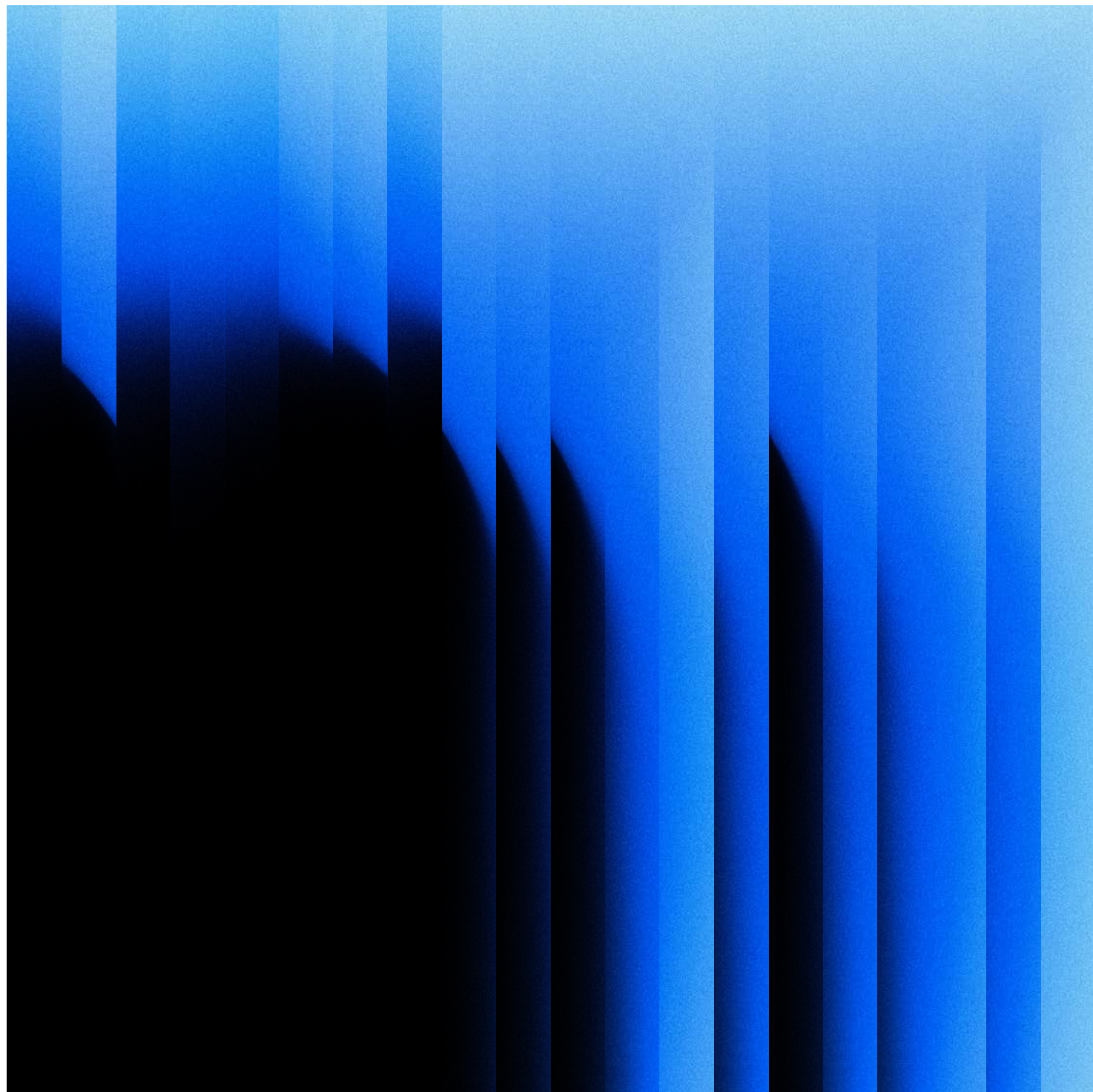


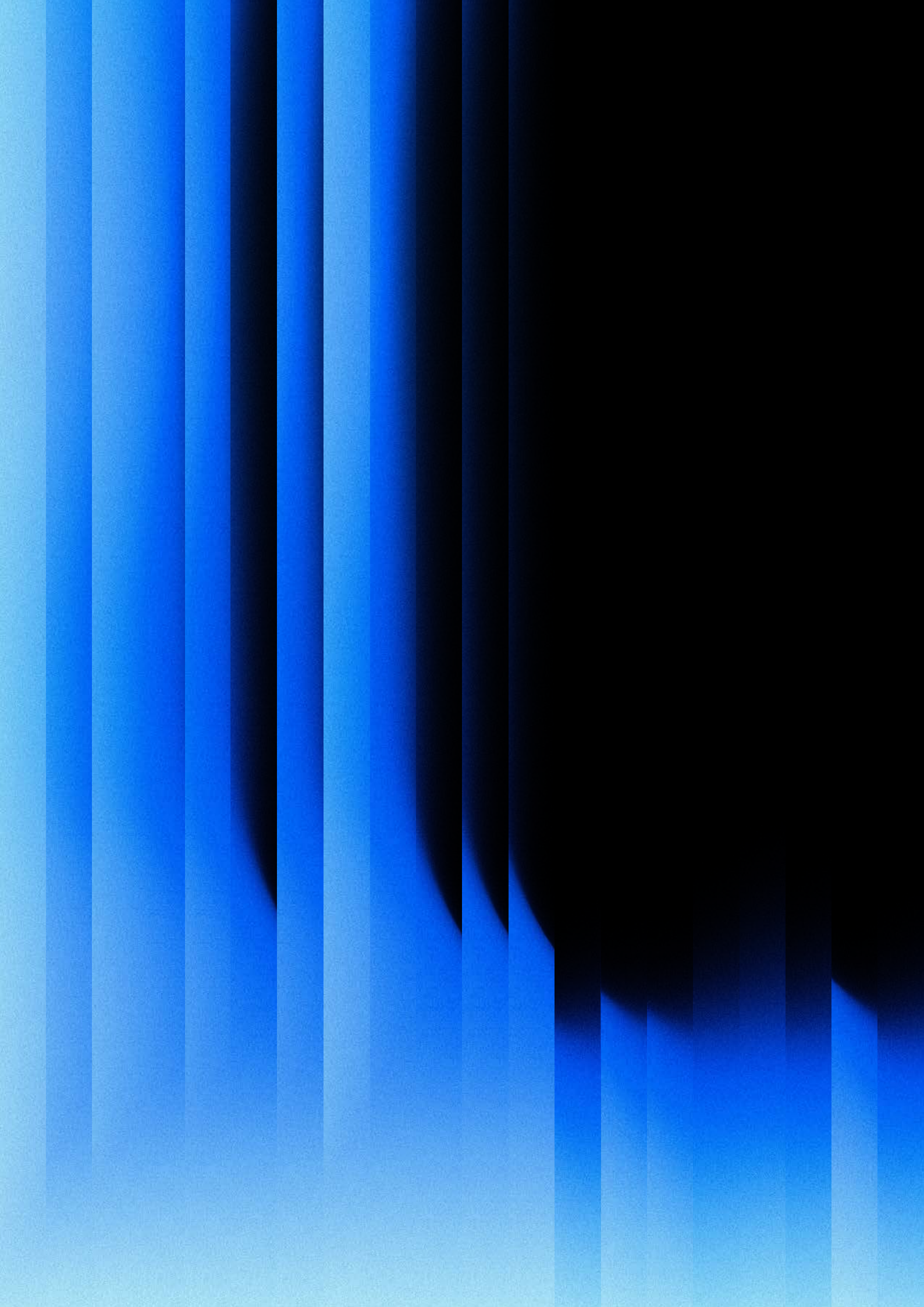


Accélérer la souveraineté numérique 2030

La stratégie du Luxembourg en matière de technologies quantiques



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG



Accélérer la souveraineté numérique 2030

La stratégie du Luxembourg en matière de technologies quantiques

Table des matières

Avant-propos _____ 06

L'ambition du Luxembourg en matière de données,
d'intelligence artificielle et de technologies quantiques _____ 09

Partie 1. Introduction _ 16

Vision stratégique pour le quantique _____ 17

Approche générale _____ 18

Partie 2. Leviers _____ 26

Six leviers d'action _____ 27

1. Gouvernance et réglementations _____ 27

2. Talents et compétences _____ 28

3. Infrastructures _____ 29

4. Éventail de services _____ 36

5. Recherche, développement et innovation _____ 38

6. Collaboration à l'international _____ 40

Partie 3. Projets phares _____ 42

Cybersécurité : Démocratiser la cybersécurité _____ 43

Partie 4. Conclusion _____ 44

Feuille de route de la stratégie nationale
en matière de technologies quantiques _____ 45

Avant-propos



Luc Frieden

« L'innovation est le moteur du progrès humain et, par conséquent, du développement économique et social. Grâce à la vision ambitieuse et cohérente définie dans ces stratégies ainsi qu'aux projets phares identifiés, le gouvernement transformera le Luxembourg en un centre international de référence pour la valorisation souveraine et sécurisée des données. Nous aspirons à créer un centre agile, fondé sur la confiance et la transparence, et dans lequel acteurs privés et publics collaborent afin de mettre l'innovation au service de l'humanité – une innovation à l'européenne, avec une touche luxembourgeoise ! »



Stéphanie Obertin

« Les stratégies nationales sur les données, l'IA et les technologies quantiques sont l'aboutissement d'une excellente collaboration entre les ministères, les acteurs de la recherche publique, le secteur privé et la société civile. Les trois stratégies placent l'humain au centre de notre transformation numérique et inspirent des ambitions communes et des actions partagées afin de créer un écosystème dynamique, résilient et inclusif, capable de répondre aux défis actuels et futurs.

La valorisation des données est au cœur de notre vision, elle permet de prendre des décisions éclairées, de concevoir des politiques judicieuses et d'offrir des services publics efficaces tout en établissant la base pour les technologies de l'IA et quantiques. »



Elisabeth Margue

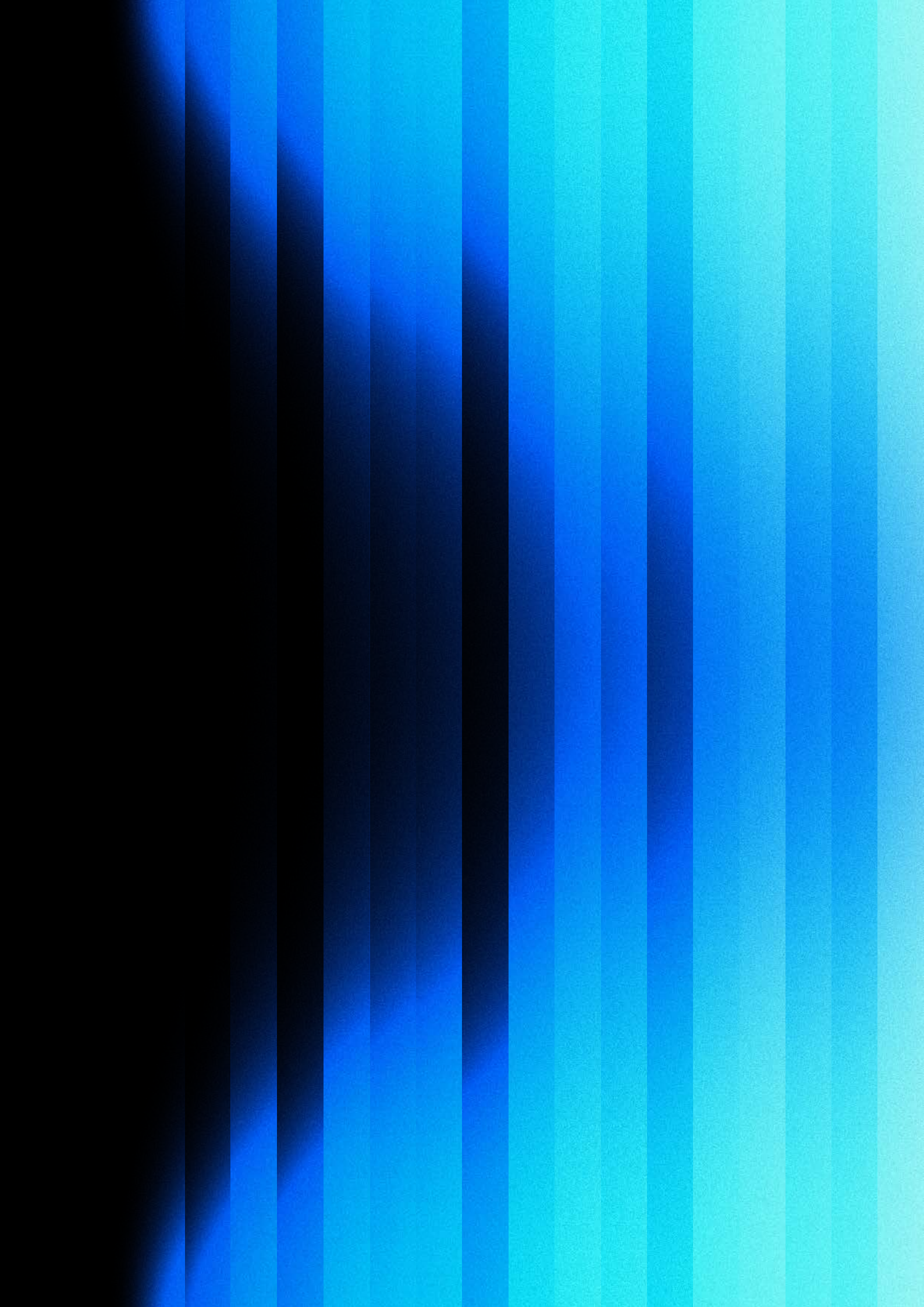
« Priorité à l'adoption concrète et utile – c'est le principe qui nous a guidé en fixant les actions en matière d'intelligence artificielle. Que ce soit à l'intérieur de l'administration publique ou des secteurs-clés comme la finance ou la santé. Chaque secteur, chaque entreprise et chaque personne aura un parcours différent en augmentant son expertise en IA. Mais chacun pourra s'appuyer sur les grands atouts de notre pays : nos performances en connectivité, en ressources computationnelles et en compétences numériques. En y ajoutant une réglementation qui accélère l'innovation, le Luxembourg a une réelle carte à jouer au sein de l'Union européenne. Soyons ambitieux, nous pouvons l'être ! »



Lex Delles

« La digitalisation n'est plus une option : elle est une nécessité absolue pour toute entreprise qui souhaite gagner en productivité et rester compétitive dans un environnement en évolution de plus en plus rapide. C'est pourquoi le Luxembourg investit dans des infrastructures numériques de pointe tout en facilitant l'accès par la provision de services adaptés aux besoins des entreprises et de la recherche. Avec le futur ordinateur quantique MeluXina-Q et le futur supercalculateur MeluXina-AI placé au cœur de l'AI Factory nationale, nous offrons aux entreprises de toutes tailles un cadre favorable à l'innovation pour accélérer concrètement leur digitalisation.

Par la mise en œuvre d'une stratégie numérique articulée autour des trois piliers fondamentaux que sont les données, l'IA et les technologies quantiques, nous nous donnons les moyens de renforcer notre souveraineté numérique, garantir notre compétitivité à long terme et consolider la résilience de notre économie dans un monde toujours plus digitalisé. »



Accélérer la souveraineté numérique 2030

L'ambition du Luxembourg en matière de données, d'intelligence artificielle et de technologies quantiques

Dans le cadre de l'accord de coalition 2023-2028, le gouvernement s'est engagé à promouvoir l'innovation dans le but de maintenir le Luxembourg à la pointe des nouvelles technologies et du numérique. Dans ce contexte, les **données**, l'**intelligence artificielle** (IA) et les **technologies quantiques** constituent les **trois axes** que le Luxembourg vise, afin de continuer à dynamiser son économie, améliorer la qualité de vie de ses citoyens, renforcer sa souveraineté digitale et technologique, et contribuer à la souveraineté numérique de l'Union européenne.

Après la publication de « **The Data-Driven Strategy for the Development of a Trusted and Sustainable Economy in Luxembourg** » et de « **Intelligence artificielle : une vision stratégique pour le Luxembourg** » en 2019, mais aussi de la stratégie « **Ons Wirtschaft vu Muer** » présentée en 2021, l'évolution technologique et son impact sur notre quotidien ont substantiellement changé. Avec la popularité rapide des nouveaux outils d'IA en 2023 et l'importance croissante des données et de leur valorisation, une revue des stratégies gouvernementales était devenue nécessaire.

Le Luxembourg mise sur les données, l'IA et les technologies quantiques pour renforcer sa souveraineté numérique et rester à la pointe de l'innovation.

En parallèle, une évolution technologique certes moins mature, mais pas moins fondamentale, à savoir celle des technologies quantiques, s'est également dynamisée rapidement. Il est donc opportun, voire urgent de positionner le pays pour la prochaine ère technologique, notamment par l'adoption de solutions innovantes et à fort impact d'ici 2030, grâce à la mise en place de budgets dédiés et additionnels.

Approche organisationnelle

Le gouvernement a invité le **ministère d'État (ME)**, le **ministère de la Recherche et de l'Enseignement supérieur (MESR)**, le **ministère de l'Économie (MECO)** et le **ministère de la Digitalisation (MinDigital)** à identifier les complémentarités et opportunités au niveau des diverses initiatives à l'échelle nationale et internationale. Afin de bénéficier de synergies significatives et d'atteindre des objectifs ambitieux d'ici 2030, une **démarche holistique** a

été adoptée par ces ministères, tout en veillant à la participation, dès les préparations initiales lors d'ateliers, de réunions thématiques et des groupes de travail, de représentants de la société civile, des secteurs privé et public ainsi que des experts de la recherche publique du Luxembourg. Le **suivi de l'implémentation** de la stratégie selon ses trois axes repose sur une approche transversale impliquant l'ensemble du gouvernement.

Dans un souci de cohérence générale, les trois axes prioritaires sont abordés dans **trois documents dédiés**. Chaque document inclut une **partie commune identique** qui met en évidence les ambitions communes et la synergie entre les trois axes, suivie

d'une partie spécifique pour chacune : les **données, l'IA, et les technologies quantiques**. C'est l'ensemble de ce **corpus stratégique** qui constitue l'ambition nationale visant à **accélérer la souveraineté numérique** du Grand-Duché à l'horizon 2030.

