche et d'innovation en aérospatiale au Québec
CRIBIQ	Consortium de recherche et innovations en bioprocédés industriels au Québec
CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
CRVI	Centre de Robotique et de Vision Industrielles
EMT	Énergie Matériaux Télécommunications
FRQ	Fonds de recherche du Québec
I-CI	Institut des communications graphiques et de l'impression
INO	Institut national d'optique
INRS	Institut national de recherche scientifique

INTRIQ	Institut transdisciplinaire d'information quantique
IQ	Investissement Québec
IQ-UdeS	Institut Quantique de l'Université de Sherbrooke
ISDE	Innovation, Sciences et Développement Économique Canada
ISEQ	Industrie des systèmes électroniques du Québec
ITAR	International Traffic in Arms Regulations
MEIE	Ministère de l'Économie de l'innovation et de l'Énergie
MILA	Institut québécois d'intelligence artificielle
MRNF	Ministère des Ressources naturelles et des Forêts
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NORAD	North American Aerospace Defense Command
OEM	Fabricant d'équipement d'origine
PART-IT	Programme d'aide à la recherche et au transfert en Innovation Technologique
PCBA	Protecting Circuit Boards Act
PINQ²	Plateforme d'innovation numérique et quantique du Québec
PolyMTL	Polytechnique Montréal
ReSMiQ	Regroupement stratégique en microsystèmes du Québec
RNCAN	Ressources Naturelles Canada
SIA	Semiconductor Industry Association
SPIE	Société internationale pour l'optique et la photonique
UdeM	Université de Montréal
UdeS	Université de Sherbrooke
ULaval	Université de Laval

Termes techniques et leur traduction en anglais

	Affichage	Display
	Apprentissage automatique	Machine learning
	Assemblage	Assembly
	Boîte quantique ou point quantique	Quantum dot
	Sous unité modulaire de puce	Chiplet
Consommation/Consommation grand public/Grande consommation		Consumer
	Effet tunnel	Tunneling
	Émetteurs-récepteurs optiques	Optical transceivers
	Encapsulation étendue	Fan-Out
	Encapsulation/Encapsulation avancée	Packaging
	Excimère	Excimer
	Fonderie	Semiconductor foundry
	Informatique	Computing
	Post traitement	Post processing
	Puce	Chip
	Puce retournée	Flip-Chip
	Reconnaissance faciale	FaceID
	Séparateurs	Splitters
	Tranche ou gaufrette	Wafer

Glossaire des matériaux et minéraux critiques

Ag	Argent
Al	Aluminium
Al₂O₃	Oxyde d'aluminium
AlN	Nitrure d'aluminium
AlO₃	Alumine (oxyde d'aluminium)
Ar	Argon
As	Arsenic
AsH₃	Arsine
Au	Or
B₂	Dibore
Ba	Baryum
BaTiO₃	Titanate de Baryum
BCl₃	Trichlorure de bore
Be	Béryllium
Bi	Bismuth
Br	Brome
Br₂	Dibrome
Bx	Bauxite

C	Carbone
C₂H₄	Éthylène
C₂H₆	Éthane
Ca	Calcium
Cl	Chlore
Cl₂	Dichlore
Co	Cobalt
Cr	Chrome
Cu	Cuivre
Dy	Dysprosium
Er	Erbium
F	Fluor
Fd	Fer (forme alternative)
Fe	Fer
Ga	Gallium
Gd	Gadolinium
Ge	Germanium
GrN	Nitrure de graphène
H₂	Hydrogène (moléculaire)
H₂O₂	Peroxyde d'hydrogène
H₂Se	Hydrogénosélénure

Glossaire des matériaux et minéraux critiques

H₂SO₄	Acide sulfurique
HCl	Chlorure d'hydrogène
He	Hélium
Hf	Hafnium
HfO₂	Hafnie ou
In	Indium
Li	Lithium
LiNbO₃	Niobate de lithium
Mb	Molybdène (forme alternative)
Mg	Magnésium
Mn	Manganèse
Mo	Molybdène
N	Azote
N₂	Azote (moléculaire)
Nb	Niobium
Nd	Néodyme
Ne	Néon
Ni	Nickel
O₂	Oxygène ou dioxygène
P	Phosphore
Pb	Plomb

Pd	Palladium
PH₃	Phosphine
Pr	Praséodyme
Pt	Platine
Rb	Rubidium
Re	Rhénium
Ru	Ruthénium
S	Soufre
Sb	Antimoine
Se	Sélénium
SF₆	Hexafluorure de soufre
Si	Silicium
Si₃N₄	Nitrure de silicium
SiC	Carbure de silicium
SiCl₄	Tétrachlorure de silicium
SiH₄	Silane
SiO₂	Dioxyde de silicium
Sn	Étain
Sr	Strontium
Ta	Tantale

Glossaire des matériaux et minéraux critiques

Te	Tellure
Ti	Titane
TMAI	Triméthylaluminium
TMGa	Triméthylgallium
TMIn	Triméthylindium
TMSb	Triméthylantimoine
TR	Terres rares
V	Vanadium
W	Tungstène
Y	Yttrium
Zn	Zinc
Zr	Zirconium