Vision stratégique

D'ici 2030, le Luxembourg aspire à devenir un pays d'innovation numérique et technologique caractérisé par une grande agilité, centré sur l'humain, la durabilité et la collaboration à l'international. Pour ce faire, le Grand-Duché est déterminé à stimuler son écosystème du numérique pour le rendre toujours plus innovant, dynamique et agile. Afin d'assurer la cohérence, l'inclusivité et la collaborativité au sein de cet écosystème, les secteurs public et privé - y compris en matière de recherche et développement - seront fortement impliqués. Reposant sur une grande ouverture à l'international, un dynamisme économique avéré et une infrastructure numérique hors pair et hautement fiable, les ambitions nationales en matière de valorisation des données, d'IA et de technologies quantiques consistent à consolider le caractère du Luxembourg en tant que pionnier européen de la transition digitale, capable de servir de modèle et de bénéficier des avantages offerts par les technologies numériques. La vision vise à épauler la souveraineté numérique, le progrès technologique et économique et à favoriser le bien-être des citoyens.

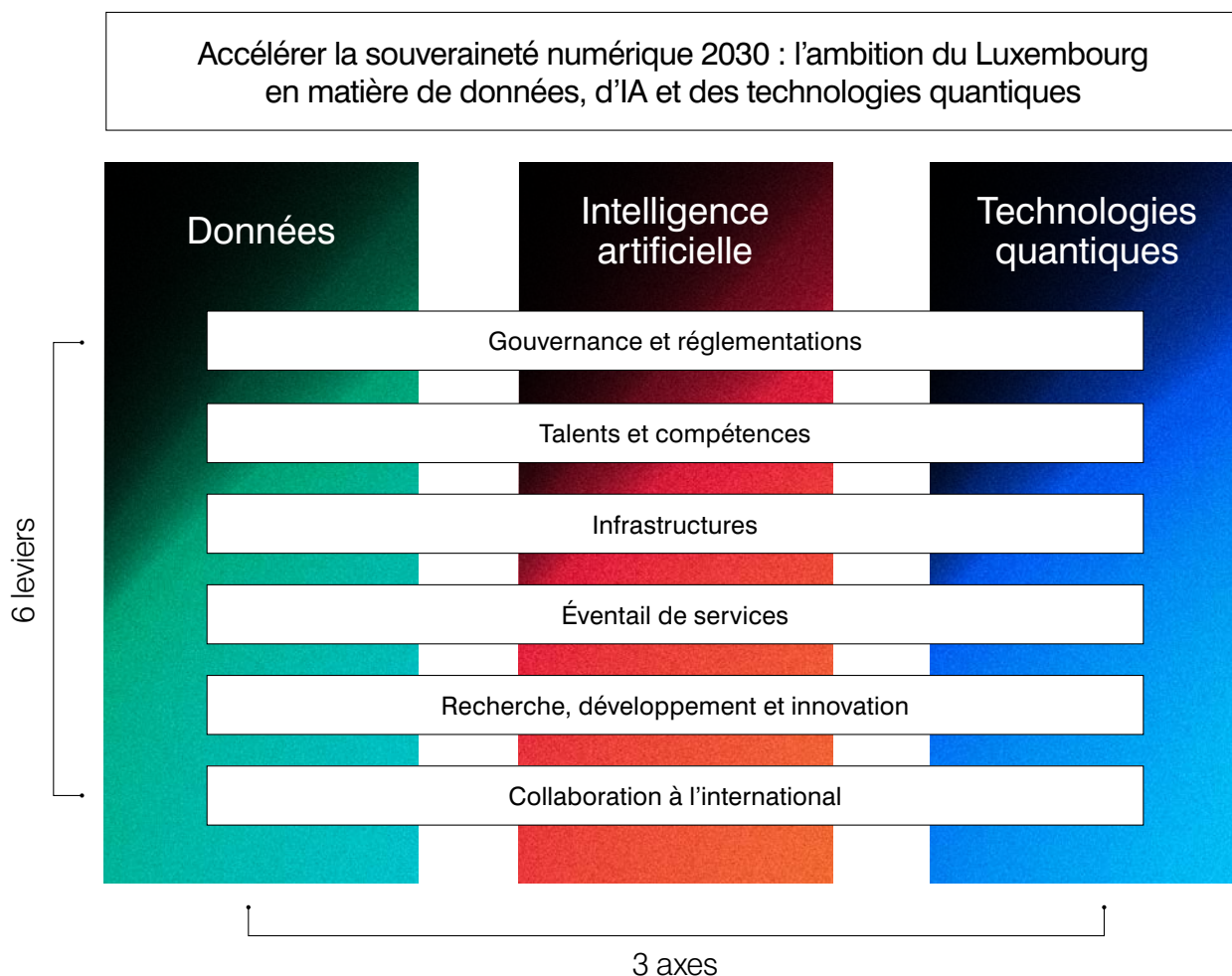
Cette vision commune pour le **corpus stratégique** repose sur la conviction que l'innovation numérique et technologique, est essentielle pour garantir la compétitivité et la prospérité future du pays. Se basant sur ses avantages uniques telles qu'une **infrastructure souveraine de pointe** et l'**agilité d'un pays de taille limitée**, le Luxembourg se positionnera comme leader dans le domaine des applications à haute valeur ajoutée dans des secteurs hautement réglementés offrant ainsi une vraie complémentarité et plus-value sur la scène européenne et mondiale.

Ces stratégies visent à placer le Luxembourg à l'avant-garde d'un avenir où la technologie est un moteur essentiel de la croissance et du bien-être des citoyens, tout en assurant sa souveraineté numérique.

Une approche unifiée : tirer parti des interactions entre données, IA et technologies quantiques

Les données représentent la matière première de l'innovation numérique, l'intelligence artificielle permet d'en extraire de la valeur, et les technologies quantiques promettent de repousser les limites actuelles du traitement, de la sécurité et de l'analyse de l'information. Pour déclencher leur plein potentiel, ces trois stratégies ne doivent pas être approchées de manière isolée mais plutôt comme briques complémentaires pour construire un écosystème technologique interactif.

Une approche intégrée permet aussi de **mutualiser davantage l'utilisation des infrastructures** (par exemple cloud, HPC (calcul haute performance), calcul quantique) et **les ressources humaines et financières** disponibles. Ces interactions renforcent la capacité du pays à développer des solutions technologiques plus puissantes, plus sûres, et mieux adaptées aux défis de demain, notamment dans des secteurs clés tels que le secteur public, la finance, la cybersécurité, la santé, la culture ou le spatial.



Six leviers d'actions communs aux trois axes prioritaires de développement stratégique

Le fil conducteur à travers chacun des différents documents est fourni par **six leviers transverses**. L'avantage de cette articulation est d'éviter une approche en silos et de faciliter la mise en évidence des synergies. Elle permet une lecture aussi bien thématique (par axe vertical) que pragmatique (par levier d'action horizontal) des différentes ambitions du Luxembourg en matière de numérique et de technologie.

Les leviers pour forger un écosystème du numérique cohérent sont les suivants :

- Instaurer et promouvoir des moyens de gouvernance et des réglementations pour stimuler l'utilisation et la réutilisation des données, ainsi qu'accélérer l'adoption de l'IA et des technologies quantiques tout en garantissant la sécurité et la protection des données, la souveraineté des infrastructures et la fiabilité des développements ;
- Développer et attirer les compétences et talents nécessaires pour renforcer la compétitivité nationale, innover et travailler dans le domaine

des technologies numériques et de renforcer la littératie numérique au niveau de la société ;

- Continuer à déployer une infrastructure de pointe adaptée à l'évolution des besoins nationaux, publics comme privés, tant en matière de connectivité que de calcul ;
- Offrir un éventail complet de services spécialisés pour accompagner la diffusion et l'adoption en matière de culture des données et des nouvelles technologies numériques au sein de la société et de l'économie, notamment en offrant des services publics plus efficaces et personnalisés, réduisant ainsi la charge administrative pour les citoyens et les entreprises ;
- Stimuler la recherche et l'innovation agile, au niveau public comme privé, afin de résoudre des défis sociétaux complexes ;
- Contribuer aux initiatives internationales dans le domaine des données, de l'IA et des technologies quantiques afin de promouvoir la souveraineté numérique et les valeurs européennes.

Implémentation des stratégies : dynamique intégrée et projets phares

L'opérationnalisation de la stratégie s'appuiera sur **un ensemble de projets phares** (*flagship projects*) traduisant des ambitions sectorielles concrètes dans des domaines stratégiques tels que la finance, la santé, la culture, l'espace, l'éducation, les compétences, la cybersécurité, l'énergie, la mobilité ou encore l'optimisation des processus législatifs et administratifs. Cette approche permettra de stimuler l'écosystème du numérique et de l'innovation au Luxembourg par l'adoption de solutions innovantes et à fort impact. À cet effet, seront également mis en place des budgets dédiés répondant aux besoins exprimés par les parties prenantes consultées.

Cette dynamique est soutenue par une gouvernance intégrée et par des structures dédiées telles que le **Deep Tech Lab** (voir ci-dessous) et les **plateformes collaboratives Data, AI et Quantum Factory** (voir ci-dessous), véritables catalyseurs d'innovation et de coordination.

Des projets phares dans des secteurs clés stimuleront l'innovation au Luxembourg, soutenus par des budgets dédiés et une gouvernance intégrée.

Les atouts stratégiques du Luxembourg pour réussir sa transition numérique

Pendant les dernières décennies, le gouvernement s'est engagé dans le développement d'infrastructures de pointe et s'est engagé de manière continue dans des initiatives et collaborations à caractère international. Le Luxembourg dispose d'ores et déjà d'un certain nombre d'éléments-clés pour affirmer son caractère de *pionnier digital* à échelle internationale :

- Le Luxembourg dispose de la plus haute densité de **centres de données « Tier IV »** en Europe. Ces centres de données garantissent le plus haut niveau de résilience au niveau de la fourniture en électricité, en eau et en connectivité tout en garantissant un très haut niveau de sécurité physique. Grâce à ce niveau de sécurité, ces centres de données peuvent héberger des infrastructures de stockage et de traitement de données hautement critiques.
- Le Luxembourg est un membre actif et reconnu de l' AISBL **Gaia-X**, une initiative européenne visant à créer une **infrastructure de données ouverte, sécurisée et souveraine** afin de favoriser l'interopérabilité des données ou des services *cloud* tout en respectant les normes européennes. Le Luxembourg y joue un rôle important avec

un représentant luxembourgeois siégeant au conseil d'administration et en ayant le leadership de l'écosystème relatif à la santé au sein de cette même association.

- Opérationnel depuis 2023, le **Luxembourg National Data Service (LNDS)** facilite la création de valeur à partir de l'utilisation secondaire des données pour des partenaires publics comme privés, et soutient le partage et la réutilisation des données du secteur public de manière fiable. Son approche, unique en son genre en Europe, vise à offrir un éventail complet de services liés aux données (gestion, accès, recensement, évaluation *Ethical, Legal, and Social Issues* (ELSI), pseudonymisation et anonymisation, etc.) de manière intersectorielle et centralisée pour accélérer l'exploitation des données au Luxembourg.
- Le Luxembourg se positionne comme un leader européen en matière de connectivité numérique, avec une **infrastructure Internet à haut débit** et une **couverture 5G** qui dépassent largement la moyenne de l'UE.

- Le Luxembourg est l'un des premiers États membres de l'UE sélectionnés pour accueillir un supercalculateur dans le cadre du réseau EuroHPC. Opérationnel depuis 2021, l'**HPC MeluXina** a été conçu, notamment, pour traiter les tâches de calcul de l'IA. En 2023, MeluXina a traité 35% de tous les projets d'IA d'EuroHPC, soulignant son rôle clé dans l'avancement de l'IA en Europe. À l'échelle nationale, ses heures de calcul sont de plus en plus utilisées pour développer des applications d'IA pour un nombre croissant d'entreprises, y compris de *startups*.
- Le Luxembourg est parmi les sept premiers États membres à avoir signé en 2019 une déclaration relative au développement et au déploiement d'une infrastructure européenne de communication quantique, le **EuroQCI**. De cette déclaration est née l'initiative nationale **LuxQCI** qui a pour objectif de créer un laboratoire expérimental pour les communications quantiques, de développer et d'implémenter un réseau de communications quantiques au niveau national afin de l'interconnecter avec les réseaux de communications quantiques des autres États membres de l'Union européenne, créant ainsi le EuroQCI. Le développement de l'écosystème national dans le domaine des communications quantiques est un autre objectif-clé de l'initiative LuxQCI.
- Loin de constituer des acquis, ces atouts doivent être continuellement développés pour que le Luxembourg puisse accélérer sa souveraineté numérique et rester à la pointe des technologies digitales et à la hauteur des besoins nationaux et internationaux.

Inciter à l'innovation et à la création

La propriété intellectuelle devient plus que jamais un enjeu économique dont il faut tenir compte, afin d'assurer la croissance de nos acteurs innovants, créatifs et économiques. La propriété intellectuelle doit dès lors être intégrée de manière transversale et stratégique aussi bien dans les initiatives des différents départements ministériels, que dans les secteurs de l'économie et de la culture, et particulièrement dans le cadre de l'IA, des technologies quantiques et des données, de manière à ce que les efforts créatifs et innovants se soldent par des avantages compétitifs qui bénéficieront, in fine, à la société, à l'économie, ainsi qu'à la culture luxembourgeoise.

Le Luxembourg a su se doter d'un cadre juridique et réglementaire pleinement développé dans le domaine de la propriété intellectuelle. Ce cadre législatif contribue à assurer la place du Luxembourg parmi les leaders de l'innovation. Le Luxembourg continuera à s'impliquer dans les discussions et développements en la matière au niveau européen et international.

Il convient de souligner que dans un contexte de pérennité de l'économie du savoir, l'accès aux contenus ne devrait toutefois pas être uniquement considéré de manière dématérialisée. A ce titre, et afin de pouvoir garantir de façon durable la souveraineté du Luxembourg, il est fondamental de s'assurer que les ressources intellectuelles et l'accès à la connaissance ne soient pas uniquement dépendants d'opérateurs externes et de leurs ressources numériques.

Ces différents éléments permettront de maintenir le positionnement du Luxembourg à la pointe des économies basées sur la connaissance et l'innovation, gages de compétitivité et de croissance.

Devenir et rester un acteur clé de l'écosystème numérique

Les arguments-clés soulignés ci-après et extraits des stratégies individuelles soulignent des actions précises qui contribueront à positionner le Luxembourg comme un acteur clé de l'écosystème numérique européen:

- Le Luxembourg va se doter d'une gouvernance des données centralisée afin de garantir la réutilisation et l'échange des données dans un environnement de confiance. Pour faciliter les relations avec les administrés dans le cadre de leurs démarches administratives, le gouvernement prévoit également un cadre d'échange des données solide et cohérent en introduisant le principe Once-only (principe selon lequel une personne fournit une seule fois des données aux administrations). Afin de faciliter l'accès et la réutilisation des données, tout en garantissant la sécurité juridique et en maintenant la confiance citoyenne, le gouvernement vise à instaurer aussi un cadre précis pour la réutilisation, par les acteurs publics et privés, des données détenues par le secteur public (G2B). Il prévoit, en particulier:
 - les finalités autorisées pour lesquelles les accès aux données et leur réutilisation sont autorisés, p.ex. pour des fins de formation, de test et d'évaluation d'algorithmes et de solutions d'IA ;
 - un contrôle rigoureux des règles via l'intervention du Commissariat du gouvernement à la protection des données auprès de l'État (CGPD), agissant comme Autorité des données en charge de l'autorisation des accès aux données et leur réutilisation sur base d'une demande spécifique par le réutilisateur ;
 - le fait que les accès aux données et leur réutilisation s'opèrent dans un environnement de traitement sécurisé mis en place par le CGPD et géré par le Centre des technologies de l'information de l'État (CTIE) ;
 - le fait que les données soient anonymisées, pseudonymisées ou agrégées (le cas échéant par un tiers de confiance) préalablement à leur mise à disposition.
- Le réseau des fabriques d'IA (*AI Factories*) va faciliter l'accès à de grands volumes de données et mutualiser l'expertise à échelle européenne. De plus, le Luxembourg va pouvoir compter sur son nouveau supercalculateur MeluXina-AI pour accélérer encore davantage le développement de son écosystème numérique déjà dynamique et agile. La fabrique d'IA nationale, dont le

centre de gravité sera à Belval, va constituer un guichet unique augmentant la visibilité des initiatives et offres disponibles, donnant accès à des ressources essentielles pour accélérer le développement de l'IA au Luxembourg, tout en favorisant la collaboration, l'échange de connaissances et les synergies inter- et intra-sectorielles.

- Le nouveau supercalculateur MeluXina-AI sera intégré avec des solutions de cloud souverain et des centres de données Tier IV dans un computing continuum. Ce dernier offrira la flexibilité, la robustesse et la sécurité en termes de protection des données et d'IP nécessaires pour des applications dans des domaines hautement réglementés.
- Pour attirer et faire progresser les talents et compétences nécessaires au développement d'un écosystème d'IA prospère, le Luxembourg va adopter une approche agile, sectorielle, et inclusive, combinant innovation pédagogique, collaborations étroites industrie-académie, tout en capitalisant sur le MeluXina-AI. Le Luxembourg va se doter d'un outil avancé, basé sur l'IA, pour anticiper les besoins en compétences afin d'aligner les formations avec les évolutions du marché du travail. Afin de positionner le pays comme modèle en Europe pour un accès équitable aux compétences en IA, le Luxembourg va chercher à trouver un bon équilibre entre le développement des talents d'élite et l'inclusion large des citoyens.
- Afin de pousser l'application rapide de l'IA dans le secteur-clé de l'économie qu'est la finance, un projet d'envergure sera mis en œuvre afin de vivre le potentiel des cas d'usage basé sur l'IA. Dans le même esprit, le secteur-clé qu'est la santé complémente sa stratégie numérique avec un projet d'envergure afin d'utiliser l'IA pour améliorer les soins médicamenteux des patients, poussant ainsi l'application de l'IA dans le but de rendre la médecine plus personnalisée.
- Le *Deep Tech Lab* (DTL) ambitionne de stimuler la valorisation économique des activités de recherche en matière de *Deep Tech* au Luxembourg, afin de faciliter les interactions entre le monde académique et le monde économique, notamment par la création de partenariats public-privé, de spin-offs ou encore la commercialisation de licences. Par la même occasion, il permettra de participer concrètement aux efforts d'attraction, de rétention et de développement des talents, de

garantir la souveraineté nationale et de concrétiser les ambitions nationales dans les domaines des données, de l'IA et des technologies quantiques. Le DTL viendra utilement compléter les solutions déjà existantes au Luxembourg pour stimuler la recherche, l'innovation et l'entrepreneuriat, et viendra ainsi soutenir les activités de cet écosystème dans son ensemble. Il constituera un environnement scientifique et technologique dynamique où chercheurs et ingénieurs pourront se concentrer sur la fourniture des solutions innovantes et concrètes, en phase avec les ambitions du Luxembourg. Son objectif ultime sera de participer à relever des défis sociétaux et industriels à forte valeur ajoutée. Des approches ascendantes et descendantes seront mobilisées pour identifier les sujets et les domaines d'innovation à fort impact.

- Pour se préparer aux menaces cyber de l'ère quantique, le Luxembourg ambitionne d'accélérer la transition vers la cryptographie post-quantique et de déployer des réseaux de communication quantique intégrés à l'initiative européenne EuroQCI. Cela inclut le soutien à des bancs d'essai pour des réseaux terrestres et satellitaires

sécurisés, ainsi que la promotion de cas d'usage concrets. La composante spatiale, avec le développement d'un satellite QKD, constitue l'une des priorités stratégiques du pays. Ces efforts contribueront à renforcer la cybersécurité et les capacités de défense nationales, en cohérence avec ses priorités de long terme en matière de souveraineté numérique, de cybersécurité et de technologies spatiales.

- L'intégration du calculateur quantique MeluXina-Q dans l'infrastructure existante du MeluXina HPC et le futur couplage avec MeluXina-AI permet une distribution intelligente des tâches de calcul entre les différentes architectures, optimisant ainsi l'utilisation des ressources disponibles. Cette configuration va créer un centre d'excellence en calcul, où les capacités avancées des superordinateurs classiques et spécialisés en IA sont renforcées par les atouts uniques des ordinateurs quantiques.

L'ensemble des atouts et arguments-clés, permettra de présenter le Luxembourg comme centre de compétence et véritable « hub » européen à la pointe du numérique.

Le Luxembourg devient un hub numérique européen grâce à une stratégie axée sur les données, l'IA et les technologies quantiques

Partie 1.

Introduction

Vision stratégique pour le quantique

Cette stratégie nationale vise à préparer le Luxembourg à l'ère quantique en établissant un écosystème quantique performant et agile, permettant au pays de tirer pleinement parti du potentiel des technologies quantiques pour stimuler le progrès scientifique, technologique et économique. Au-delà des percées scientifiques qu'elles permettront, la stratégie se concentre sur le développement, le déploiement et la commercialisation de technologies, de capacités et de services quantiques innovants dans les secteurs économiques prioritaires du Luxembourg.

S'appuyant sur le rôle du Luxembourg en tant que hub de confiance et de sécurité pour l'innovation fondée

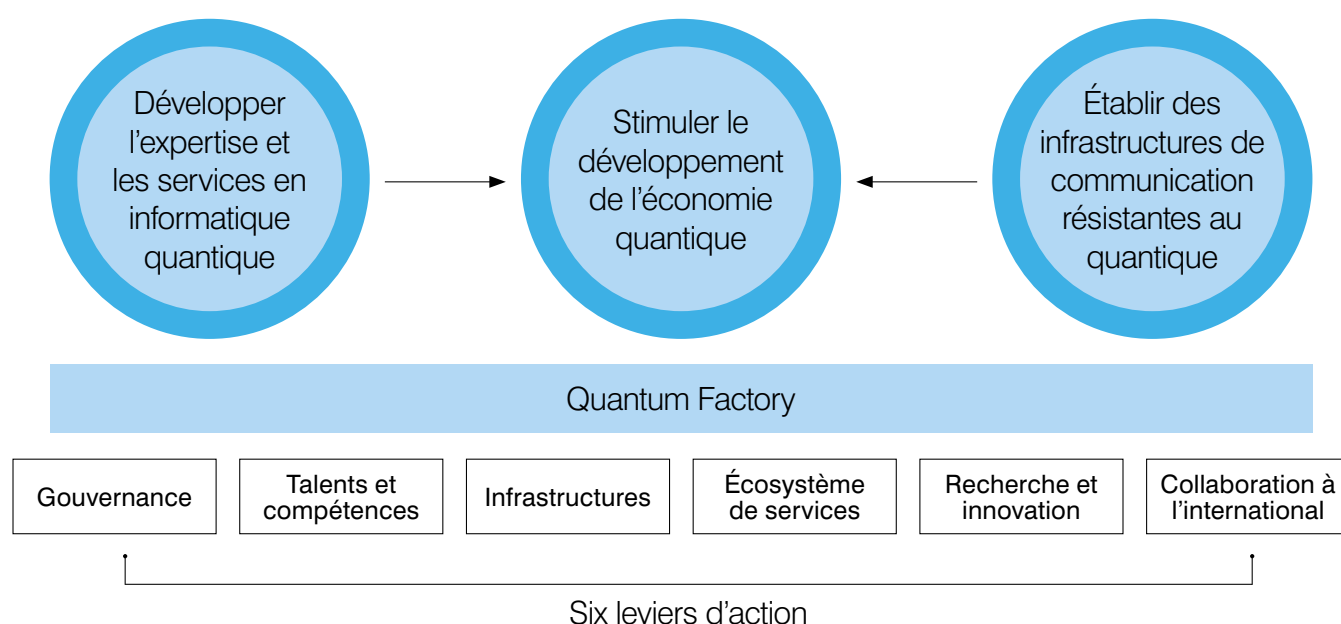
sur les données, la stratégie accorde une attention particulière aux communications quantiques et à la cybersécurité. L'un de ses objectifs majeurs est de préparer les acteurs publics et privés, ainsi que leurs infrastructures de données, à se prémunir contre les menaces d'origine quantique, renforçant ainsi la souveraineté numérique.

Parallèlement, le Luxembourg entend capitaliser sur ses forces existantes en calcul haute performance et en intelligence artificielle, en exploitant le potentiel disruptif de l'informatique quantique pour accélérer la transformation industrielle et maintenir sa compétitivité technologique.

La vision quantique du Luxembourg

Préparer le Luxembourg à exploiter pleinement le potentiel des technologies quantiques au service du progrès scientifique, technologique et économique

Objectifs stratégiques



La stratégie nationale quantique en résumé

Pour concrétiser sa vision de l'ère quantique, la stratégie nationale du Luxembourg définit trois objectifs stratégiques principaux :

- Développer l'expertise et les services en informatique quantique,
- Établir une infrastructure de données résiliente capable de résister aux menaces de l'ère quantique en développant un réseau de communication quantique terrestre et par satellite et en passant à la cryptographie post-quantique (PQC),

- Générer de la valeur économique à partir des technologies quantiques.

Pour atteindre ces objectifs, la stratégie définit des actions ciblées autour de six leviers stratégiques, alignés avec ceux de la stratégie nationale des données et de la stratégie en matière d'IA :

- Assurer une gouvernance efficace,
- Développer des talents et des compétences ciblés,
- Établir une infrastructure quantique de pointe,

- Faire progresser les services et les capacités en technologies quantiques,
- Promouvoir une recherche scientifique de classe mondiale,
- Favoriser des partenariats internationaux dynamiques entre le milieu académique, les industries et les gouvernements.

Ces objectifs stratégiques et mesures ont été élaborés grâce à un effort collaboratif impliquant plusieurs ministères, avec le soutien des instituts de recherche, des institutions publiques et des acteurs du secteur privé.

La première section de la stratégie introduit les technologies quantiques, présente les objectifs globaux et l'approche de mise en œuvre, décrit l'état actuel de la recherche et de l'innovation quantiques au Luxembourg, et situe la stratégie dans les cadres politiques nationaux et européens. La deuxième section, structurée autour des six leviers stratégiques, détaille les ambitions et les actions clés à entreprendre.

La stratégie se conclut par une feuille de route dédiée, décrivant les étapes clés et les mesures nécessaires pour positionner le Luxembourg comme un acteur de premier plan dans le domaine des technologies quantiques.

Approche générale

Introduction aux technologies quantiques

Les technologies quantiques, fondées sur les principes fondamentaux de la mécanique quantique, exploitent les effets quantiques dans les systèmes matériels et atomiques pour permettre des avancées révolutionnaires en informatique, communication, détection et science des matériaux, dépassant largement les capacités classiques.

Bien que la physique quantique soit explorée depuis le début du XXe siècle, avec des pionniers comme Planck, Einstein et Bohr posant ses bases, les premières applications technologiques, telles que les transistors, les lasers et les horloges atomiques, reposaient sur des effets quantiques collectifs plutôt que sur la manipulation directe de systèmes quantiques individuels. Aujourd'hui, les avancées dans l'isolement et le contrôle des états quantiques individuels de particules élémentaires comme les photons et les électrons ont inauguré l'ère du «Quantum 2.0», permettant le développement de technologies révolutionnaires dans des domaines clés comme l'informatique, la communication et la détection quantique. Ces technologies diffèrent fondamentalement des systèmes classiques, offrant des capacités entièrement nouvelles plutôt que des améliorations progressives.

Au cours des deux dernières décennies, les technologies quantiques sont passées de la recherche pure aux premières applications commerciales, avec des investissements massifs de la part des grandes entreprises mondiales. L'informatique quantique promet de résoudre des problèmes mathématiques complexes au-delà des limites classiques, la détection quantique permet des mesures ultraprécises pour la santé et l'aérospatiale, et la communication quantique

devient cruciale pour la transmission et le stockage de données ultra-sécurisées, protégeant contre les menaces cybernétiques croissantes.

Pour le Luxembourg, les technologies quantiques représentent une opportunité stratégique dans des domaines clés tels que la science des matériaux, la cybersécurité, la défense et la finance, tout en consolidant davantage son leadership en innovation numérique. Selon une étude de McKinsey de 2024¹, le marché mondial des technologies quantiques devrait atteindre 90 milliards de dollars d'ici 2030 et 173 milliards de dollars d'ici 2040, avec l'informatique quantique générant le plus grand impact économique. En 2023, les investissements gouvernementaux dans la R&D quantique ont atteint environ 42 milliards de dollars, avec l'Europe, les États-Unis et la Chine en tête.

Les technologies quantiques révolutionnent l'informatique, les communications et la détection, en offrant des capacités inédites. Le Luxembourg entend exploiter ce potentiel à travers une stratégie nationale visant à renforcer sa position dans l'écosystème quantique mondial.

¹ McKinsey Digital (2024), "Quantum Technology Monitor"

Cette course mondiale aux investissements reflète l'essor transformateur de l'IA il y a une décennie, avec des technologies quantiques prêtes à révolutionner des industries allant de l'espace et la santé à la finance, la cybersécurité et la logistique. Le Luxembourg doit agir de manière décisive pour sécuriser sa position dans ce paysage technologique et économique en évolution. Développer une stratégie nationale en matière des technologies quantiques complète, avec des étapes claires et réalisables, reflète l'ambition du gouvernement de tirer parti de ces avancées et de positionner le pays comme un acteur clé dans le domaine des technologies quantiques.

Construire un avenir quantique : les principaux objectifs stratégiques du Luxembourg

Malgré des avancées significatives dans le domaine, les technologies quantiques font encore face à des défis majeurs, notamment des limitations *hardware*, des incertitudes scientifiques, des difficultés à contrôler et manipuler les états quantiques, ainsi que des obstacles à l'adoption industrielle tels que la faible sensibilisation, la préparation limitée des secteurs et une pénurie mondiale de talents. La stratégie nationale quantique du Luxembourg vise à relever ces défis en favorisant un écosystème quantique robuste et interconnecté, en tirant parti de ses forces en R&D publique, de son expertise en TIC et de partenariats public-privé à travers une approche multidisciplinaire agile et transversale.

Les actions clés incluent l'établissement de cadres de collaboration, des mécanismes de financement ciblés, des programmes d'éducation et de formation, des initiatives d'attraction de talents et des partenariats stratégiques. Ces actions sont complétées par des investissements soutenus dans les infrastructures quantiques, notamment à travers des initiatives européennes telles que EuroHPC et EuroQCI, pour accélérer les progrès scientifiques et le développement de solutions quantiques, garantissant que le Luxembourg reste un acteur compétitif dans le paysage quantique mondial.

Le premier objectif clé de cette stratégie est la mise en œuvre et l'adoption réussies de MeluXina-Q, le premier ordinateur quantique du Luxembourg, qui sera intégré dans le centre nationale de calcul haute performance (HPC) à Bissen et fera partie du réseau EuroHPC. Ce système servira de catalyseur pour le développement précoce d'algorithmes et de logiciels quantiques, soutenant les efforts de recherche nationaux et européens. De plus, la stratégie nationale quantique vise à établir un cadre qui unifie les efforts existants en matière de recherche sur les algorithmes quantiques, construit de nouvelles capacités grâce à l'intégration de la plateforme de calcul quantique dans l'architecture HPC, et stimule le développement de solutions *hardware* et *software* innovantes ayant un impact économique.

Le deuxième objectif stratégique clé est le développement d'une infrastructure de communication sécurisée quantique. Le Luxembourg, en tant que participant actif à l'initiative EuroQCI, vise à établir des bancs d'essai pour des réseaux de communication sécurisés terrestres et par satellite, tout en favorisant le développement des composants technologiques nécessaires aux réseaux de communication quantiques de nouvelle génération. En parallèle, le Luxembourg s'engage à renforcer son rôle dans les initiatives de recherche européennes, notamment le *Quantum Internet Alliance* dans le cadre du programme *European Quantum Flagship*, et à promouvoir le développement et le déploiement d'algorithmes cryptographiques résistants aux quantiques. Ce dernier point s'appuie sur la solide expertise nationale du Luxembourg en matière de cybersécurité pour protéger son infrastructure numérique contre les menaces futures, dans un domaine connu sous le nom de cryptographie post-quantique (PQC).

Le troisième objectif stratégique est de stimuler la croissance économique grâce aux technologies quantiques, en créant de nouvelles opportunités commerciales pour le Luxembourg. Les domaines clés incluent les *wide bandgap* (WBG) semi-conducteurs pour les puces quantiques, ainsi que l'exploitation des avancées en communication et en informatique quantiques. En renforçant sa base quantique, le Luxembourg vise à assurer un leadership technologique et une résilience économique à long terme dans l'économie quantique émergente.

Pour faire progresser les technologies quantiques, le Luxembourg favorisera la collaboration interdisciplinaire et les synergies intersectorielles, en s'alignant sur l'approche de l'UE et en réaffirmant son engagement par l'approbation de la Déclaration quantique de l'UE. Les experts soulignent que l'accélération du développement quantique et la résolution des défis stratégiques nécessitent la création des pôles d'innovation axés sur les technologies quantiques. Ces clusters devraient favoriser une forte collaboration entre le monde académique, l'industrie et le gouvernement pour stimuler les progrès nationaux et internationaux.

En réponse, la présente stratégie propose d'établir des pôles thématiques clés au sein de l'écosystème quantique du Luxembourg. Inspirés par le modèle de l'*AI Factory*, ceux-ci formeront une «*Quantum Factory*», un réseau collaboratif qui regroupe les ressources et les expertises pour répondre aux besoins scientifiques, technologiques et écosystémiques. Chaque pôle aura des objectifs spécifiques, allant de l'avancement de la recherche et des infrastructures au soutien de l'adoption industrielle. Des ateliers réguliers, des initiatives de formation et des plateformes de partage des connaissances renforceront encore la collaboration, stimuleront l'innovation et soutiendront le déploiement efficace des technologies quantiques. Ainsi, la *Quantum Factory* servira de mécanisme intégrateur pour soutenir la réalisation de l'objectif global de la stratégie.

Principes de base des technologies quantiques

Les technologies quantiques progressent rapidement et englobent trois domaines principaux, à savoir l'informatique et la simulation quantiques, la communication quantique et la détection quantique. Chacun d'entre eux offre un potentiel important pour transformer l'économie et la société luxembourgeoises.

Informatique quantique et simulation

L'informatique quantique exploite les principes de la mécanique quantique pour résoudre des problèmes qui dépassent les capacités des ordinateurs classiques. Contrairement aux bits classiques, les bits quantiques (qubits) peuvent exister dans un état de superposition, ce qui permet de traiter simultanément de nombreuses possibilités et d'obtenir des accélérations exponentielles pour certains algorithmes. Cette capacité rend l'informatique quantique particulièrement précieuse pour les tâches à forte complexité, comme celles rencontrées, par exemple, dans les domaines des sciences des matériaux, de la modélisation climatique, de l'optimisation financière et de la logistique.

Une application clé est la simulation quantique, qui consiste à utiliser des systèmes quantiques contrôlables pour modéliser des phénomènes quantiques complexes. Cette capacité a des implications majeures dans divers domaines, notamment la science des matériaux, la chimie, la découverte de médicaments et la physique fondamentale, où elle peut accélérer les avancées en offrant une compréhension plus approfondie du comportement de la matière à l'échelle atomique.

Actuellement, les ordinateurs quantiques se trouvent dans ce que l'on appelle l'ère de *Noisy Intermediate-Scale Quantum* (NISQ), caractérisée par un nombre limité de qubits et des taux d'erreur relativement élevés. Bien que ces dispositifs NISQ montrent un certain potentiel pour des applications spécifiques, l'objectif à long terme reste le *Fault-Tolerant Quantum Computing* (FTQC). Celle-ci nécessite des mécanismes de correction d'erreurs quantiques (*Quantum Error Correction*, QEC) pour compenser la décohérence et les erreurs de calcul, ce qui suppose le développement de systèmes dotés de millions de qubits d'haute-fidélité, ce qui reste un défi technologique majeur.

Plusieurs approches matérielles sont actuellement explorées, notamment les qubits supraconducteurs, les *trapped ions*, les qubits à base de spins dans des semi-conducteurs, et les qubits photoniques. Des entreprises privées mènent la course dans ce domaine, bien qu'un avantage quantique pratique, c'est-à-dire la capacité des systèmes quantiques à surpasser les systèmes classiques pour des tâches réelles, n'ait pas encore été atteint.