Sources

- #1 Analysis of US Grants for Photonics R-D Funding
- #2 Understanding the global semiconductor value chain
- #3 Roadmap to 2050: Canada's semiconductor action plan
- #4 Canada Semiconductor Ecosystem
- #5 2023 semiconductor industry outlook
- #6 Emerging resilience in the semiconductor supply chain
- #7 Rapport des faits saillants 2019-2020
- #8 ISDE appuie CMC
- #9 ISDE appuie Hitachi
- #10 La photonique: portrait des entreprises du Québec 2019
- #11 Photonics technologies of the future
- #12 Semiconductor ecosystem
- #13 Microelectronics and Advanced Packaging Technologies Roadmap
- #14 Decadal plan for semiconductors
- #15 State of the US semiconductor industry
- #16 Étude de l'industrie de l'électronique au Québec
- #17 Chips around the world
- #18 Portrait de l'optique-photonique au Québec
- #19 Optics & Photonics: Global Industry Report
- #20 Assessment of the status of the microelectronics industrial base in the United States
- #21 Attracting chips investment: industry recommendations for policymakers
- #22 Critical minerals can make or break America's semiconductor supply chains
- #23 Critical material assessment
- #24 2025 Canadian electronics industry report
- #25 Mapping the semiconductor supply chain: the critical role of the Indo-Pacific region
- #26 Material World the six raw materials
- #27 Matériaux semi-conducteurs
- #28 L'industrie de la microélectronique et des semi-conducteurs
- #29 Building resilient supply chains: the case of semiconductors
- #30 Rare earth elements for semiconductor manufacturing: global supply chain and dominance
- #31 Semiconductor manufacturing materials
- #32 Semiconductor supply chain report
- #33 The position of the EU in the semiconductor value chain: evidence on trade, foreign acquisitions and ownership
- #34 Building resilient supply chains, revitalizing American manufacturing and fostering broad-based growth
- #35 Preliminary findings: PFAS use in the electronics industry
- #36 Advanced packaging to board level integration - Needs and challenges
- #37 Leadership lost? Rebuilding the US electronics supply chain
- #38 Electronic design and manufacturing sustainability
- #39 Securing the European Union's electronics ecosystem
- #40 Why double materiality assessments matter
- #41 The current sentiment of the global electronics manufacturing supply chain
- #42 North American advanced packaging ecosystem gap assessment
- #43 Complex integrated systems: the future of electronics manufacturing
- #44 The US Semiconductor Industry Report
- #46 Collaboration and investment of semiconductors in North America
- #47 U.S. Semiconductor Ecosystem Map
- #48 2023 Semiconductor Industry Outlook
- #49 Who Are the Top U.S. Companies in the Semiconductor Industry?
- #50 <https://camoinassociates.com/resources/chips-act-is-transforming-the-us-semiconductor-ecosystem/>
- #51 Where Are All the New Semiconductor Fabs in North America & Europe?
- #52 Semiconductor jobs are making a comeback
- #53 The greenfield opportunity in semiconductors
- #54 Article the economist semi-conductors
- #55 Localizing the global semiconductor value chain
- #56 What are compound semiconductors? - Compound Semiconductor Applications Catapult
- #57 Compound Semiconductors
- #58 Ottawa: North America's Leading Compound Semiconductor Centre
- #59 Compound semiconductors industry: an unprecedented promise
- #60 Document Yole Groupe
- #61 Fairphone impact report
- #62 Global Semiconductor Landscape
- #63 Au cœur des grands enjeux de la microélectronique
- #64 Microélectronique: place à l'innovation
- #65 Le silicium: un élément chimique très abondant, un affinage stratégique
- #66 Le Japon s'aligne sur les USA et prive la Chine de ses machines de production de puces
- #67 From Mine to Microchip
- #68 Emerging trends and key markets in 2.5D-3D semiconductors
- #69 Semiconductor packaging
- #70 Apport d'expertise ISDE
- #71 Le temps presse pour le Québec
- #72 China hits back at US tariffs with mineral export curbs
- #73 What is 2D & 3D packaging of integrated chips?
- #74 Surtension du Marché: Emballage de 2d et 3d semi-conducteur prêt à couler une croissance massive
- #75 Synthèse études Yole Group
- #76 Industry report 2025
- #77 Rencontre CNRC (Velko Tzolov)
- #78 Rencontre C2MI (Marie-Josée Turgeon)
- #79 Rencontre ENIM (Jean-Nicolas Beaudry)
- #80 Rencontre Yole Group (Eric Mounier)
- #81 Apport expertise Yole Group
- #82 Feuille de route sur les matériaux avancés et les procédés associés 2035
- #83 The Mineral Wars
- #84 Rencontre Arrow Electronics (Glenn Walker)
- #85 Mining for Defense
- #86 Strategic Defense Critical Minerals
- #87 Mineral Security Trade Policy Framework
- #88 What's next on China's critical mineral hit list?
- #89 Le Portugal soumis aux nouvelles limites américaines sur l'achat de puces IA
- #90 Blair et Champagne se rendent à Washington pour discuter de défense
- #91 Le Canada doit prendre en main sa défense
- #92 Notre Nord, fort et libre
- #93 Le ministre Joly lance la Politique étrangère du Canada pour l'Arctique
- #94 La politique étrangère du Canada pour l'Arctique
- #95 Se préparer à un monde quantique
- #96 Entretien INO (André Fougères et Alain Chandonnet)
- #97 Le Fédéral investit plus de 8 M\$ dans le secteur quantique à Sherbrooke
- #98 Apport d'expertise MRNF
- #99 Regroupement du FRONT de la Zone Technum Québec
- #100 Fabricant de puces TSMC de nouveau confronté au manque d'eau
- #101 Europe's largest deposit of rare earth metals located in Kiruna
- #102 Rare Earth Company – Matamec Explorations
- #103 <https://torngatmetals.com/fr/le-projet/>