Communication quantique

L'urgence autour des communications quantiques découle de la vulnérabilité croissante des systèmes de sécurité numérique actuels. Malgré des efforts constants en cybersécurité et en défense, les cyberattaques deviennent de plus en plus sophistiquées, et les agences européennes alertent sur le fait que les dispositifs actuels seront insuffisants face aux menaces de l'ère quantique². Les communications quantiques s'appuient sur des principes de la mécanique quantique, tels que la superposition et l'intrication, pour renforcer la sécurité de la transmission et du stockage des données, ouvrant la voie à des technologies de communication avancées. La technologie la plus mature dans ce domaine, la distribution quantique de clés (*Quantum Key Distribution*, QKD), permet l'échange sécurisé de clés cryptographiques en détectant toute tentative d'interception.

Bien que la QKD fasse l'objet de déploiements expérimentaux dans des secteurs sensibles tels que la finance, la défense et les télécommunications, où la sécurité des communications est cruciale, son adoption à grande échelle se heurte à des défis d'infrastructure, notamment en ce qui concerne le passage à des réseaux au-delà des liaisons directes point à point par fibre optique.

La vision à long terme est celle d'un internet quantique global, où des qubits intriqués permettent une communication ultra-sécurisée à longue distance et le calcul quantique distribué. La progression vers cette vision repose sur trois générations de technologies de communication quantique :

1. **QKD** : Permet une communication sécurisée point à point, résistante à une puissance de calcul illimitée ; cette technologie est déjà partiellement commercialisée.
2. **QKD basée sur l'intrication** : Permet la mise en place de réseaux quantiques multi-utilisateurs pour des communications dynamiques et sécurisées, par exemple des infrastructures à l'échelle urbaine connectant plusieurs institutions gouvernementales.
3. **Réseaux de répéteurs quantiques** : Facilitent la communication quantique terrestre sur de longues distances sans recourir à des nœuds de confiance, ouvrant la voie à des réseaux évolutifs.

En parallèle, la Cryptographie Post-Quantique (PQC) est en cours de développement pour protéger les systèmes numériques classiques contre les futures menaces quantiques. Les conceptions de la PQC visent des systèmes cryptographiques asymétriques qui, selon les connaissances actuelles, sont résistants aux attaques quantiques tout en restant compatibles avec le matériel classique. Ces algorithmes reposent sur des

² Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (2023), "Position Paper on Quantum Key Distribution"

problèmes mathématiques considérés comme difficiles à résoudre à la fois pour les ordinateurs classiques et quantiques. En août 2024, le National Institute of Standards and Technology (NIST) des États-Unis a publié trois standards de cryptage post-quantique, à savoir CRYSTALS-Kyber pour le chiffrement général, et CRYSTALS-Dilithium et SPHINCS+ pour les signatures numériques.

Étant donné la menace du *store-now-decrypt-later*, les solutions cryptographiques hybrides combinant PQC et chiffrement classique sont prioritaires à l'échelle mondiale, soutenues par une approche de crypto-agilité permettant aux systèmes de s'adapter aux menaces évolutives.

Détection quantique

La détection quantique exploite des principes de la mécanique quantique tels que la superposition, l'intrication et la cohérence pour mesurer des grandeurs comme le temps, les champs magnétiques, la gravité et la température avec une précision exceptionnelle. Les principales applications incluent :

- La gravimétrie quantique pour la cartographie géologique et l'exploration des ressources.
- Des magnétomètres ultra-sensibles pour l'imagerie médicale et la surveillance de l'activité cérébrale.
- Les horloges atomiques pour une mesure du temps et une synchronisation extrêmement précise.
- Les gyroscopes quantiques pour la navigation sans dépendance au GPS.

L'informatique quantique ne représente pas seulement un saut en puissance de calcul — c'est un changement de paradigme qui redéfinit notre manière d'aborder l'insoluble.

D'autres technologies émergentes, telles que le LiDAR quantique et le radar quantique, promettent des capacités de détection améliorées pour les véhicules autonomes et les applications aérospatiales, bien que d'importants défis techniques subsistent. Si les capteurs classiques restent souvent plus pratiques et économiques, les capteurs quantiques démontrent déjà des avantages nets dans certains domaines spécialisés, tels que la recherche biomédicale, les relevés géophysiques ou l'analyse de défaillances dans les semi-conducteurs.

L'adoption à plus grande échelle des capteurs quantiques dépendra du développement de méthodes de production évolutives, rentables, et compatibles avec les technologies existantes.

Écosystème quantique au Luxembourg

Communauté de recherche

Le Luxembourg abrite une communauté de recherche quantique bien établie et de haut niveau, qui excelle dans divers domaines, notamment dans l'informatique et la simulation quantiques ainsi que dans le domaine de la communication quantique. Cette communauté contribue de manière significative à la recherche académique et appliquée, tout comme au développement industriel.

L'Université du Luxembourg a fait des technologies quantiques une priorité dans son cadre stratégique et dans son Plan Quadriennal actuel³. Deux de ses principaux acteurs dans ce domaine sont la *Faculté des Sciences, des Technologies et de la Médecine* (FSTM) et le *Interdisciplinary Centre for Security, Reliability and Trust* (SnT).

La FSTM mène des recherches à la fois théoriques et appliquées en science quantique, avec une expertise couvrant la théorie de l'information quantique, la cryptographie, la métrologie et la détection. Ses chercheurs développent des algorithmes quantiques pour la mécanique computationnelle et la science des données, explorent diverses plateformes de calcul quantique et font progresser la métrologie quantique pour des mesures de haute précision. En cybersécurité, la FSTM se concentre sur la cryptographie quantique et post-quantique, ainsi que les communications sécurisées et le chiffrement résistant au quantique. Elle dirige également des travaux en physique quantique computationnelle et dispose d'une plateforme avancée en optique quantique dédiée à l'étude des interactions quantiques ultrarapides.

³ <https://www.uni.lu/en/about/profile/mission-strategy-values/>

Le SnT mène des recherches avancées dans l’informatique et les communications quantiques à travers de multiples domaines. Ses travaux portent notamment sur les réseaux quantiques sécurisés, en abordant des aspects clés tels que les logiciels, la cryptographie, les réseaux, le traitement du signal et l’optique. Le SnT est également fortement impliqué dans la cryptographie quantique et post-quantique, avec un accent particulier sur la conception, l’analyse d’algorithmes, et le développement de standards de chiffrement.

En outre, le *Luxembourg Institute of Science and Technology* (LIST) joue un rôle essentiel dans l’écosystème quantique national, en se concentrant sur le volet du *hardware* quantique à base de semi-conducteurs. Mettant l’accent sur les puces quantiques évolutives, le LIST mène des recherches en communication quantique, en calcul distribué et en détection. Ses domaines clés incluent les circuits photoniques intégrés, les centres colorés, ainsi que les processeurs et mémoires quantiques à base de spins, contribuant ainsi au développement des technologies quantiques de nouvelle génération.

Innovation et industrie

Informatique quantique

Le Luxembourg a récemment démontré son ambition dans le domaine de l’informatique quantique à travers sa participation réussie à l’appel à projets EuroHPC pour l’hébergement d’ordinateurs quantiques. Sous l’impulsion du ministère de l’Économie et du ministère de la Recherche et de l’Enseignement supérieur, le pays a été sélectionné pour cette initiative et entamera en 2025 la phase d’acquisition de son système informatique quantique. Ce dernier sera hébergé par LuxProvide, au sein du centre national de compétences en calcul haute performance situé à Bissen, avec une mise en service prévue en 2026.

Baptisé MeluXina-Q, le système sera intégré à l’infrastructure existante du supercalculateur MeluXina, et sera ultérieurement connecté au futur supercalculateur MeluXina-AI, créant ainsi un écosystème de calcul hybride haute performance. Cet ensemble sera hébergé dans un centre de données sécurisé, certifié Tier IV, à Bissen.

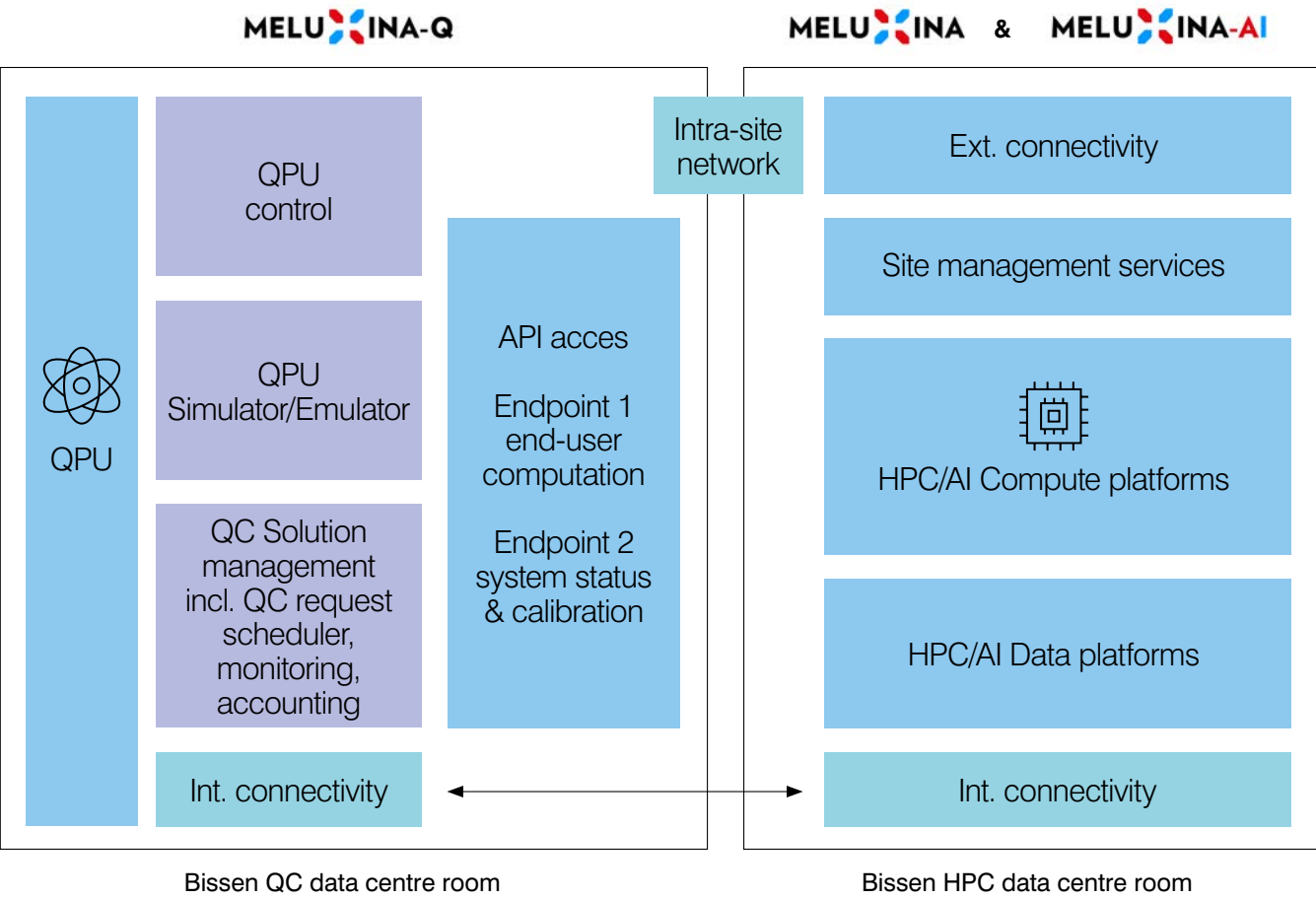


Schéma simplifié de l’architecture MeluXina-Q

L'intégration de l'ordinateur quantique dans une infrastructure HPC traditionnelle constitue une initiative pionnière, car très peu d'ordinateurs quantiques sont aujourd'hui installés en dehors de laboratoires de développement ou d'environnements de recherche.

MeluXina-Q sera conçu et construit en accordant une attention particulière à la durabilité et à la fiabilité. La plateforme de calcul reposera sur une technologie de qubits de spin dans le silicium, qui constitue une base prometteuse en termes de scalabilité pour l'avenir. Cette technologie peut être fabriquée à l'aide de procédés industriels en silicium éprouvés, avec une chaîne d'approvisionnement sécurisée au sein de l'Europe. Ce choix technologique s'inscrit dans la stratégie de diversification mise en œuvre au niveau européen, visant à renforcer l'autonomie technologique et à soutenir des solutions innovantes alignées avec les capacités industrielles existantes.

Communication quantique

Sous la direction du Département des Médias, de la Connectivité et de la Politique Numérique (SMC) au sein du ministère d'État, le Luxembourg est un acteur clé dans la communication quantique, rejoignant le programme EuroQCI, dirigé par la Commission européenne et l'Agence spatiale européenne (ESA) en 2019 et s'alignant sur la vision de l'UE pour la mise en place d'un réseau de communication quantique sécurisé. Dans le cadre de ses efforts, le pays a établi un banc d'essai expérimental de QKD à l'Université du Luxembourg. Un jalon significatif a été récemment atteint avec la mise en œuvre réussie d'une première connexion QKD transfrontalière terrestre avec la Belgique. D'autres projets nationaux et transfrontaliers de QKD avec plusieurs États membres de l'UE (par exemple BENELUX-QCI, TransEuroOGS), impliquant des acteurs privés et des instituts de recherche publics, sont actuellement en cours, visant à mettre en œuvre les premiers réseaux de communication quantique intégrés, combinant des liens fibre optique et satellite pour la transmission sécurisée de données. Le Luxembourg est également impliqué dans des projets internationaux de QKD par le biais de collaborations avec des pays ou des entités non européens, certains de ces projets étant financés par l'ESA (par exemple INT-UQKD).

Depuis 2017, plusieurs acteurs industriels basés au Luxembourg, avec le soutien de l'Agence spatiale luxembourgeoise (LSA) et de l'Agence spatiale européenne (ESA), ont été activement impliqués dans le développement de QKD basé sur l'espace en tant que composant fondamental de l'initiative EuroQCI. EuroQCI va être intégré dans la prochaine constellation de satellites sécurisés de l'UE, IRIS², créant un réseau unifié qui combine la sécurité quantique de pointe avec l'infrastructure de communication par satellite établie.

Le Luxembourg joue un rôle clé dans le projet IRIS². Le pays contribuera à la conception et au déploiement de la constellation de satellites et accueillera également l'un des principaux centres de contrôle du programme pour l'exploitation.

Un composant clé d'EuroQCI est EAGLE-1, une mission de satellite QKD développée dans le cadre du programme ARTES de l'ESA. Le Luxembourg est un des pays pilotes du projet EAGLE-1, avec l'opérateur de satellites SES en tête. La mission est prévue pour un lancement en 2026 et permettra de tester et de valider la technologie QKD basée sur l'espace depuis l'orbite terrestre basse (LEO). Par la suite, EAGLE-1 intégrera les réseaux quantiques satellitaires et terrestres pour permettre la QKD transfrontalière, ouvrant la voie à des services sécurisés quantiques évolutifs au sein de l'infrastructure future IRIS².

Contexte politique au Luxembourg

Le Luxembourg favorise activement la transformation numérique et crée un environnement propice à l'innovation technologique. Les efforts nationaux de recherche et de développement quantiques sont guidés par les stratégies globales du pays en matière de numérique, de recherche et d'innovation, qui fournissent une base pour les avancées technologiques, y compris les technologies quantiques. Le développement d'une stratégie nationale en matière des technologies quantiques offre un cadre clair, agile et transversal pour les ambitions et priorités du Luxembourg, favorisant la croissance d'une économie quantique au sein d'un paysage technologique plus large.

La participation active aux initiatives européennes telles que EuroHPC et EuroQCI garantit que les efforts du Luxembourg en matière de l'informatique et de communication quantiques s'alignent sur les programmes et cadres politiques paneuropéens, contribuant au développement d'une infrastructure quantique européenne cohérente.

Normalisation technique dans les technologies quantiques

Le Luxembourg, par l'intermédiaire de son organisme national de normalisation ILNAS⁴, participe activement aux efforts de normalisation quantique européens et internationaux. Via la commission ILNAS/NSC03, il facilite la participation nationale à diverses initiatives de développement de normes quantiques, surveille les évolutions mondiales et assure le transfert des informations pertinentes vers le marché national. Cet effort est particulièrement important compte tenu du développement rapide de ces technologies, qui passent de la recherche expérimentale aux applications pratiques.

⁴ Institut luxembourgeois de la normalisation, de l'accréditation, de la sécurité et qualité des produits et services (ILNAS)

L'Union européenne renforce son leadership dans les technologies quantiques grâce au Pacte quantique et à des initiatives clés dans les domaines de l'informatique, des communications et de la détection quantiques. Le Luxembourg contribue à cet effort stratégique en faveur de la souveraineté numérique et de l'innovation technologique.

La stratégie nationale de recherche et d'innovation du Luxembourg et sa pertinence pour les technologies quantiques

En 2020, le Luxembourg a introduit sa stratégie nationale de recherche et d'innovation⁵, visant à construire une économie numérique durable, diversifiée et axée sur la connaissance au cours de la prochaine décennie. La stratégie est structurée autour de quatre priorités clés en matière de recherche et d'innovation, parmi lesquelles le pilier «Transformation industrielle et des services» est particulièrement pertinent pour les technologies quantiques.

Ce pilier spécifique se concentre sur l'avancement des systèmes autonomes, de la robotique, des systèmes informatiques et de communication de nouvelle génération, des télécommunications spatiales et de la science des matériaux. Ces domaines s'alignent étroitement avec les domaines clés des technologies quantiques tels que l'informatique quantique, la cryptographie quantique, les télécommunications améliorées par la quantique et la recherche sur les matériaux quantiques. La stratégie nationale de recherche et d'innovation sera mise à jour pour refléter les domaines stratégiques clés, y compris les priorités de recherche spécifiques aux technologies quantiques définies dans la présente stratégie.

Technologies quantiques pour la défense

La Direction de la Défense du Luxembourg (Lux DoD) coordonne et met en œuvre la politique de défense nationale, garantissant que les Forces armées luxembourgeoises sont correctement dotées en personnel et en équipements pour protéger les intérêts de sécurité nationale et remplir des missions tant nationales qu'internationales. Lux DoD est responsable de la planification des investissements, du développement des capacités militaires et du soutien à la diversification des efforts de défense du pays. Aujourd'hui, la Défense luxembourgeoise et ses Forces armées maintiennent un large éventail de compétences en reconnaissance terrestre, défense aérienne, spatiale et cybernétique.

Les technologies quantiques, reconnues comme des technologies émergentes et à double usage, devraient avoir un impact significatif sur les capacités militaires et de défense. Leur importance croissante est soulignée par la première stratégie quantique de l'OTAN, publiée fin 2023.

Du point de vue de la cyberdéfense, le *Competence Hub in Research in Cybersecurity and Cyber Defence* (Cyber Research Hub), lancé par Lux DoD en partenariat avec l'Université du Luxembourg, promeut et finance divers projets de recherche, y compris ceux liés aux technologies quantiques.

En réponse à la montée des menaces en matière de cybersécurité, la Défense luxembourgeoise explore l'utilisation des technologies quantiques pour la transmission et le stockage sécurisés d'informations confidentielles. Des capacités futures en calcul et détection quantiques pourraient être développées en collaboration avec des partenaires nationaux et internationaux, à mesure que la technologie, les politiques et la préparation du marché avancent.

Politique et cadre européens

L'UE se positionne comme un leader mondial dans les technologies quantiques, reconnaissant leur importance stratégique pour l'innovation scientifique et industrielle. Le Pacte quantique lancé en décembre 2023 souligne l'engagement de l'UE à construire un écosystème quantique de classe mondiale, en s'alignant sur la stratégie de la Décennie numérique et les objectifs plus larges de souveraineté numérique.

Les initiatives clés au niveau de l'UE incluent :

- **Informatique quantique** : EuroHPC JU vise à déployer le premier ordinateur quantique d'Europe d'ici 2025 et à atteindre une position de leader mondial d'ici 2030. Le Luxembourg a rejoint en 2024, prévoyant d'exploiter un ordinateur quantique à partir de 2026.
- **Communication quantique** : L'initiative EuroQCI, lancée en 2019 et soutenue par tous les États membres de l'UE, développe un réseau de communication quantique sécurisé intégré au système satellite IRIS². Les efforts se concentrent également sur la normalisation du chiffrement quantique sécurisé.
- **Hardware quantique** : Le UE *Chips Act* soutient le développement et la fabrication de puces quantiques, en complément des initiatives quantiques plus larges.

De plus, le programme *Quantum Flagship*, un programme de 1 milliard d'euros lancé en 2018, ainsi qu'Horizon Europe, le programme Europe numérique (DEP) et le Conseil européen de l'innovation (EIC), stimulent la recherche et l'innovation pour transformer les percées en innovations prêtes pour le marché.

⁵ Gouvernement du Luxembourg (2020), Stratégie nationale pour la recherche et l'innovation

Partie 2.

Leviers

Six leviers d'action

En s'appuyant sur la création d'un écosystème quantique dynamique et interconnecté, les trois objectifs stratégiques de la présente stratégie, tels qu'énoncés dans la section «Approche générale», seront atteints par les mêmes six leviers d'action définis dans la stratégie nationale des données et la stratégie en matière d'IA. Chaque levier implique des actions et des cibles spécifiques qui travailleront ensemble pour atteindre ces objectifs.

1. Gouvernance et réglementations
2. Talents et compétences
3. Infrastructures
4. Éventail de services
5. Recherche, développement et innovation
6. Collaboration à l'international

1. Gouvernance et réglementations

Ambition : Élaboration d'un cadre de gouvernance solide

Pour garantir la mise en œuvre efficace de la présente stratégie, un cadre de gouvernance complet sera mis en place, axé sur la coordination, l'expertise et des résultats mesurables. Le développement du secteur quantique constitue un effort à long terme, nécessitant une collaboration soutenue entre les instituts de recherche publics, l'industrie, les organisations publiques et les entités gouvernementales.

➤ **Action 1 :** Création d'un bureau national de coordination quantique

Un élément central sera la création d'un bureau national de coordination quantique (NQCO), qui servira d'organe principal pour aligner les ressources et les initiatives dans la mise en œuvre de la stratégie quantique nationale. Ce bureau assurera la coordination des programmes de R&D, du développement des compétences, de l'engagement international et des efforts réglementaires, afin de garantir un écosystème cohérent.

L'une de ses missions clés sera de fournir des orientations stratégiques sur les priorités scientifiques et technologiques, tout en assurant une veille des tendances mondiales en matière de technologies quantiques. Cela permettra de maintenir le Luxembourg en phase avec les évolutions internationales et de préserver son avantage compétitif.

Afin de promouvoir un dialogue et une coopération continus, le NQCO organisera des réunions semestrielles réunissant des représentants gouvernementaux ainsi que les principaux acteurs

nationaux publics et privés des secteurs de la recherche et de l'innovation. Ces réunions permettront de faire le point sur les activités en cours, d'évaluer les avancées technologiques, de répondre aux défis émergents et de renforcer la collaboration intersectorielle. Elles auront pour objectif de stimuler des initiatives de recherche et d'innovation adaptées aux besoins d'une future économie nationale quantique, en assurant une synergie entre les acteurs publics, privés et académiques.

Les progrès seront suivis à l'aide d'étapes clés et d'indicateurs de performance (par exemple : nombre de projets, brevets, professionnels formés, applications concrètes), garantissant ainsi la transparence et la prise de décision éclairée pour construire un écosystème quantique résilient.

➤ **Action 2 :** Mise en place de comités consultatifs pour les initiatives stratégiques en matière de quantique

Sous l'égide du NQCO, le gouvernement pourra mettre en place des comités consultatifs, composés de représentants des institutions gouvernementales concernées, appuyés par des experts techniques externes lorsque cela est pertinent, afin de superviser les initiatives clés alignées avec la stratégie quantique nationale. Ces comités se concentreront sur les domaines prioritaires, notamment la réalisation des objectifs liés à l'informatique quantique et à la communication quantique.

Les comités consultatifs auront pour mission de coordonner et de suivre ces initiatives, en les alignant avec les priorités nationales, les politiques européennes et les objectifs économiques plus larges. Leur rôle consistera également à favoriser le développement

de l'écosystème et à générer des synergies entre les entités de recherche, les utilisateurs publics et privés, ainsi que les fournisseurs d'infrastructures et de services, par les moyens suivants :

- **Renforcer les échanges de connaissances :**
Faciliter les interactions entre parties prenantes publiques et privées, en mettant en relation les utilisateurs finaux et les instituts de recherche pour partager les meilleures pratiques et les retours d'expérience.

- **Développer et tester des cas d'usage :** Identifier les applications futures et collaborer avec les acteurs concernés pour effectuer des tests pratiques et des validations concrètes.
- **Assurer l'alignement réglementaire :** Servir d'interface entre les ministères et les parties prenantes concernant les futures réglementations européennes et les efforts de normalisation.

Ces comités consultatifs joueront un rôle clé pour stimuler l'action coordonnée et garantir que les initiatives stratégiques du Luxembourg en matière de technologies quantiques soient pleinement intégrées dans le contexte national et européen.

2. Talents et compétences

Ambition : Développer et attirer les talents et l'expertise pour construire un écosystème quantique robuste

La promotion et l'attraction des talents et des expertises sont fondamentales pour l'établissement d'un écosystème quantique dynamique. Les technologies quantiques sont particulièrement complexes et nécessitent une combinaison interdisciplinaire de compétences en physique, en informatique, en ingénierie et en cybersécurité.

Le Luxembourg a déjà entrepris des démarches significatives pour développer les talents dans le domaine quantique, notamment à travers des initiatives portées par ses institutions académiques et de recherche. L'Université du Luxembourg, par exemple, propose un large éventail de cours axés sur les technologies quantiques au sein de son *Département de Physique et des Sciences des Matériaux* (DPHYMS) et de son *Département d'Informatique* (DCS). Ces programmes couvrent des thématiques telles que la théorie de l'information quantique, les méthodes de calcul en physique, la mécanique quantique, les réseaux quantiques et la cryptographie post-quantique (PQC), offrant ainsi des connaissances à la fois fondamentales et avancées en science et ingénierie quantiques.

La constitution d'un vivier solide de talents permettra au Luxembourg de disposer des chercheurs, ingénieurs, innovateurs et experts techniques nécessaires pour exploiter pleinement le potentiel des technologies quantiques. En complément des programmes d'enseignement spécialisés, il est essentiel de développer une main-d'œuvre qualifiée et diversifiée,

notamment à travers des ateliers, des programmes de formation continue et de requalification, afin de répondre aux besoins croissants de l'industrie.

➤ Action 3 : Renforcer l'éducation, la formation et le développement de la main-d'œuvre

Pour atteindre les objectifs stratégiques définis dans la présente stratégie, le gouvernement vise à renforcer les compétences dans les technologies quantiques, avec un accent particulier sur l'informatique quantique, la communication quantique et la cybersécurité. Cela nécessite à la fois l'élargissement des initiatives existantes et le développement de nouveaux programmes pour combler les lacunes actuelles et anticiper les besoins futurs. Les mesures suivantes sont proposées pour faire progresser cet effort :

Développer des programmes d'enseignement spécialisés en technologies quantiques :

- Lancer des programmes de Master et de doctorat dédiés à la science de l'information quantique, en mettant l'accent sur le calcul quantique, les algorithmes et leurs applications en recherche et en industrie.
- Élargir l'enseignement interdisciplinaire en intégrant les études quantiques à des domaines comme la science des données, la cybersécurité, l'IA et le calcul haute performance (HPC).
- Intégrer des modules d'introduction aux technologies quantiques dans les programmes de physique au niveau de l'enseignement secondaire, afin de préparer les futures générations à des carrières dans le secteur quantique.

Renforcer les compétences des étudiants par des approches interdisciplinaires et collaboratives :

- Favoriser la collaboration entre les départements universitaires (physique, informatique, ingénierie) à travers des initiatives de recherche conjointes et des cours coenseignés.
- Aligner les programmes éducatifs sur les projets nationaux d'infrastructure, tels que la future plateforme de calcul quantique MeluXina-Q.
- Explorer la mise en place de chaires professorales conjointes entre institutions nationales pour renforcer les liens en recherche et les échanges de connaissances.

Étendre la formation, la sensibilisation et le développement des compétences :

- Offrir une diversité d'opportunités de formation, incluant des ateliers, des programmes de certification et des cours pour cadres, afin de constituer une main-d'œuvre « quantum-ready ».
- Mettre en œuvre des initiatives de requalification professionnelle répondant aux besoins de l'industrie.
- Fournir des formations spécialisées aux professionnels issus de domaines connexes (informatique, ingénierie, physique) pour faciliter leur transition vers le secteur quantique (p.ex. : Digital Learning Hub).
- Promouvoir la sensibilisation du public à travers des conférences, des partenariats et des projets éducatifs (p.ex. : Scienteens Lab, Luxembourg Science Center).

Attirer et retenir les talents :

- Établir des partenariats avec des universités de premier plan à l'international pour soutenir la recherche et les échanges d'étudiants.
- Développer des cours conjoints en technologies quantiques avec des institutions étrangères afin de faciliter l'accès à une expertise de haut niveau au Luxembourg.
- Attirer des talents mondiaux en physique quantique en proposant un environnement de recherche compétitif, s'appuyant sur des infrastructures, services et programmes de pointe (AI Factory, MeluXina-Q, LuxQCI, Cyber Research Hub).

Ces mesures devront être mises en œuvre de manière concertée, avec la participation active de l'ensemble des parties prenantes concernées, les milieux académiques et les institutions publiques jouant un rôle de premier plan. Elles seront également renforcées par des initiatives conjointes développées en lien avec les stratégies nationales sur les données et l'intelligence artificielle, afin de garantir une approche interdisciplinaire, établissant des ponts entre technologies quantiques, intelligence artificielle et science des données. Cela permettra de soutenir le développement global d'un vivier et d'un pipeline de talents solide, apte à relever les défis transversaux posés par la transition vers une économie numérique et quantique.

3. Infrastructures

Un axe central de la stratégie quantique nationale du Luxembourg est le développement de l'infrastructure nationale en informatique quantique et en communication quantique, en alignement avec les initiatives EuroHPC et EuroQCI, afin de renforcer le rôle du pays au sein de l'écosystème quantique européen. Deux objectifs stratégiques clés en matière d'infrastructure sont identifiés :

- Développer une expertise et des services en informatique quantique, avec la plateforme MeluXina-Q comme capacité essentielle permettant l'exploration, l'expérimentation et l'adoption progressive du calcul quantique au niveau national.

- Établir un réseau national dynamique de communication quantique, accompagné de mesures pour faciliter la transition vers la cryptographie post-quantique, afin d'assurer la résilience, la sécurité et la souveraineté à long terme de l'infrastructure nationale de données et du dispositif luxembourgeois de cybersécurité.

Dans ce qui suit, ces deux objectifs stratégiques seront développés plus en détail.

Ambition : Développer l'expertise et les services en informatique quantique, avec la plateforme MeluXina-Q comme capacité clé habilitante

En tant que précurseur dans l'adoption du calcul haute performance au sein du réseau de EuroHPC, le Luxembourg reconnaît le potentiel transformateur de l'informatique quantique pour résoudre des problèmes complexes dépassant les capacités des superordinateurs conventionnels. Dans cette optique, le Luxembourg, à travers LuxProvide, et sous l'impulsion du ministère de l'Économie et du ministère de la Recherche et de l'Enseignement supérieur, a été retenu en 2024, à l'issue d'un appel à projets européen compétitif de EuroHPC JU, pour l'hébergement d'un ordinateur quantique. La phase d'acquisition du système quantique MeluXina-Q est prévue pour 2025, avec une mise en service et un début des opérations programmés pour 2026.

La mise en œuvre réussie de MeluXina-Q constitue une ambition nationale majeure. Sa mise en service devrait jouer un rôle de catalyseur pour le développement précoce d'algorithmes et de logiciels quantiques, en soutien aux efforts de recherche tant au niveau national qu'europpéen. Cette stratégie vise à rassembler les initiatives existantes en matière de recherche sur les algorithmes quantiques, à développer de nouvelles capacités par l'intégration de la plateforme quantique à l'infrastructure HPC, et à stimuler l'innovation en matière de *hardware* et *software* ayant un impact économique concret.

➤ Action 4 : Mise en œuvre et adoption de MeluXina-Q en tant qu'infrastructure numérique nationale stratégique

Pour exploiter pleinement le potentiel de la plateforme d'informatique quantique MeluXina-Q, sa mise en œuvre réussie et son adoption large par les utilisateurs sont essentielles. En tant que pilier de l'écosystème luxembourgeois du calcul haute performance (HPC), MeluXina-Q jouera un rôle central dans la promotion de la recherche et la stimulation de l'innovation industrielle, en intégrant les capacités quantiques aux infrastructures numériques nationales et européennes.

Dans le cadre de la phase de mise en œuvre de MeluXina-Q, les mesures suivantes seront prises pour

libérer la valeur du calcul quantique pour l'écosystème de recherche et d'innovation du Luxembourg, et pour faciliter son adoption :

- **Plateforme quantique évolutive** : Lancement avec une capacité initiale de calcul quantique, suivi d'une mise à niveau à moyen terme vers une *Quantum Processing Unit* (QPU) plus puissante au cours de ses quatre premières années d'exploitation, afin d'élargir les capacités de calcul.
- **Solution quantique complète** : Mise à disposition d'un environnement logiciel avancé et complet, avec passerelle intégrée pour le calcul hybride entre MeluXina et MeluXina-AI, soutenant la simulation quantique et le développement d'algorithmes.
- **Expérience utilisateur fluide** : Exploitation de MeluXina-Q en tant que partition de calcul dédiée, avec une interface conviviale destinée à réduire les obstacles à l'adoption pour les chercheurs et l'industrie, incluant un accès abordable pour les acteurs nationaux de la R&D.
- **Environnement de développement intégré** : Intégration d'outils quantiques dans la pile logicielle de MeluXina, avec un accès à de larges bibliothèques et simulateurs quantiques.
- **Accessibilité paneuropéenne** : Connexion de MeluXina-Q à la plateforme de fédération EuroHPC⁶, permettant un accès sécurisé et flexible aux ressources quantiques, HPC et IA pour les utilisateurs à travers l'Europe, favorisant ainsi la collaboration transfrontalière et l'innovation.

➤ Action 5 : Développer l'expertise et les partenariats pour exploiter pleinement le potentiel de l'informatique quantique

Avec la mise en œuvre de MeluXina-Q, le Luxembourg ambitionne de bâtir un écosystème solide de l'informatique quantique, capable d'en exploiter tout le potentiel. Le développement des compétences est un facteur clé pour l'introduction réussie et l'application effective des technologies de calcul quantique, d'autant plus que les infrastructures quantiques, les écosystèmes logiciels et l'expertise de marché sont encore à un stade précoce comparé au calcul classique.

La présente stratégie met l'accent sur plusieurs mesures essentielles permettant de créer un écosystème de l'informatique quantique florissant :

Centre de compétences et formation : Le gouvernement soutient la création d'un centre de

⁶ EuroHPC JU (2024), "Paving the Way for the EuroHPC Federation Platform"

Le Luxembourg entend devenir un acteur majeur de l'informatique quantique grâce à la plateforme MeluXina-Q, un ordinateur quantique hébergé par EuroHPC, une initiative qui a pour objectif de stimuler l'innovation, la recherche et l'impact économique à partir de 2026.

connaissances dédié au calcul quantique, tout en favorisant le développement des compétences à travers des conférences, ateliers et échanges d'expériences. Les formations porteront sur l'utilisation de simulateurs quantiques de classe mondiale, intégrés aux supercalculateurs MeluXina(-AI), en ciblant des applications pertinentes pour l'écosystème luxembourgeois.

Collaboration locale et internationale : Depuis 2024, LuxProvide organise des formations en informatique quantique pour des participants du Luxembourg, d'Irlande et du Japon. En partenariat avec le Digital Learning Hub, un portefeuille de formations adaptées est en cours de développement. Par ailleurs, les collaborations avec l'Université du Luxembourg et le LIST sont essentielles pour accompagner les utilisateurs et soutenir le déploiement de MeluXina-Q.

Intégration recherche-industrie : La collaboration avec le nouveau groupe de recherche en HPC et calcul quantique de l'Université du Luxembourg permettra de développer et valider des cas d'usage concrets initiaux, favorisant une adoption précoce par l'industrie, les start-ups et le milieu académique. LuxProvide, l'Université du Luxembourg et Luxinnovation, en tant que fondateurs du Centre national de compétences en HPC, évalueront les besoins nationaux et encourageront un accès élargi au HPC. Dans ce contexte, un cadre d'appropriation du quantique sera élaboré pour accompagner les PME et start-up dans l'exploration et l'investissement dans les technologies quantiques, avec un dialogue continu avec les parties prenantes pour assurer l'alignement avec les besoins de l'écosystème tout au long des phases de mise en œuvre et d'exploitation.

Partenariats européens et internationaux : Le Luxembourg collabore avec les sept autres entités hôtes quantiques d'EuroHPC afin de partager les bonnes pratiques et de développer des environnements logiciels hybrides HPC-quantique. La coopération existante avec l'ICHEC irlandais permet de mener des projets conjoints tels que HPCQS et NEASQC, axés sur des applications quantiques concrètes, notamment dans le secteur financier.

➤ Action 6 : Développer un écosystème logiciel quantique

À ce jour, l'utilisation de l'informatique quantique reste limitée en raison de la nécessité d'un hardware spécialisée, de chercheurs hautement qualifiés et du développement complexe d'algorithmes. Pour permettre une adoption plus large, il faudra développer un écosystème convivial, à l'image de la démocratisation du machine learning, reposant sur des outils standardisés, des cadres automatisés et des programmes de formation étendus. Les défis actuels incluent l'intégration des algorithmes quantiques aux systèmes classiques, l'immaturité des cadres hybrides, les langages spécialisés dépendants de la plateforme hardware, ainsi que des erreurs spécifiques aux systèmes quantiques qui compliquent les processus de test et de débogage.

Le Luxembourg va promouvoir un écosystème logiciel quantique robuste, soutenant le développement de solutions propriétaires et open source à travers toute la pile logicielle du calcul quantique. Une attention particulière est portée au développement d'outils automatisés pour l'analyse, le test, le débogage et la correction de programmes, afin d'assurer la fiabilité des logiciels quantiques et de permettre leur déploiement dans des applications concrètes.

Étant donné que les programmes quantiques doivent s'intégrer de manière fluide aux infrastructures logicielles existantes, l'objectif est de développer des systèmes intelligents pour l'analyse de données, le stockage et l'accès sécurisé au hardware. À moyen terme, il s'agira d'encourager une collaboration étroite entre les chercheurs et les acteurs clés du quantique pour concevoir des outils spécialisés répondant aux besoins du développement logiciel quantique, en s'appuyant notamment sur des méthodes d'intelligence artificielle basées sur le traitement du langage naturel pour aider les développeurs à identifier les opportunités d'intégration quantique.

L'investissement dans les talents est essentiel, en mettant l'accent sur les profils spécialisés en analyse fonctionnelle, en génie logiciel et en génération de logiciels assistée par l'IA. Combiné à un accès à des infrastructures avancées, notamment des simulateurs quantiques, ordinateurs quantiques et plateformes d'IA générative, cet effort sera déterminant pour faire progresser le développement de logiciels quantiques.

Ambition : Établir un réseau national dynamique de communication quantique, accompagné de mesures pour la transition vers la cryptographie post-quantique afin d'assurer la résilience des communications de données nationales

Le Luxembourg poursuit une stratégie à long terme visant à étendre son infrastructure numérique, pierre angulaire de sa transition vers une économie numérique et innovante. Le Service des Médias, de la Connectivité et de la Politique numérique (SMC), rattaché au ministère d'État, pilote les initiatives nationales en matière de communication quantique. Il a notamment élaboré des projets de distribution quantique de clés (QKD) pour l'infrastructure nationale, en cohérence avec les objectifs de l'Union européenne en matière de réseau de communication sécurisé et résilient au quantique, dans le cadre du programme EuroQCI.

Outre les investissements continus dans les infrastructures de calcul haute performance et de big data, le Luxembourg dispose de l'un des réseaux haut débit numérique les plus avancés de l'UE, assurant une connectivité nationale et internationale optimale. S'appuyant sur cette base numérique solide, le pays s'est engagé à renforcer ses capacités en cybersécurité et en cyberdéfense, comme le souligne sa quatrième stratégie nationale en matière de cybersécurité⁷.

L'essor de l'informatique quantique accroît les risques pour les méthodes de chiffrement actuelles, soulignant l'urgence de développer des systèmes de communication sécurisés à l'ère quantique. Les deux principales solutions technologiques sont les suivantes :

- **Cryptographie post-quantique (PQC) :** Utilise des algorithmes résistants aux attaques quantiques, pouvant être intégrés immédiatement aux systèmes existants, bien qu'ils nécessitent des clés plus longues et une puissance de calcul accrue.
- **Distribution quantique de clés (QKD) :** Offre une sécurité inviolable fondée sur les lois de la mécanique quantique, mais reste limitée par les contraintes d'infrastructure et de portée.

Tandis que la PQC constitue une solution viable à court terme pour renforcer la résilience face aux menaces quantiques, la QKD s'impose comme une option de long terme pour les cas d'usage à haute sécurité. Les systèmes QKD actuels permettent une communication sécurisée point à point sur plusieurs centaines de kilomètres via des fibres optiques et des nœuds de confiance. Les recherches en cours visent à étendre ces capacités grâce à la transmission en espace libre, aux réseaux multi-utilisateurs et aux protocoles basés sur l'intrication, particulièrement adaptés aux environnements urbains. Le développement de répéteurs quantiques sera essentiel pour permettre des communications terrestres à longue distance sans recourir à des intermédiaires de confiance.

Pour répondre aux menaces quantiques, le Luxembourg priorise l'adoption accélérée de la cryptographie post-quantique, tout en poursuivant le développement de l'infrastructure QKD et l'extension des capacités de son réseau de communication, afin d'assurer une résilience durable de la cybersécurité nationale. Le gouvernement est également résolu à stimuler l'innovation dans ce domaine, à générer de la valeur économique pour les acteurs locaux, et à renforcer le rôle du Luxembourg comme acteur fiable et compétitif dans le domaine des technologies quantiques.

➤ Action 7 : Création d'applications à fort impact pour la première génération de réseaux de communication quantique

Dans le cadre de ses efforts au sein du programme EuroQCI, et en s'appuyant sur les activités déjà en cours, le gouvernement soutient le développement de cas d'usage concrets de la QKD pour des utilisateurs non académiques, en se concentrant sur les réseaux quantiques de première génération (liaisons point à point), couvrant des systèmes terrestres, spatiaux et hybrides. Fort de sa position de leader dans le domaine des communications quantiques spatiales, le Luxembourg entend consolider et élargir son avantage stratégique dans ce secteur.

Étant donné les coûts élevés et le niveau de maturité technologique encore précoce des équipements de communication quantique, le gouvernement adopte le rôle de précurseur et d'utilisateur pionnier. À cette fin, il soutient la mise en place des premières applications expérimentales de réseaux quantiques, connectant des parties prenantes publiques, tout en invitant des partenaires privés à acquérir une expérience concrète à travers des projets pilotes dans des contextes réels. Ces efforts viseront en priorité les secteurs à risque élevé, exposés aux menaces en cybersécurité, tels que la défense, l'énergie, la santé, les centres de données, et les institutions gouvernementales. À terme, cette

⁷ Luxembourg Government (2021), "National Cybersecurity Strategy IV"

Le Luxembourg compte déployer un réseau de communication quantique sécurisé et adopter la cryptographie post-quantique pour renforcer sa résilience numérique et son rôle dans les communications terrestres et satellitaires sécurisées.

initiative s'étendra aux organisations privées traitant des données sensibles, favorisant une adoption élargie des technologies de communication quantique.

Les priorités stratégiques clés incluent :

- **Communication quantique sécurisée pour les espaces de données :** Renforcer la sécurité des communications dans les espaces de données en intégrant la QKD dans les connecteurs de données, permettant une transmission sécurisée des données sensibles de santé et de recherche (p.ex. dans des initiatives telles que Clinnova, le futur EDIC Genome, ou l'Espace européen des données de santé (EHDS)).
- **Démonstration de la QKD spatiale :** Soutenir les tests et la validation des capacités de QKD par satellite, afin de relier les technologies expérimentales aux services opérationnels, et encourager l'adoption précoce dans des secteurs tels que les gouvernements, la finance, les télécommunications, le cloud et la santé.
- **Vers des services commerciaux de QKD d'ici 2030 :** Appuyer les initiatives visant à développer des services commerciaux de QKD longue distance par satellite, positionnant le Luxembourg comme acteur de premier plan dans le domaine des communications spatiales sécurisées par le quantique.

La stratégie met également l'accent sur le développement de compétences nationales dans le déploiement, l'exploitation et la gestion des clés des systèmes QKD. Les données issues de l'expérimentation serviront à améliorer les débits, la portée et la performance des réseaux. Enfin, la sensibilisation des acteurs privés et la collaboration avec le secteur des télécommunications seront essentielles pour encourager un développement fondé sur la demande et créer un écosystème de communication quantique durable.

➤ Action 8 : Promouvoir un réseau de communication quantique de future génération au Luxembourg

Le Luxembourg ambitionne de devenir un banc d'essai national pour les réseaux de communication quantique multi-utilisateurs, permettant la validation des technologies de deuxième et troisième génération. L'expertise du pays sur l'ensemble de la pile réseau de communication quantique, tant au niveau de recherche en matière de logiciel que du hardware, constitue une base solide pour cette ambition.

Une mesure stratégique essentielle est le développement d'un réseau quantique multi-utilisateurs, dynamiquement configurable, reposant sur la QKD basée sur l'intrication, permettant des connexions sécurisées à la demande sans recours à des nœuds de confiance, en collaboration avec les acteurs et parties prenantes clés du domaine.

Les premiers efforts porteront sur des connexions interurbaines entre utilisateurs publics et institutionnels. En s'appuyant sur l'excellente infrastructure nationale en fibre optique, des sites ruraux ou non urbains pourront être intégrés dans une seconde phase. En débutant avec les institutions gouvernementales et administrations publiques, le réseau pourrait s'étendre progressivement aux entités classées infrastructures critiques, telles que la santé, la finance, les centres de données et d'autres secteurs stratégiques, afin de développer des cas d'usage à fort impact, à la fois économique et sociétal.

Étant donné le stade encore précoce de la QKD basée sur l'intrication, les partenariats public-privé ainsi que la collaboration avec des start-up seront essentiels pour accélérer l'innovation. Le Luxembourg soutient également une participation active aux programmes européens, renforçant ainsi sa position dans l'écosystème quantique européen et contribuant activement au développement des réseaux quantiques de troisième génération. Ces derniers, intégrant des répéteurs quantiques et des relais reposant sur la mémoire quantique pour une communication terrestre sécurisée longue distance, visent à poser les fondations d'un internet du futur sécurisé par le quantique.

➤ Action 9 : Promouvoir le développement de technologies essentielles pour les réseaux de communication quantique et au-delà

Dans le prolongement de son objectif de devenir un banc d'essai pour les réseaux de communication quantique de nouvelle génération, le Luxembourg s'engage à faire progresser les technologies quantiques élémentaires afin de stimuler l'innovation dans le domaine des communications quantiques. Le gouvernement soutient activement les efforts de R&D,

tant logiciels que hardware, visant à développer des technologies nationales de réseau quantique adaptées à des cas d'usage spécifiques en cryptographie, détection et calcul.

En intégrant les logiciels développés au niveau réseau et les composants hardware au niveau physique, notamment grâce aux répéteurs quantiques, le Luxembourg entend renforcer les capacités des réseaux de communication quantiques. L'adoption d'une approche basée sur le Software-Defined Networking (SDN) constitue une stratégie prometteuse, permettant une gestion centralisée et une programmabilité accrue, deux éléments essentiels pour une intégration fluide des réseaux quantiques.

Dans ce contexte, le SDN pourrait permettre la création d'un banc d'essai unique pour les réseaux de répéteurs quantiques au Luxembourg, développé en collaboration avec les acteurs locaux. Ce banc d'essai pourrait servir de plateforme pour faire progresser l'intégration de composants matériels clés, tels que les mémoires quantiques, les sources d'intrication intégrées, les détecteurs, ainsi que les générateurs de nombres aléatoires quantiques (QRNG) et modulateurs intégrés sur puce. Cela garantirait que le réseau puisse évoluer en complexité tout en conservant des performances élevées et une grande fiabilité, soutenant ainsi le déploiement d'applications transformatrices dans les communications sécurisées, le calcul délégué, et au-delà.

Par ailleurs, le gouvernement soutiendra la R&D dans le domaine du développement de puces quantiques photoniques, un élément crucial pour la scalabilité des réseaux quantiques. Les puces quantiques photoniques sont en effet des composants essentiels pour les répéteurs quantiques avec mémoire intégrée, permettant d'étendre la portée des réseaux et d'en améliorer la fiabilité.

- **Accent sur les *wide-bandgap* (WBG) semi-conducteurs** : Des matériaux tels que le carbure de silicium (SiC) et le nitrure de gallium (GaN) présentent des défauts quantiques stables pouvant être exploités pour le développement de puces quantiques, avec des applications dans les domaines de la communication, du calcul et de la détection. Toutefois, des défis subsistent, notamment en ce qui concerne la préservation de la cohérence quantique, un élément clé pour garantir le bon fonctionnement de ces technologies.
- **Potentiel de la détection quantique** : Les puces quantiques à base de matériaux WBG présentent un fort potentiel pour la détection quantique, permettant le développement de capteurs de haute précision pour des secteurs tels que la défense, la santé ou encore la surveillance des infrastructures. Les capteurs quantiques étant parmi les premières technologies quantiques

susceptibles d'être commercialement viables, le développement d'une recherche dédiée dans ce domaine constitue une priorité et permettrait de combler une lacune actuelle dans l'écosystème luxembourgeois de R&D quantique.

- **Approche à long terme et objectifs économiques** : La présente stratégie met l'accent sur une recherche à moyen et long terme, visant à faire progresser les connaissances scientifiques tout en stimuler la croissance économique grâce à des investissements dans des technologies prometteuses comme les puces quantiques. Ces efforts visent à attirer des entreprises quantiques internationales, à soutenir la création de start-up, et à générer des emplois qualifiés, avec des retombées attendues sous forme de brevets, d'applications commerciales et de partenariats internationaux. En cohérence avec le Chips Act européen, le Luxembourg explore également sa participation aux lignes pilotes quantiques (Quantum Pilot Lines), afin de contribuer aux capacités européennes de fabrication de puces et d'en bénéficier.

➤ Action 10 : Préparer et réaliser la transition vers la cryptographie post-quantique

Face aux menaces croissantes que l'informatique quantique fait peser sur les systèmes de chiffrement classiques, le Luxembourg accorde une priorité stratégique à une transition sécurisée et proactive vers la PQC, en parallèle du déploiement de QKD, afin de protéger ses infrastructures critiques et données sensibles. Sous la coordination du *Haut-Commissariat à la Protection Nationale* (HCPN), le Luxembourg a co-signé une déclaration conjointe avec 18 États membres de l'UE, soulignant l'urgence d'intégrer la préparation aux menaces quantiques dans les stratégies de cybersécurité.

En tant que centre numérique et financier, fort de compétences en PQC, le pays entend accompagner les administrations publiques, secteurs critiques et entreprises dans la transition complexe vers le chiffrement résistant au quantique. Compte tenu de l'évolution des algorithmes PQC et des défis pratiques (clés plus longues, besoins accrus en calcul, intégration aux systèmes existants), le Luxembourg privilégie une approche hybride et progressive, combinant cryptographie traditionnelle et post-quantique, afin de garantir résilience renforcée et redondance des systèmes.

Conscient de la complexité d'une telle migration, le gouvernement prévoit de développer une feuille de route nationale pour accompagner cette transition, en ligne avec les recommandations de la Commission européenne en faveur d'une approche coordonnée à

l'échelle de l'UE⁸. La recherche et développement jouera un rôle central dans cette démarche. Le Luxembourg entend intensifier les efforts de R&D en PQC, en s'appuyant sur l'expertise déjà présente dans le pays. Ces travaux viseront à développer des algorithmes efficaces et à relever les défis pratiques d'implémentation.

Grâce à la future plateforme nationale hybride HPC–quantique, les chercheurs pourront évaluer les délais d'apparition de menaces quantiques pour établir des calendriers de migration réalistes, et utiliser cette infrastructure comme une *sandbox* expérimental pour tester des protocoles PQC sur divers types de hardware.

En collaboration avec des acteurs clés tels que le HCPN, la Luxembourg House of Cybersecurity (LHC), Incert G.I.E., et d'autres parties prenantes, la stratégie nationale met l'accent sur les actions suivantes pour assurer une transition fluide et dynamique vers la PQC :

- **Analyses des menaces quantiques** : Identifier les actifs et applications vulnérables à travers des inventaires cryptographiques complets, permettant une atténuation des risques et des solutions rentables.
- **Cadres de migration complets** : Élaborer des lignes directrices assurant une adoption fluide de la PQC avec une rétrocompatibilité et perturbation minimale, en adoptant une approche de crypto-agilité.
- **Mécanismes de soutien collaboratif** : Étudier la création d'un hub dédié à la PQC, chargé de fournir une assistance technique et stratégique aux entreprises durant leur transition.
- **Initiatives de sensibilisation** : Organiser ateliers, conférences et discussions politiques pour renforcer la compréhension et l'engagement autour de la communication sécurisée à l'ère quantique.
- **Recherche et normalisation** : Renforcer la recherche en PQC pour développer des protocoles cryptographiques avancés, soutenant la normalisation de la sécurité et l'interopérabilité entre secteurs.
- **Développement des talents et compétences** : Lancer des initiatives éducatives pour former les étudiants et professionnels aux compétences avancées en mathématiques et cryptographie, indispensables à l'implémentation de la PQC.
- **Collaboration internationale** : S'aligner sur les efforts mondiaux en coopérant avec des organismes comme l'Agence européenne pour la cybersécurité (ENISA), afin de garantir une approche coordonnée des défis liés à la PQC et à la cybersécurité.

Les efforts du Luxembourg en matière de PQC visent à renforcer la cybersécurité nationale, protéger les secteurs critiques et accompagner les entreprises dans l'adoption de solutions résistantes au quantique. La stratégie met l'accent sur une approche coordonnée et intersectorielle, reconnaissant que sa mise en œuvre efficace nécessite une collaboration étroite entre les institutions publiques, les acteurs industriels, les prestataires informatiques et les utilisateurs finaux.

➤ Action 11 : Explorer le potentiel de l'industrie de la défense dans le domaine des technologies quantiques

Dans le contexte géopolitique complexe actuel, la Défense luxembourgeoise explore les technologies quantiques pour assurer la transmission et le stockage sécurisés des données confidentielles. Le Cyber Research Hub, mis en place en partenariat avec l'Université du Luxembourg, soutient des activités de R&D ciblées dans le domaine de la cybersécurité, incluant les communications quantiques.

Au-delà de la cybersécurité, les technologies quantiques présentent un potentiel à long terme pour le développement de capacités de défense innovantes. L'approche du Luxembourg vise non seulement à renforcer la sécurité nationale, mais également à générer de la valeur économique par le développement et la commercialisation de solutions fondées sur les technologies quantiques.

Pour concrétiser cette vision, le gouvernement encouragera les applications de défense quantique à travers des mesures ciblées, incluant des partenariats public-privé ainsi qu'une collaboration internationale renforcée.

La stratégie quantique du Luxembourg renforce sa souveraineté numérique et le positionne comme acteur clé de l'économie quantique européenne grâce à ses infrastructures, talents et innovations technologiques.

⁸ European Commission (2024), "Commission Recommendation of 11.4.2024 on a Coordinated Implementation Roadmap for the Transition to Post-Quantum Cryptography"

4. Éventail de services

Ambition : Promouvoir l'innovation et l'impact économique grâce à une collaboration renforcée au sein de l'écosystème quantique national

La présente stratégie accorde une importance particulière au développement de la science et des technologies quantiques, tout en visant à générer un impact économique tangible en réunissant les expertises de l'industrie, du monde académique et de la recherche. Au cœur de cette approche se trouve la création de clusters spécialisés qui agissent comme des pôles d'échange de connaissances, de développement de la main-d'œuvre et d'innovation technologique. Construits sur des réseaux collaboratifs solides entre chercheurs, partenaires industriels et institutions publiques, ces clusters sont conçus pour accélérer le développement des technologies quantiques, relever les défis clés et combler le fossé entre la recherche fondamentale et les applications prêtes pour le marché.

› Action 12 : Création d'une Quantum Factory

Pour soutenir cette ambition, le Luxembourg vise à développer le concept d'une *Quantum Factory*, un réseau collaboratif et intégré inspiré de l'*AI Factory*. Cette initiative réunira les clusters quantiques sous une architecture commune afin de mutualiser les ressources et les infrastructures, de relever les défis scientifiques et technologiques, et d'accélérer l'innovation dans des secteurs stratégiques. Dotée d'une portée internationale, la *Quantum Factory* encouragera la collaboration intersectorielle, soutiendra le développement et l'attraction des talents, et stimulera l'innovation à l'échelle de l'écosystème.

Dans un premier temps, une évaluation sera menée pour identifier les domaines prioritaires en vue de la création de hubs quantiques thématiques au sein de la *Quantum Factory*. Ces hubs auront une vocation de recherche et développement et pourront inclure, par exemple, un centre d'excellence en science de l'information quantique pour promouvoir la recherche interdisciplinaire, un laboratoire de R&D quantique orienté mission, ou encore un hub dédié à l'avancement de la recherche en PQC.

Chaque hub disposera d'objectifs spécifiques, adaptés à son domaine technologique et à son niveau de

maturité. Des ateliers, programmes de formation et projets communs permettront de répondre aux défis interdisciplinaires, tandis que des plateformes d'échange de connaissances aideront à aligner les priorités de recherche nationales et à promouvoir les bonnes pratiques.

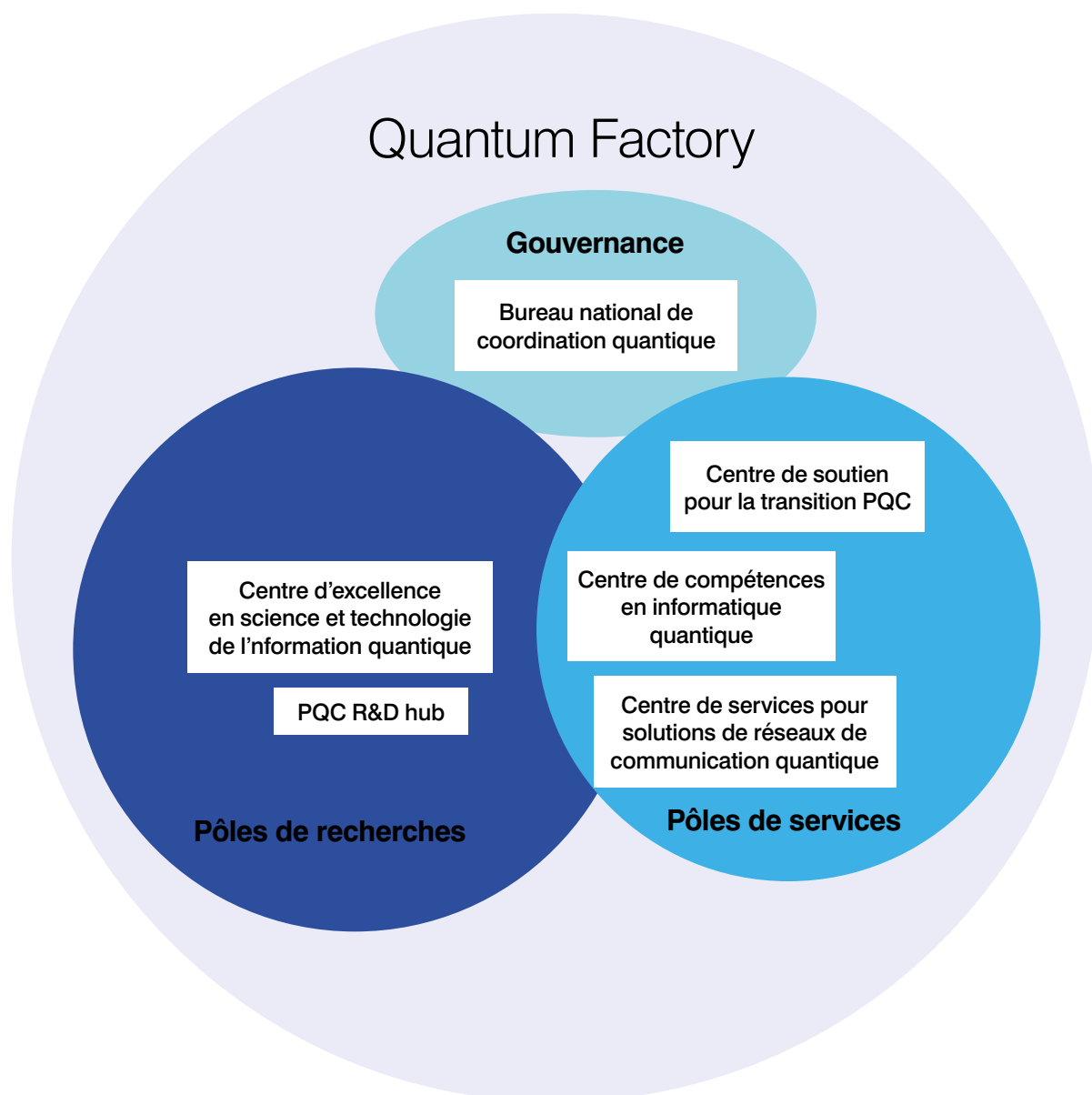
Une approche centrale sera également l'intégration des technologies quantiques avec l'IA et la science des données, permettant la formation d'équipes pluridisciplinaires composées d'experts métier, de chercheurs en IA, de data scientists et d'ingénieurs logiciels. Ces équipes auront accès aux plateformes HPC et aux services associés, et travailleront en étroite synergie avec les universités, les start-ups et les acteurs industriels afin d'accélérer l'innovation et les applications concrètes.

› Action 13 : Adoption des technologies quantiques par la création d'un écosystème de services

À mesure que les technologies quantiques évoluent, la présente stratégie vise à favoriser leur adoption en développant à long terme un écosystème de services solide au service de la recherche, de l'industrie et des institutions publiques. Bien que de nombreuses technologies quantiques soient encore en cours de développement, certains domaines tels que le calcul quantique, la cryptographie post-quantique (PQC) et les communications quantiques ont atteint un niveau de maturité suffisant pour permettre une première intégration dans des cas concrets.

Le Luxembourg entend encourager l'adoption des technologies quantiques en soutenant la création de hubs de services spécialisés, en complément des hubs de recherche mentionnés précédemment, afin de bénéficier directement aux acteurs locaux. À titre d'exemple :

- Un centre de soutien à la PQC qui assiste les entreprises dans la transition complexe vers une cryptographie résistante aux ordinateurs quantiques, en offrant une expertise technique et en sensibilisant aux menaces liées au quantique.
- Une campagne nationale de sensibilisation à la communication quantique, destinée à informer les parties prenantes publiques et privées ainsi que l'ensemble de la société sur les menaces posées par les ordinateurs quantiques et la nécessité d'une infrastructure sécurisée face au quantique.
- Un soutien au développement de services de réseaux de communication quantique, encourageant les acteurs locaux à entrer sur le marché et construisant un paysage de services compétitif et durable.



Concept d'une Quantum Factory fonctionnant comme un réseau collaboratif et intégratif de clusters dédiés

- Un centre de services dédié, soutenant la mise en œuvre d'algorithmes quantiques et favorisant l'adoption du calcul quantique auprès de l'industrie locale et des institutions de recherche.

La *Quantum Factory* représente un réseau collaboratif et intégré, combinant des clusters de recherche

thématiques, des hubs de services et des partenariats intersectoriels afin d'accélérer le développement et le déploiement des technologies quantiques dans des domaines stratégiques. Elle soutiendra le pays dans la construction d'un écosystème quantique robuste et agile, capable de tirer pleinement parti du potentiel des technologies quantiques.

5. Recherche, développement et innovation

Ambition : Renforcer l'écosystème de recherche et d'innovation quantique national

La présente stratégie place la recherche et l'innovation au cœur des ambitions quantiques du Luxembourg, avec pour objectif de développer un écosystème de recherche compétitif à l'échelle mondiale, moteur d'excellence scientifique et de progrès technologique.

Les objectifs clés incluent le renforcement de la recherche quantique fondamentale et appliquée, la définition de priorités de R&D orientées par des missions, soutenues par un cadre d'investissement structuré, ainsi que la garantie d'un soutien durable à la recherche de science quantique nationale afin d'attirer et former des talents d'excellence et de permettre les découvertes futures.

➤ **Action 14 :** Définition de priorités de recherche quantique ciblées

La stratégie vise à renforcer la place de la recherche quantique dans le cadre plus large de la politique d'innovation du Luxembourg, en consolidant les atouts du pays en science fondamentale, en technologies appliquées et en adoption industrielle.

Les priorités de recherche clés seront intégrées dans une mise à jour de la stratégie nationale de recherche et d'innovation, afin d'assurer une cohérence avec les objectifs nationaux et le développement de l'écosystème.

En réunissant la recherche, l'industrie et les ressources dans une approche collaborative, le Luxembourg entend transformer ses ambitions quantiques en innovations et en retombées économiques.

Un cadre de financement structuré basé sur ces priorités soutiendra à la fois des initiatives descendantes (*top-down*) dans des domaines clés alignés avec les priorités définies dans la présente stratégie, c'est-à-dire l'informatique quantique, la communication quantique et la cybersécurité quantique, ainsi que des programmes ascendants (*bottom-up*) pour stimuler l'excellence dans la recherche fondamentale et appliquée.

Les priorités de recherche clés identifiées sont :

Informatique quantique et algorithmes

- Développement d'algorithmes quantiques pour l'optimisation, l'IA et la mécanique computationnelle
- Investigation de différentes plateformes de calcul quantique (par exemple, qubits supraconducteurs, ion trapped, qubits de spin en silicium)
- Contrôle quantique des dispositifs bruités afin d'améliorer la tolérance aux fautes et d'optimiser les stratégies de correction d'erreurs quantiques
- Vérification et validation des logiciels quantiques

Réseau de communication quantique

- Recherche sur les architectures de communication quantique sécurisées, y compris les QKD terrestres et spatiaux, les répéteurs quantiques et les réseaux basés sur l'intrication
- Modèles hybrides quantique-classique intégrant PQC et QKD pour une communication sécurisée
- Protocoles de réseau quantique évolutifs, progressant vers l'Internet quantique du futur

Cryptographie quantique et post-quantique

- Développement d'algorithmes cryptographiques résistants aux attaques quantiques
- Recherche sur l'établissement de clés quantiques sécurisées, les modèles de sécurité hybrides et les implémentations réelles
- Normalisation et mise en œuvre industrielle de PQC

Pour cultiver un écosystème de recherche quantique florissant, les activités de recherche dans les domaines connexes, comme indiqué ci-dessous, peuvent également être soutenues afin de faire progresser la recherche quantique fondamentale et appliquée et de garantir que le Luxembourg reste engagé dans les développements clés de ces domaines émergents, favorisant l'innovation future et le développement des talents.

Théorie de l'information quantique

- Recherche sur le processing de l'information quantique pour l'informatique quantique, la cryptographie et la métrologie
- Intrication quantique, cohérence et correction d'erreurs pour l'évolutivité et la tolérance aux fautes dans les technologies quantiques

Métrologie et détection quantiques

- Technologies de détection améliorées par la quantique pour des mesures de haute précision dans les domaines de la santé, de la défense et de la surveillance des infrastructures critiques
- Estimation des paramètres quantiques pour améliorer la sensibilité et la précision dans les applications de métrologie

Physique quantique computationnelle et chimie quantique

- *Density Functional Theory* (DFT) et calculs de chimie quantique pour les applications en science des matériaux et des surfaces, chimie et biologie
- Développement d'approximations quantiques pour la modélisation et la simulation des matériaux
- Simulations quantiques de systèmes moléculaires et de matière condensée pour la conception de matériaux

Physique de la matière condensée et matériaux quantiques

- Systèmes quantiques fortement corrélés, matériaux topologiques, transition de phase quantique et effets fonctionnels multiples
- Exploration des défauts quantiques dans les systèmes à l'état solide, tels que le carbure de silicium (SiC) et le nitrure de gallium (GaN), pour l'informatique quantique, la détection et la communication
- Architectures hybrides pour une opération optimisée des systèmes quantiques (réglage de phase, réglage et conversion de longueur d'onde, contrôle de charge, température)

➤ Action 15 : Renforcer l'écosystème de recherche quantique national grâce à un financement stratégique

Le maintien d'un écosystème quantique dynamique nécessite des mécanismes de financement adaptés, capables de concilier continuité et innovation. Cela inclut le soutien à la création de nouveaux groupes de recherche, le renforcement des équipes existantes, ainsi que l'investissement dans des infrastructures de pointe. Un équilibre entre le financement compétitif

et les investissements stratégiques descendants (*top-down*) est essentiel pour atteindre les objectifs de la stratégie et stimuler la recherche et l'innovation quantique à plus large échelle.

Le Fonds National de la Recherche (FNR) joue un rôle clé dans le soutien à l'écosystème de recherche quantique, à travers des appels nationaux, la collaboration internationale et les programmes d'innovation dirigés par l'industrie. Il contribue également à renforcer le vivier de talents en soutenant les doctorants, postdoctorants et chercheurs en début de carrière.

Pour renforcer davantage l'écosystème, la stratégie promeut, en complément des schémas de financement classiques ascendantes (*bottom-up*), les dispositifs suivants :

- Des programmes d'innovation orientés mission, alignés sur les objectifs nationaux, y compris la recherche à haut risque et fort impact (p.ex. National Centres of Excellence in Research (NCER))
- Des programmes de R&D dirigés par l'industrie, pour accroître l'implication du secteur privé
- Une participation accrue aux programmes et consortiums européens
- Un renforcement stratégique des capacités par la création de nouveaux groupes de recherche dans des domaines quantiques émergents
- Des investissements ciblés dans les infrastructures et les équipements, afin de soutenir les objectifs scientifiques à long terme

➤ Action 16 : Centre d'excellence en science et technologie de l'information quantique (QIST)

En cohérence avec la vision de la *Quantum Factory*, qui vise à établir des clusters interconnectés pour favoriser la collaboration interdisciplinaire et la mutualisation des ressources, la présente stratégie propose d'évaluer la création d'un centre d'excellence en science et technologie de l'information quantique (QIST).

Ce centre aurait pour vocation de :

- Rassembler des experts de renommée internationale en un même lieu pour se concentrer sur la recherche des technologies de l'information quantique à fort impact, telles que la cryptographie quantique, l'intelligence artificielle quantique, l'optimisation et la simulation quantique.
- Faire progresser les applications concrètes dans des secteurs clés comme la finance, la défense, l'énergie, les sciences des matériaux et la logistique, en élevant les niveaux de maturité technologique (TRL).

- Servir de plateforme de collaboration internationale, renforçant la visibilité du Luxembourg sur la scène quantique mondiale et consolidant les liens avec les réseaux de recherche européens.
- Accueillir des programmes de chercheurs invités, des conférences et des forums internationaux afin de promouvoir l'excellence scientifique et l'ouverture à la communauté mondiale.

Ce centre deviendrait un pilier de la présence quantique du Luxembourg à l'échelle mondiale, en soutenant des découvertes de rupture et en affirmant un leadership scientifique à long terme, tout en jouant un rôle central dans l'attraction des talents.

➤ **Action 17** : Valorisation de la recherche et du développement quantiques - Le Deep Tech Lab du Luxembourg

En parallèle du concept plus large et plus fondamental d'un centre d'excellence en QIST, la présente stratégie, alignée avec la stratégie de données et la stratégie en matière d'IA, soutient la création d'un laboratoire

technologique orienté vers des missions, conçu pour servir de hub dynamique où les chercheurs et les ingénieurs peuvent accélérer le développement de solutions innovantes et pratiques destinées à la commercialisation dans des domaines alignés avec les priorités stratégiques nationales.

Dans le domaine des technologies quantiques, le laboratoire favorisera la valorisation des progrès scientifiques et technologiques en informatique quantique, communication quantique et cryptographie quantique, tout en travaillant en étroite collaboration avec le secteur privé luxembourgeois pour garantir des applications concrètes et un impact économique. De plus, le laboratoire jouera un rôle crucial dans l'attraction de talents de classe mondiale, ainsi que dans la rétention et le développement des talents locaux, en offrant un environnement de travail très attractif et dynamique.

6. Collaboration à l'international

Ambition : Favoriser la collaboration européenne et mondiale dans le domaine des technologies quantiques

Le gouvernement luxembourgeois reconnaît que la réalisation de ses ambitions quantiques nécessite une collaboration étroite entre le milieu académique, l'industrie, le gouvernement et les partenaires internationaux. Étant donné la complexité et le potentiel transformateur des technologies quantiques, une approche interdisciplinaire et collaborative est essentielle, en particulier celle qui met l'accent sur les synergies européennes et mondiales.

Au niveau européen, l'UE vise à construire un écosystème quantique de premier plan mondial, en promouvant à la fois l'excellence scientifique et les applications industrielles, tout en jetant les bases d'innovations révolutionnaires. Le Luxembourg aligne ses efforts sur cette vision, participant activement à des initiatives conjointes axées sur l'infrastructure quantique et la recherche collaborative. Cet engagement se reflète dans l'adhésion du Luxembourg à la déclaration européenne sur les

technologies quantiques, également connue sous le nom de pacte quantique.

Le pacte quantique fournit un cadre pour la coopération paneuropéenne, unissant les pays signataires autour de l'objectif commun d'établir l'UE en tant que leader mondial de l'innovation quantique. Pour y parvenir, il énonce plusieurs objectifs clés : coordonner les initiatives de recherche et de développement et déployer l'infrastructure quantique européenne ; accélérer l'adoption des technologies quantiques en renforçant la connexion entre la recherche et l'industrie ; soutenir la croissance des startups, des scale-ups et des leaders technologiques basés dans l'UE ; et renforcer les investissements, le développement des compétences et l'autonomie stratégique de l'Europe grâce à la mise en place de capacités de fabrication quantique dédiées.

➤ **Action 18** : Renforcer le rôle du Luxembourg dans l'écosystème quantique européen et global

La stratégie quantique actuelle met l'accent sur l'engagement actif dans des initiatives européennes telles que EuroHPC, EuroQCI, Quantera et les futures

actions liées aux technologies quantiques afin d'améliorer sa visibilité, son impact et sa contribution à l'écosystème quantique européen. Ces programmes offrent des cadres pour la coopération scientifique, le développement des infrastructures et l'innovation industrielle, permettant au Luxembourg de tirer parti de l'expertise et des ressources européennes.

Pour renforcer sa position, le Luxembourg poursuivra des accords bilatéraux et multilatéraux pour l'échange de connaissances, la recherche et développement conjointes, et les avancées technologiques, en se concentrant sur l'informatique quantique, la communication quantique et la cybersécurité. La collaboration avec les pays voisins est essentielle pour l'interopérabilité au sein des réseaux de communication quantiques européens, garantissant une intégration fluide avec les voies internationales (à la fois spatiales et terrestres). Au-delà de l'Europe, le Luxembourg reste ouvert aux partenariats avec des nations partageant les mêmes valeurs et standards.

Au niveau académique et industriel, le gouvernement s'engage à étendre les partenariats public-privé pour accélérer l'innovation quantique par le biais d'ateliers conjoints, de régimes d'aide dédiés et de mécanismes qui traduisent les avancées académiques en applications commerciales. Pour encourager l'adoption des technologies quantiques, le gouvernement favorisera la commande publique de solutions quantiques via les projets EuroHPC et EuroQCI et explorera les incitations fiscales et des mécanismes similaires pour stimuler les investissements du secteur privé et l'industrialisation, tout en positionnant le Luxembourg comme un hub pour les start-ups quantiques internationales.

Partie 3.

Projets phares

Cybersécurité : Démocratiser la cybersécurité

Les données de renseignement sur les menaces de cybersécurité sont rarement partagées et restent des flux propriétaires, limitant l'innovation et renforçant la position des fournisseurs oligopolistiques. En conséquence, des prix inabordables laissent les PME (représentant plus de 95 % de l'économie de l'UE) vulnérables, posant des risques significatifs pour les chaînes d'approvisionnement et la stabilité économique. Pour renforcer la résilience économique, les PME ont donc besoin d'un accès à des solutions de sécurité abordables, les protégeant contre le paysage de menaces en constante évolution.

Une manière efficace de remédier à cette faiblesse du marché est **d'ouvrir l'économie des données de cybersécurité**. L'économie des données repose sur les infrastructures cloud. Pour cette raison, le Luxembourg participe à l'IPCEI Next Generation Cloud Infrastructure and Services (IPCEI-CIS) et sa contribution se concrétisera par le projet macro CLOUD & dATA SecURity reSource cENTER (CLAUSEN), créant le premier **Open Cybersecurity Data Space** (OCDS) en Europe. Un tel espace de données favorise les synergies en facilitant la collecte et l'échange de données liées à la cybersécurité telles que les renseignements sur les menaces, les vulnérabilités et l'efficacité des mesures de protection. De plus, il nourrit les fabriques d'IA avec des données de cybersécurité, qui sont indispensables à la création de nouveaux outils de cybersécurité autonomes que les PME peuvent se permettre. Alors que des menaces cyber rapides et sophistiquées nécessitent des réponses promptes et efficaces, l'ambition du présent projet phare est de soutenir davantage l'écosystème de cybersécurité avec l'IA, appliquée à de vastes quantités de données de cybersécurité brutes et contextualisées.

- **En premier objectif**, le projet vise à mieux comprendre les adversaires en utilisant les outils existants de collecte de renseignements sur les menaces et en transformant les données brutes en informations de valeur. L'intégration de ces

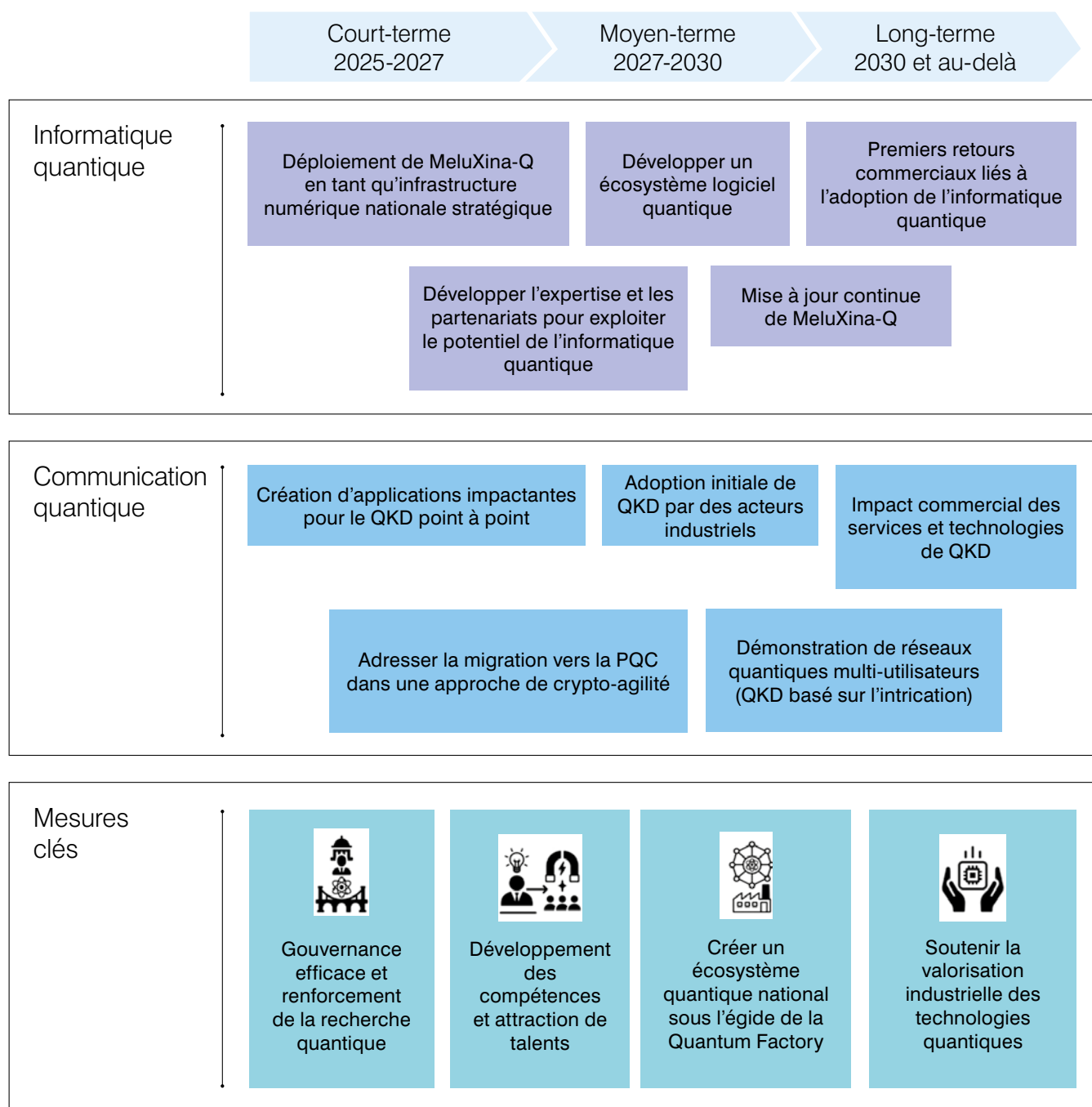
données permettra une analyse plus rapide des comportements malveillants et le traitement d'un plus grand volume d'activités. Les renseignements obtenus seront partagés avec la communauté de cybersécurité, les forces de l'ordre et les autorités judiciaires pour aider à identifier et combattre les menaces cyber, sécurisant ainsi les entreprises et les citoyens. Enfin, les renseignements sur les menaces collectés seront agrégés avec l'aide de l'IA dans des rapports de météo cyber.

- **Comme objectif secondaire**, le projet vise à renforcer la gouvernance, la gestion des risques et la conformité pour les PME. De nouvelles informations sur les risques, y compris des métriques et des techniques d'atténuation liées à l'adoption de nouvelles technologies de l'IA, seront fournies. De plus, l'utilisation de nouveaux modèles continuellement mis à jour démocratisera la gouvernance et la gestion des risques en fournissant des interfaces humaines faciles à utiliser, alimentées par l'IA. Cela permettra une intégration proactive et sécurisée de l'IA pour améliorer la précision des décisions de traitement des risques et des investissements. Les PME seront soutenues dans leur parcours de conformité en offrant une plateforme qui les aide à concevoir et à mettre en œuvre des politiques, des procédures et des directives de sécurité de l'information adaptées.
- **Le troisième objectif** se concentre sur la gestion des risques liés aux technologies émergentes. Ceux-ci couvrent les vulnérabilités inhérentes des systèmes de l'IA et la menace quantique pour la cryptographie. Pour relever ces défis, l'écosystème luxembourgeois a besoin de conseils, d'infrastructures de test et d'outils pour adopter la cryptographie post-quantique (PQC), ainsi que de mécanismes pour évaluer les implémentations de l'IA, les modèles et les processus d'apprentissage automatique.

Partie 4.

Conclusion

Feuille de route de la stratégie nationale en matière de technologies quantiques



Phase 1 : Établir les bases (2025-2027)

Mettre en place un cadre de gouvernance nationale pour coordonner les initiatives quantiques et favoriser la collaboration entre le milieu académique, les institutions de recherche, l'industrie et le gouvernement. Étendre

l'éducation quantique aux niveaux Bachelor et Master, combler les lacunes de l'écosystème de recherche et investir dans des équipements de recherche avancés et des infrastructures pour soutenir les objectifs stratégiques à long terme. Intégrer les priorités de recherche dans la mise à jour de la stratégie nationale de recherche et d'innovation et mettre en œuvre des

régimes de financement ciblés pour la R&D orientée vers des missions tout en renforçant la recherche fondamentale comme base de l'innovation et de la création de connaissances.

Déployer MeluXina-Q en tant qu'infrastructure nationale de calcul quantique pour permettre l'accélération de la recherche sur les algorithmes quantiques et forger des partenariats stratégiques pour encourager l'adoption par l'industrie. Se concentrer sur le développement de cas d'utilisation pratiques de la communication quantique de première génération, ainsi que sur la transition vers la PQC par une approche crypto-agile. Établir des hubs spécialisés en R&D quantique pour favoriser la collaboration interdisciplinaire et renforcer l'intégration internationale par une participation active aux initiatives quantiques européennes.

Phase 2 : Élargir l'écosystème (2027-2030)

Étendre les programmes de formation quantique pour soutenir le développement de la main-d'œuvre industrielle et la sensibilisation du public. Établir un réseau collaboratif national sous l'initiative *Quantum Factory*, intégrant des hubs de recherche quantique et des centres de services spécialisés pour accélérer l'adoption par l'industrie. Évaluer la création d'un centre d'excellence en QIST pour consolider les ressources, améliorer l'excellence de la recherche et accroître la visibilité mondiale du Luxembourg dans la recherche quantique.

Développer continuellement MeluXina-Q en une plateforme de calcul quantique de pointe qui offre un soutien durable à la recherche publique et à l'adoption industrielle précoce. Créer un écosystème de logiciels quantiques pour favoriser de nouvelles applications et outils, améliorer l'utilisabilité et l'accessibilité du calcul quantique. Avancer la démonstration des premiers réseaux de communication quantiques multi-utilisateurs avec un impact sociétal et économique, et soutenir le développement et la commercialisation des technologies quantiques (par exemple, les puces quantiques).

Phase 3 : Atteindre un impact commercial (2030 et au-delà)

Réaliser les premières percées commerciales dans le domaine de l'informatique quantique et de la communication quantique, intégrer les solutions quantiques dans le secteur industriel afin de stimuler les avancées en calcul, sécuriser les communications et innover en cryptographie. Positionner le Luxembourg comme un acteur clé de l'innovation quantique, attirer les investissements, les talents et les industries de haute technologie. Maintenir la compétitivité à long terme dans l'économie quantique mondiale, en veillant à ce que le Luxembourg reste à la pointe de la science et de la technologie quantiques, tout en maximisant ses bénéfices sociétaux et économiques.

Conclusion

En conclusion, la stratégie nationale quantique reflète l'engagement du gouvernement à poser les bases pour positionner le Luxembourg comme un acteur clé dans l'ère quantique. Cela repose sur des objectifs ambitieux dans les domaines clés de l'informatique quantique et de la communication quantique, des actions claires et ciblées à travers les six leviers stratégiques, et une approche intégrée par le développement du concept d'une *Quantum Factory*.

En favorisant un écosystème performant axé sur la création de valeur économique, l'amélioration des compétences et le développement d'une infrastructure

numérique de pointe, le Luxembourg se prépare à exploiter les technologies quantiques tout en renforçant sa souveraineté numérique.

Grâce à des partenariats solides entre le secteur public, le monde académique et l'industrie, le pays vise à transformer les avancées scientifiques en solutions pratiques et compétitives, contribuant ainsi au progrès technologique, à la sécurité numérique et à la croissance économique durable.

Éditeur

Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg
33, boulevard Roosevelt
L-2450 Luxembourg
Luxembourg

Auteur

Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg

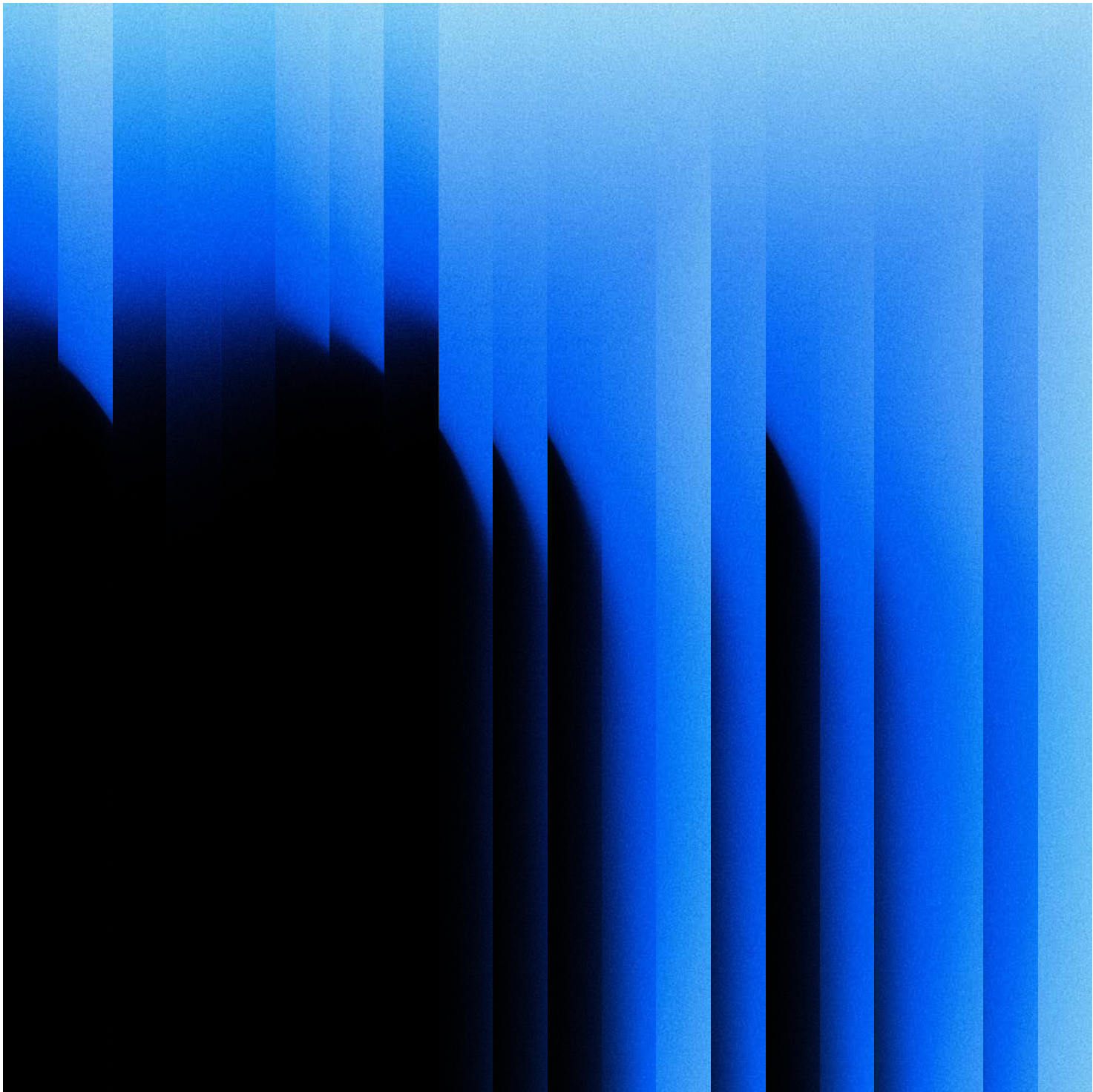
Layout

Cropmark

Impression

Imprimerie Reka

Mai 2025



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG