

Commission de l'Économie, des PME, de l'Énergie, de l'Espace et du Tourisme

Commission de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de la Digitalisation

Procès-verbal de la réunion du 5 juin 2025

Ordre du jour :

1. Stratégies nationales relatives à l'intelligence artificielle, aux technologies quantiques et aux données (demande *déi gréng*)

Uniquement pour les membres de la Commission de l'Economie, des PME, de l'Energie, de l'Espace et du Tourisme :

2. 8462 Projet de loi instituant un régime d'aides en faveur de la transition vers une économie à zéro émission nette
- Rapporteur: Madame Carole Hartmann
- Présentation et adoption d'un projet de rapport

*

Présents : Mme Diane Adehm, M. Guy Arendt, M. André Bauler, M. Jeff Boonen, M. Félix Eischen, M. Georges Engel, M. Franz Fayot, Mme Carole Hartmann, Mme Octavie Modert, M. Laurent Mosar, M. Tom Weidig, Mme Joëlle Welfring, membres de la Commission de l'Economie, des PME, de l'Energie, de l'Espace et du Tourisme

Mme Barbara Agostino, M. Guy Arendt, Mme Liz Braz, Mme Corinne Cahen, Mme Francine Closener, Mme Françoise Kemp, M. Ricardo Marques, Mme Octavie Modert, M. Ben Polidori, M. Jean-Paul Schaaf, M. Gérard Schockmel, M. Tom Weidig, Mme Joëlle Welfring, membres de la Commission de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de la Digitalisation

M. Lex Delles, Ministre de l'Economie, des PME, de l'Energie et du Tourisme (ci-après « Ministre de l'Economie »)

Mme Stéphanie Obertin, Ministre de la Digitalisation
Mme Elisabeth Margue, Ministre déléguée auprès du Premier ministre, chargée des Médias et de la Connectivité (ci-après « Ministre délégué auprès du Premier ministre »)

M. Christian Pauly, M. Jacques Thill, du Ministère de l'Economie
M. Gaston Schmit, du Ministère de la Digitalisation
M. Max Gindt, du Ministère d'Etat

M. Romain Martin, du Ministère de la Recherche et de l'Enseignement supérieur

M. Timon Oesch de l'Administration parlementaire

Excusés : M. Marc Baum, M. Patrick Goldschmidt, M. Claude Haagen, Mme Paulette Lenert, M. David Wagner, Mme Stéphanie Weydert, membres de la Commission de l'Economie, des PME, de l'Energie, de l'Espace et du Tourisme

M. Sven Clement, M. Marc Goergen, observateurs

M. Sven Clement, Mme Stéphanie Weydert, membres de la Commission de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de la Digitalisation

*

Présidence : Mme Carole Hartmann, Président de la Commission de l'Economie, des PME, de l'Energie, de l'Espace et du Tourisme

*

1. **Stratégies nationales relatives à l'intelligence artificielle, aux technologies quantiques et aux données (demande *déi gréng*)**

Madame le Président invite l'initiatrice de la demande sous rubrique, entrée le 2 avril 2025, à la motiver davantage.

Madame Joëlle Welfring concède que les stratégies nationales à discuter ont déjà été présentées au grand public lors d'une conférence de presse.¹ Or, sa sensibilité politique juge utile que le Parlement obtienne des explications plus en profondeur concernant ces trois stratégies et des réponses à une série de questions qui se posent en ce qui concerne leur mise en œuvre et notamment quant à leurs répercussions éventuelles et probables sur l'Etat et la société luxembourgeoise. On peut ainsi s'interroger sur leurs effets sur le marché du travail, les finances publiques et leur déploiement concret dans le temps.

Madame le Président invite Madame le Ministre délégué auprès du Premier ministre à fournir des explications plus générales concernant l'initiative stratégique numérique en question avant de détailler chaque stratégie particulière dans ce domaine.

Madame le Ministre délégué auprès du Premier ministre rappelle qu'en **juin 2024 cette initiative commune avait été annoncée** par Monsieur le Premier ministre lors de sa déclaration sur l'état de la Nation. L'oratrice souligne que tous les ministères ont été sollicités pour élaborer ces stratégies par l'intermédiaire d'un « comité interministériel de la politique numérique », dans le souci également que l'approche développée par l'Etat dans tous ces secteurs numériques soit cohérente. Les trois stratégies sont, en effet, étroitement liées. L'exploitation efficace des données digitales disponibles nécessite la technologie de l'intelligence artificielle et vice versa. Elle rappelle encore que le Premier ministre a annoncé vouloir investir environ 3 milliards d'euros jusqu'en 2030 dans le cadre de cette initiative stratégique dans

¹ Le 19 mai 2025, sous la devise « Accélérer la souveraineté numérique 2030 » par les trois ministres compétents.

l'objectif de renforcer la souveraineté du Grand-Duché dans le domaine numérique. L'oratrice résume brièvement l'intention des trois stratégies développées dont chacune a identifié un ou des projets phares. Ces projets, afin de tenir compte des ressources limitées du Luxembourg, se concentrent sur des domaines dans lesquels le Luxembourg a déjà acquis une certaine compétence.

Madame le Ministre délégué auprès du Premier ministre précise que pour les trois stratégies, la **gouvernance** sera assurée tant par le comité interministériel de la politique numérique que par le Haut Comité à la transformation numérique. L'idée est de disposer à chaque moment d'une vue d'ensemble sur les activités des différents ministères dans le numérique.

Tout en rappelant qu'en 2019 déjà le Grand-Duché s'était doté d'une vision stratégique en matière d'intelligence artificielle, Madame le Ministre enchaîne en présentant la **stratégie nationale en matière d'intelligence artificielle**, document stratégique qui tient compte de l'évolution technologique fulgurante qu'a connu le monde depuis. Pour cette présentation et aux fins du présent procès-verbal, il est renvoyé à ce document joint en annexe.²

Madame le Ministre de la Digitalisation poursuit en présentant la **stratégie du Luxembourg en matière de données**. Pour cette présentation et aux fins du présent procès-verbal, il est renvoyé au document afférent en annexe.³

Monsieur le Ministre de l'Economie enchaîne en présentant la **stratégie du Luxembourg en matière de technologies quantiques**. L'orateur souligne plus particulièrement, comme premier pas de mise en œuvre de cette stratégie gouvernementale, que le Grand-Duché a participé avec succès à l'appel à projets EuroHPC pour l'hébergement d'ordinateurs quantiques. Ce système informatique quantique, baptisé MeluXina-Q, devrait être mis en service l'année prochaine déjà. La structuration de ce projet est similaire à celui concernant le supercalculateur optimisé pour l'intelligence artificielle ainsi que l'exploitation d'une « AI Factory », déjà présenté en commission⁴.

Pour la suite de cette présentation et aux fins du présent procès-verbal, il est renvoyé au document afférent en annexe.⁵

Débat :

- Répondant à Madame Joëlle Welfring, Monsieur le Ministre de l'Economie confirme que le Gouvernement entend investir **3 milliards d'euros** dans le développement numérique,⁶ tel qu'esquissé par les trois stratégies présentées. Or, cet investissement global est projeté sur une période de six années et proviendra également d'acteurs privés. Cette dépense totale se répartit sur plusieurs volets pour inclure non seulement les infrastructures numériques à ériger, mais également les frais de fonctionnement des services afférents comme la « AI Factory » et la « Quantum Factory » et certains projets phares. Ainsi, environ 200 millions d'euros sont prévus pour les deux ordinateurs MeluXina-AI et

² Voir annexe 1.

³ Voir annexe 2.

⁴ Le 12 juin 2025, en Commission de l'Economie, des PME, de l'Energie, de l'Espace et du Tourisme (projet de loi n° 8518).

⁵ Voir annexe 3.

⁶ Annoncé le 13 mai 2025, par le Premier ministre dans la déclaration sur l'état de la Nation.

MeluXina-Q. Certains contrats y relatifs sont imputés à hauteur de 24 millions d'euros. 216 millions sont prévus pour des volets numériques à développer par le Centre des technologies de l'information de l'Etat. Le projet IRIS² compte pour 57,7 millions d'euros dans cette somme globale. Le financement de toute une série de projets de recherche appliquée dans ce domaine est également prévu. Seulement une petite partie de ces dépenses se retrouvera déjà dans le projet de budget de l'Etat pour l'exercice 2026 qui sera déposé en automne.

Monsieur le Ministre concède qu'il est important **d'accompagner activement les acteurs économiques** dans cette évolution informatique. Il s'agit d'une des missions des « factories » évoquées. Cette préoccupation explique également le choix de confier à Luxinnovation la gestion de ces « factories ». Beaucoup d'applications ou de solutions fondées sur l'intelligence artificielle existent déjà et ne doivent pas être développées *ab initio* par ou pour telle ou telle entreprise. Luxinnovation orientera les entreprises intéressées dans leurs démarches afférentes également en ce qui concerne d'éventuelles subventions prévues pour des projets de recherche appliquée dans ce domaine ;

- Répondant à Madame Joëlle Welfring, Madame le Ministre délégué auprès du Premier ministre précise que l'**approche consultative** évoquée a inclus de nombreux acteurs concernés comme la FEDIL et la Chambre de Commerce, mais surtout le Haut Comité à la transformation numérique qui comporte également des représentants des syndicats. L'oratrice estime donc que la consultation effectuée repose sur une base relativement large et que la stratégie présentée résulte d'un réel exercice participatif et de cocréation.

Pour ce qui est du « **upskilling** » ou du « reskilling » de la population active, Madame le Ministre délégué auprès du Premier ministre souligne que cet aspect fait partie intégrante de la stratégie IA. Il ne peut évidemment pas s'agir de former seulement quelques experts en intelligence artificielle. Ainsi, un cours gratuit, « Elements of AI », a été mis en place par l'Université du Luxembourg avec l'objectif de former un pour cent de la population en matière d'intelligence artificielle. Le Ministère du Travail a lancé un projet recourant à l'intelligence artificielle pour examiner avec les demandeurs d'emploi leurs compétences et dans quel domaine un « upskilling » est utile. Egalement l'Institut de Formation de l'Education Nationale a mis en place des formations afférentes à destination du personnel éducatif.

La stratégie présentée n'ignore pas les **risques** inhérents à l'intelligence artificielle, notamment en ce qui concerne la création et la diffusion de « désinformation ». L'ambition est de prévoir des garde-fous clairs. Une première pierre réglementaire a déjà été posée avec l'entrée en vigueur de l'« AI Act »,⁷ en été 2024, règlement européen directement applicable. Le projet de loi de mise en œuvre a été déposé à la Chambre des Députés en décembre 2024, notamment pour désigner les autorités nationales compétentes et les sanctions applicables.⁸ Au sein du Ministère d'Etat des réflexions plus générales sont en cours pour traiter la problématique évoquée de la

⁷ Règlement (UE) 2024/1689 du Parlement européen et du Conseil du 13 juin 2024 établissant des règles harmonisées concernant l'intelligence artificielle et modifiant les règlements (...)

⁸ Projet de loi n° 8476, déposé le 23 décembre 2024.

désinformation dans l'espace médiatique, comprise dans un sens large. Une série de mesures ou de réformes devraient permettre d'agir à l'avenir de manière ciblée contre des attaques de désinformation et Madame le Ministre renvoie plus concrètement à la réforme de la loi sur les médias électroniques ;

- Répondant à Madame Joëlle Welfring, Madame le Ministre de la Digitalisation précise que les centres de recherche s'orientent à la **stratégie nationale de la recherche et de l'innovation** et que cette feuille de route sera révisée pour l'aligner aux trois stratégies qui viennent d'être présentées. Cette révision aura lieu dans les prochains mois.

Quant aux **formations** professionnelles pour adultes, Madame le Ministre rappelle que le « Competence Centre » vient d'être intégré, avec effet au 1^{er} janvier 2025, à l'Université du Luxembourg. Celui-ci proposera des formations ciblées concernant ces nouvelles technologies digitales. L'objectif n'est pas de concevoir de nouveaux cursus clôturés par un diplôme « bachelor » ou « master », mais de créer une offre de formation flexible dans ces nouveaux domaines et qui se solderont par l'obtention d'un certificat afférent.

Concernant l'**énergie** consommée par les applications d'intelligence artificielle, Madame le Ministre rappelle que le Gouvernement a fait le choix de recourir à des centres de données ou de calcul qui s'alimentent en électricité provenant de sources renouvelables et qui veillent à des systèmes de réfrigération économes en eau. Il sera également veillé à renouveler régulièrement la « hardware » employée afin de garantir un fonctionnement le plus efficient possible. Cette attention portée à la durabilité caractérise également la gestion des données qui est gouvernée par le principe de la minimisation des données.⁹

Monsieur le Ministre de l'Economie ajoute que les deux nouveaux supercalculateurs évoqués seront installés sur le site de Bissen et rejoindront le supercalculateur MeluXina déjà en place. Ce site de LuxConnect ne s'approvisionne qu'en énergie dite « verte » et réutilise également la chaleur résiduelle des serveurs de ses centres de données. Le besoin en énergie de l'ordinateur quantique, MeluXina-Q, dont le noyau devra être extrêmement refroidi, sera encore une fois, avec environ 40 kilowattheure, nettement plus élevé que celui du supercalculateur existant, voire de MeluXina-AI.

Monsieur Tom Weidig intervient pour préciser que les supercalculateurs existants sont de loin plus énergivores que les calculateurs recourant aux propriétés quantiques de la matière. Concernant la technologie quantique et en renvoyant à d'autres Etats actifs dans ce domaine, l'intervenant doute de la pertinence de la stratégie présentée et recommande que le Luxembourg se concentre sur un aspect bien déterminé dans ce domaine comme le « quantum imaging », par exemple.

Notant qu'il s'est mal exprimé, Monsieur le Ministre confirme et souligne que les supercalculateurs quantiques ont une consommation

⁹ Stockage limité à ce qui est nécessaire.

énergétique « nettement moins élevée » que les supercalculateurs déjà en service.¹⁰

Concernant les objectifs du Luxembourg en matière **d'efficacité énergétique**, Monsieur le Ministre remarque qu'il est évident que la multiplication de centres de données dans le pays accroît le besoin en énergie et rend plus difficile d'atteindre lesdits objectifs, compte tenu du simple fait que ceux-ci ont été fixés par rapport à des chiffres absolus. D'un point de vue de la compétitivité économique du Luxembourg, il est toutefois crucial d'investir dans ces infrastructures digitales. Toujours est-il que dans maints secteurs économiques l'efficacité énergétique augmente et également les centres de données parviennent à employer l'énergie de plus en plus efficacement – l'orateur renvoyant à divers projets de réutilisation de la chaleur résiduelle produite par ces centres ;

- Répondant à Monsieur Ben Polidori, Madame la Ministre de la Digitalisation, renvoyant au projet de loi n° 8395, confirme qu'une **gouvernance unique** en matière de données est prévue. L'objectif est de fournir à la recherche intéressée par certaines données, dans quelque domaine que ce soit, un seul point de contact qui informera des démarches et de la procédure à respecter pour obtenir, le cas échéant, accès à ces données dans un environnement sécurisé. Un tel point de contact unique pour l'ensemble du pays saura constituer un avantage pour le Luxembourg. Ce point de contact sera constitué de spécialistes des domaines respectifs.

Madame la Ministre précise qu'il ne s'agira pas uniquement de sources dites « open data » qui sont visées. Il s'agira de gérer de manière générale l'accès à des données souvent très spécifiques, comme des données médicales, et complexes. L'accès à pareilles données n'est possible que dans le respect strict de certaines règles et conditions et dans une finalité bien déterminée.

- Répondant à Monsieur Ben Polidori, Monsieur le Ministre de l'Économie, renvoyant à l'« AI Act », donne à considérer que les **risques inhérents** à cette nouvelle technologie digitale sont connus et sont et seront encadrés. Monsieur le Ministre estime toutefois que le plus grand risque pour le Luxembourg serait de se refuser à cette technologie et de ne pas investir dans sa maîtrise – comme c'est l'ambition du Gouvernement avec la mise en place d'une « AI Factory » et d'une « Quantum Factory » ;
- Répondant à une question de Madame Françoise Kemp concernant la **qualité des données** mises à disposition, Madame la Ministre de la Digitalisation renvoie au « Luxembourg National Data Service » qui a pour charge de garantir la qualité de ces données numériques ;
- Répondant à Monsieur André Bauler, qui se montre préoccupé en termes de **sécurité des données** dans cette approche et structure centralisée telle qu'elle vient d'être présentée, Madame la Ministre de la Digitalisation tient à préciser que l'intention n'est pas de centraliser le stockage des données lui-même. L'objectif est d'introduire une seule gouvernance avec un point d'accès centralisé pour les bénéficiaires/réutilisateurs potentiels de ces données. La mission de ce

¹⁰ En raison de l'intervention que ladite affirmation a provoquée, le secrétaire a dû s'abstenir de corriger ce *lapsus* dès le départ.

point d'accès est d'accorder ou de refuser l'accès aux données sollicité par un acteur intéressé.

Uniquement pour les membres de la Commission de l'Economie, des PME, de l'Energie, de l'Espace et du Tourisme :

2. 8462 Projet de loi instituant un régime d'aides en faveur de la transition vers une économie à zéro émission nette

- Présentation et adoption d'un projet de rapport

Madame le Président-Rapporteur résume succinctement son projet de rapport, transmis au préalable aux membres de la commission. A la suite de son exposé, l'oratrice s'enquiert de questions ou d'observations qui s'imposeraient encore. Constatant que tel n'est pas le cas, elle décide de procéder au vote.

Vote :

Le projet de rapport est **adopté** à la majorité des membres présents de la commission – Madame Joëlle Welfring et Monsieur Tom Weidig s'abstenant.

Temps de parole :

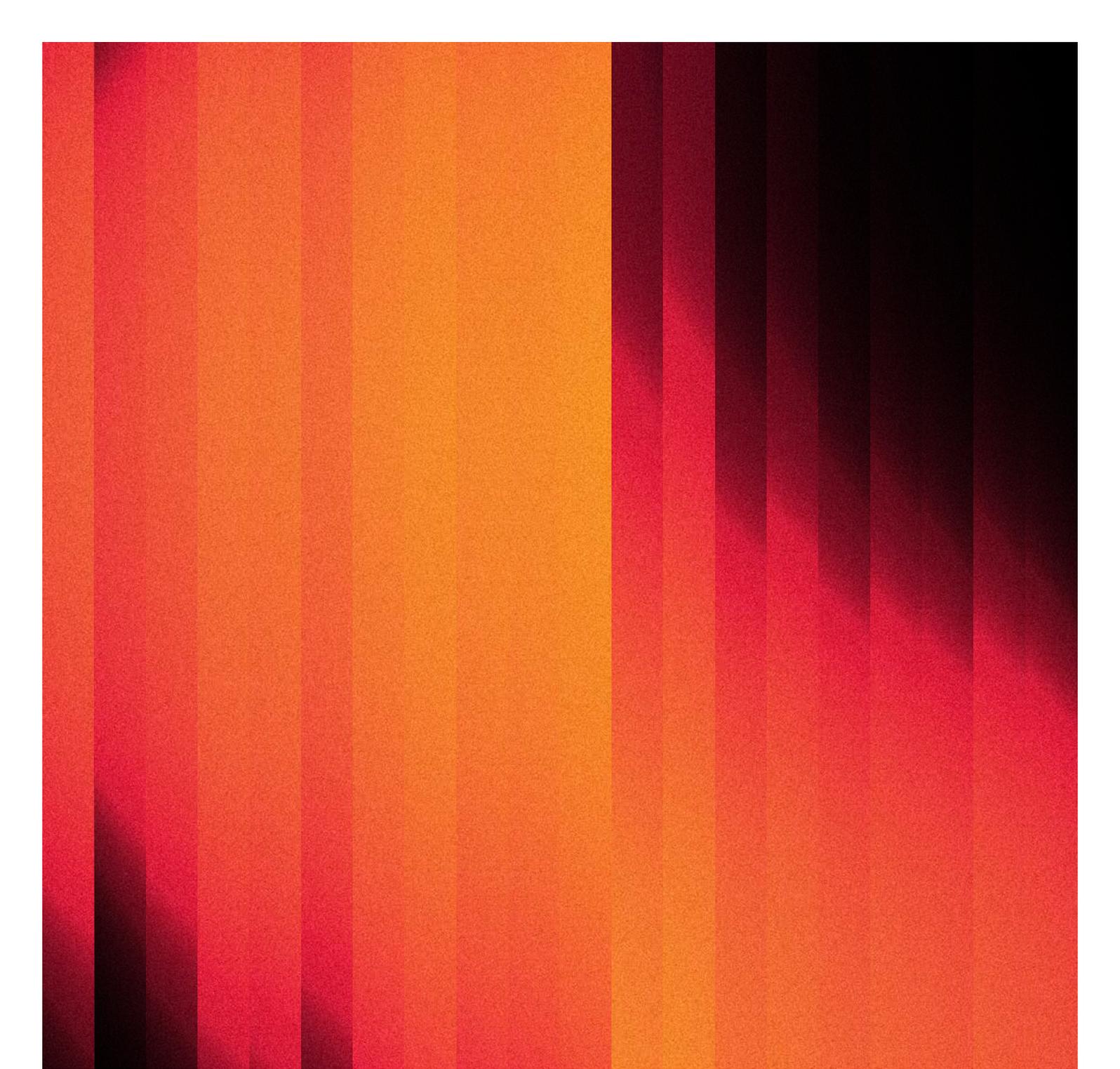
La suggestion de Madame le Président-Rapporteur, de prévoir un temps de parole en séance publique suivant le **modèle de base**, est acceptée.

Luxembourg, le 22 septembre 2025

Procès-verbal approuvé et certifié exact

Annexes :

- 1) La stratégie du Luxembourg en matière d'intelligence artificielle, 68 pp.;
- 2) La stratégie du Luxembourg en matière de données, 68 pp.;
- 3) La stratégie du Luxembourg en matière de technologies quantiques, 48 pp..

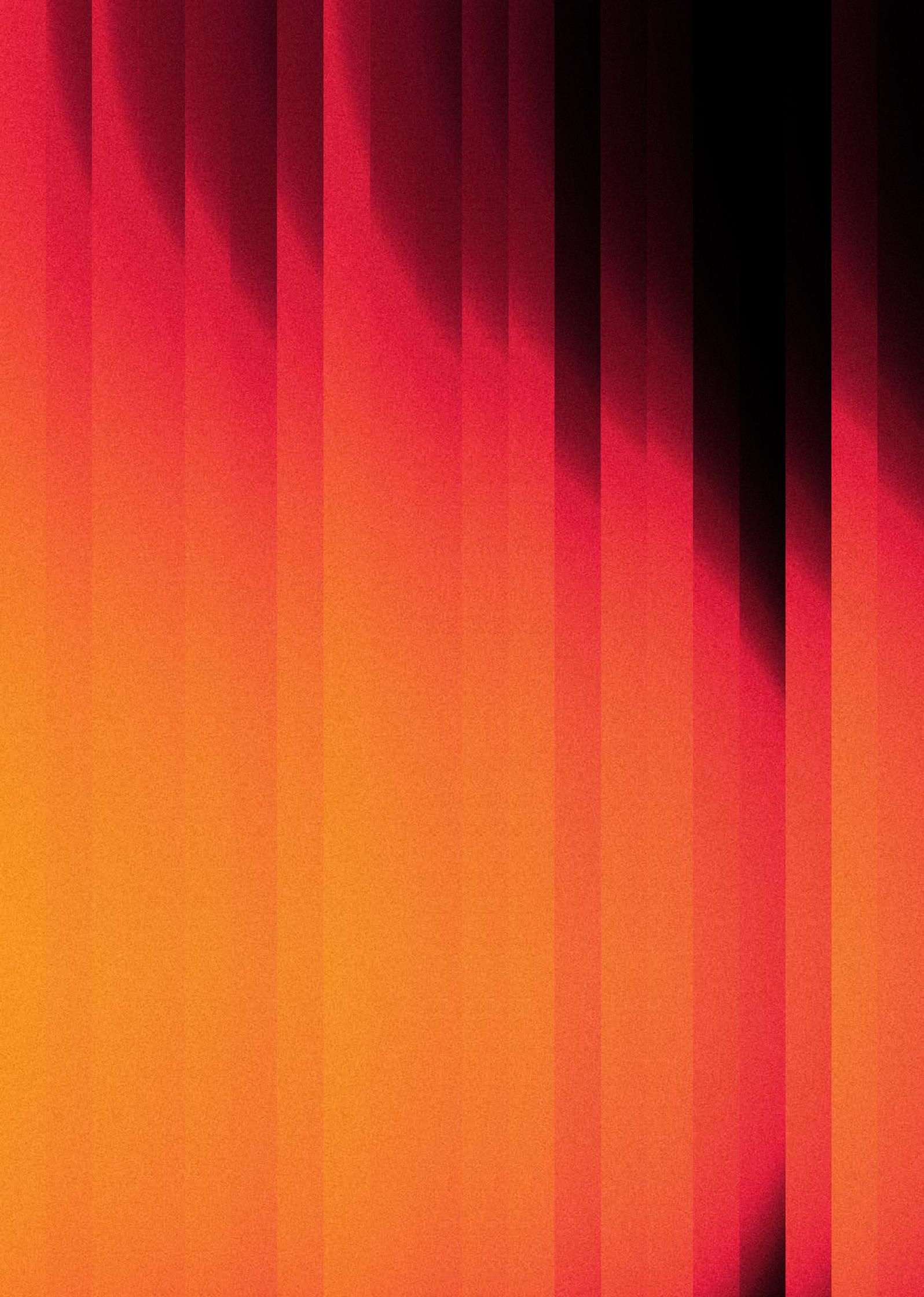


Accélérer la souveraineté numérique 2030

La stratégie du Luxembourg en matière d'intelligence artificielle



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG



Accélérer la souveraineté numérique 2030

La stratégie du Luxembourg en matière d'intelligence artificielle

Table des matières

Avant-propos _____ 06

L'ambition du Luxembourg en matière de données,
d'intelligence artificielle et de technologies quantiques _____ 08

Partie 1. Introduction _____ 16

1. Vision et valeurs _____ 16

2. L'écosystème actuel de l'IA _____ 18

3. Approche _____ 19

Partie 2. Leviers _____ 22

1. Talents et compétences _____ 23

2. Infrastructures _____ 28

3. Éventail de services _____ 30

4. Recherche, développement et innovation _____ 34

5. Gouvernance et réglementations _____ 36

6. Collaboration à l'international _____ 38

Partie 3. Secteurs à haut impact __ 40

Administration publique : promouvoir l'adoption de l'IA de confiance _____ 41

Finance : appliquer l'IA à travers l'écosystème _____ 43

Santé : rendre la médecine personnalisée une réalité à travers l'IA _____ 45

Culture : vecteurs d'intégration, de créativité et d'inclusion _____ 47

Partie 4. Projets phares _____ 50

Administration publique : Modèle linguistique juridique large du Luxembourg (4LM) _____	51
Finance : Le Centre d'expérience IA au sein du LHoFT _____	52
Médecine de précision : L'IA prête pour la médecine de précision _____	53
Marché du travail : Perspectives sur les compétences alimentées par l'IA _____	54
Éducation : Chatbot IA souverain pour soutenir les programmes éducatifs _____	55
Mobilité : Mouvement IA 1.0 _____	56
Cybersécurité : Démocratiser la cybersécurité _____	57
Énergie : Améliorer la transition énergétique du Luxembourg par l'intégration de données en temps quasi-réel _____	58
Sciences du climat : Jumeau numérique régional du changement climatique _____	59
Espace : Durabilité de l'espace _____	60
Patrimoine culturel : Un cadre stratégique pour l'intégration de l'IA dans le secteur culturel luxembourgeois _____	61

Partie 5. Conclusion _____ 62

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

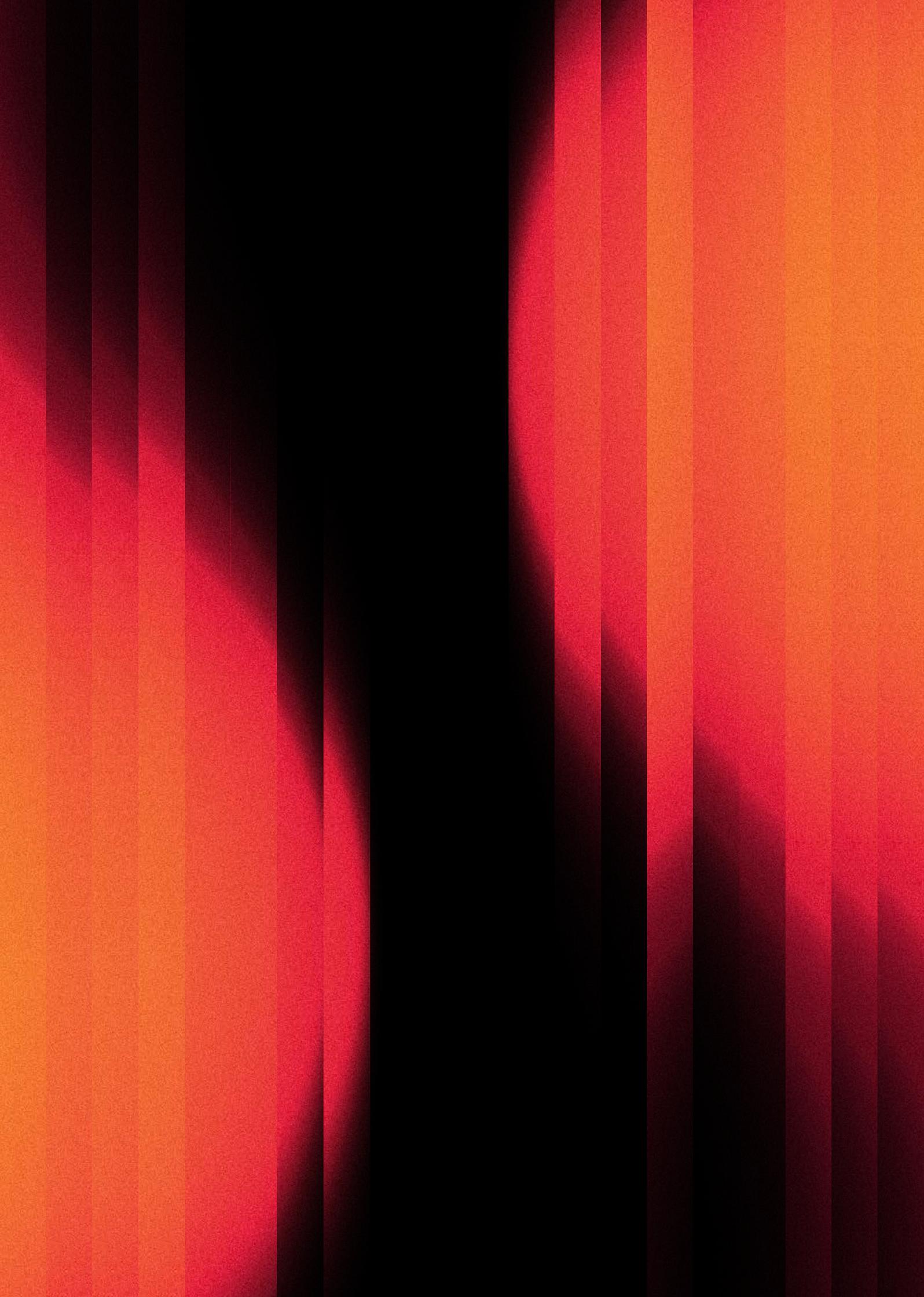
« Priorité à l'adoption concrète et utile – c'est le principe qui nous a guidé en fixant les actions en matière d'intelligence artificielle. Que ce soit à l'intérieur de l'administration publique ou des secteurs-clés comme la finance ou la santé. Chaque secteur, chaque entreprise et chaque personne aura 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.

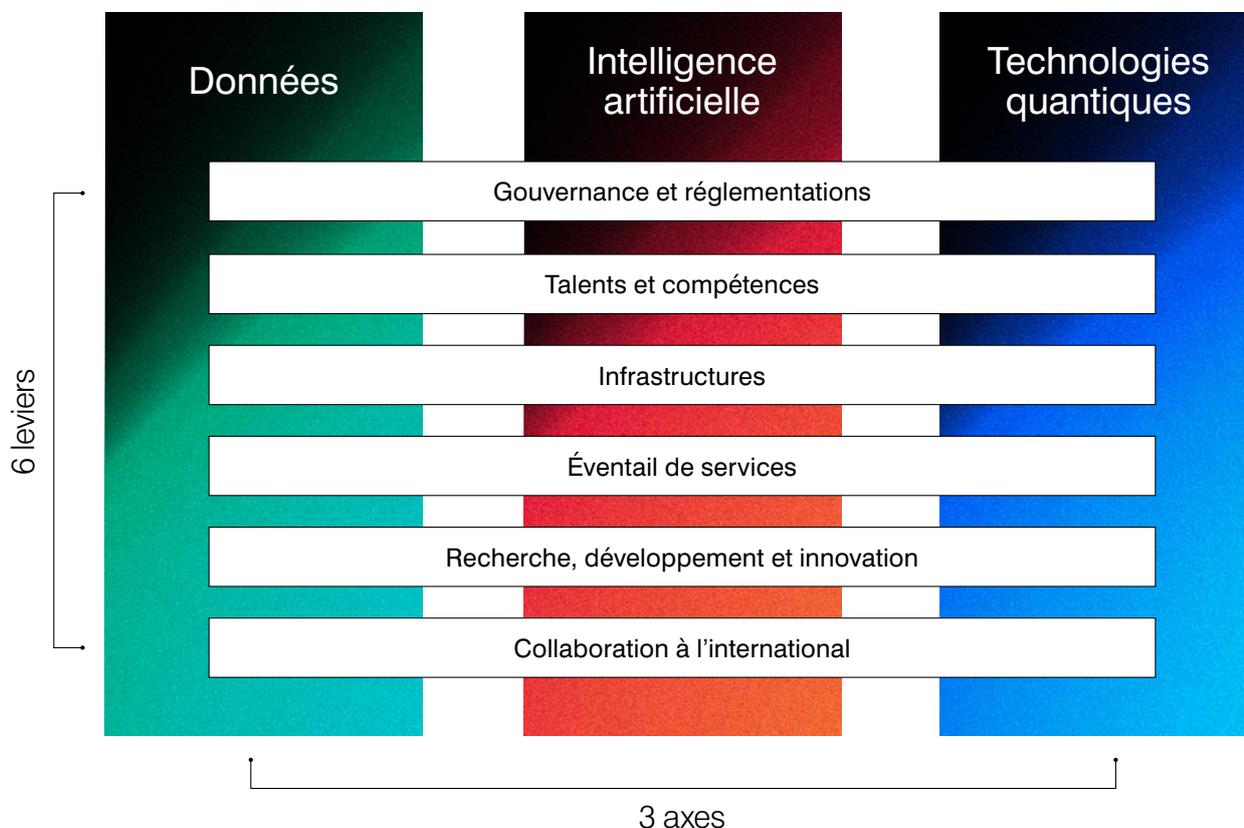
Ces stratégies visent à placer le Luxembourg à l'avant-garde d'un avenir où la technologie est un moteur essentiel de la croissance et du bien-être des citoyens, tout en assurant sa souveraineté numérique.

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.

Accélérer la souveraineté numérique 2030 : l'ambition du Luxembourg en matière de données, d'IA et des technologies quantiques



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

La stratégie du Luxembourg en matière d'intelligence artificielle

1. Vision et valeurs

Le Luxembourg ambitionne de devenir un hub d'innovation à forte influence européenne et internationale dans le domaine de l'IA centrée sur l'humain. Le Luxembourg souhaite démontrer comment l'IA peut bénéficier à ses citoyens et à ses entreprises, atteindre ses ambitions écologiques et partager ses expériences dans un esprit de coopération internationale. Pour y parvenir, le Grand-Duché s'engage à créer un écosystème de l'IA de confiance, cohérent, inclusif et collaboratif, impliquant les secteurs public, privé et de la recherche. Cette ambition repose sur les valeurs d'ouverture, de dynamisme et de fiabilité qui caractérisent le Luxembourg.

Un écosystème de l'IA prospère et constructif devrait intégrer les éléments suivants :

1. Une IA centrée sur l'humain

Placer l'humain au cœur de l'innovation en garantissant que les avancées technologiques améliorent concrètement la qualité de vie des citoyens.

2. Une administration publique efficace et proactive

Optimiser l'administration publique en favorisant des processus intelligents et efficaces, ainsi que des services publics personnalisés et inclusifs.

3. Une compétitivité renforcée des entreprises

Encourager l'adoption des technologies de l'IA dans l'ensemble de l'économie en continuant à déployer des infrastructures de pointe et renforcer un écosystème de compétences.

4. Une recherche d'envergure internationale qui attire et développe les talents

Créer un écosystème de recherche où (1) l'IA est à la fois transversale et interdisciplinaire, (2) stimule l'innovation et (3) attire et développe des talents nationaux et internationaux.

Le Luxembourg est envisagé comme un terreau fertile de l'IA qui cultive des applications responsables de l'IA adaptées aux besoins et priorités locaux. En consolidant la position du Luxembourg en tant que leader de l'IA responsable, cette démarche permettra d'exploiter cette technologie pour construire un avenir plus durable et inclusif.

La stratégie du Luxembourg en matière d'IA est guidée par les recommandations de l'OCDE¹ à l'intention des gouvernements, ainsi que par l'initiative précédente de 2019, « **Vision stratégique du Luxembourg pour l'IA** », qui a servi de point de départ dans ce processus. Une action clé de la vision de 2019 a été la **consultation publique représentative sur l'attitude des citoyens vis-à-vis de l'IA**, produite en 2021, dont les résultats ont également été pris en compte dans le processus stratégique.

Le Luxembourg veut devenir un hub d'innovation en IA centrée sur l'humain, fondé sur la confiance, la compétitivité, la collaboration et l'impact sociétal.

¹ OECD, Principes de l'IA, 2019

2. L'écosystème actuel de l'IA

Un aperçu de l'IA au Luxembourg

Cartographie de l'écosystème de l'IA

Luxinnovation, l'agence nationale de l'innovation, a réalisé en 2024 un projet de cartographie de l'IA qui a permis de dresser un inventaire de l'écosystème de l'IA au Luxembourg.



568 entités composent l'écosystème économique de l'IA au Luxembourg, positionnées tout au long de la chaîne de valeur de l'IA.

Investisseurs et incubateurs privés

Organisations et fonds pouvant fournir des capitaux, des ressources, un mentorat et un soutien aux start-ups, aux entreprises technologiques et aux projets de l'IA.

Fournisseurs de solutions technologiques de l'IA

Ces entreprises créent les modèles, algorithmes et systèmes de l'IA fondamentaux qui pilotent les fonctionnalités intelligentes dans diverses applications et industries.

Communautés de l'IA (conseil, universités et recherche)

Sociétés de conseil et organismes d'étude et de recherche qui permettent l'utilisation des technologies d'IA et soutiennent leur adoption par les utilisateurs finaux.

IA : entreprises, développeurs, start-up/PME

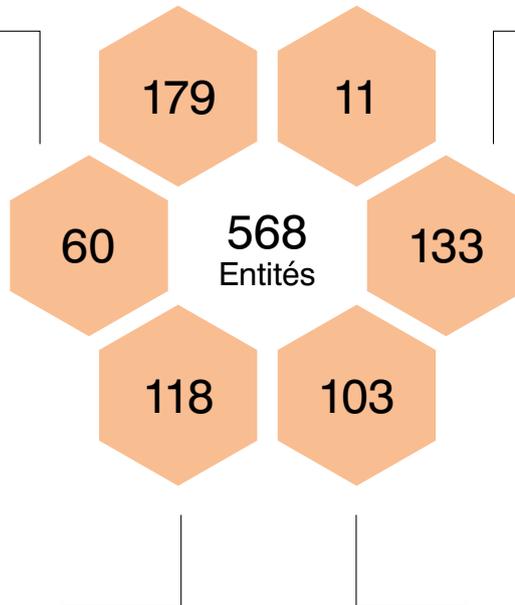
Ces fournisseurs utilisent les technologies de l'IA existantes pour développer, personnaliser et déployer des applications, des outils et des services basés sur l'IA pour les entreprises et les industries.

Utilisateurs de l'IA (adoptants précoces)

Organisations publiques et privées qui utilisent ou prévoient d'utiliser des technologies et des solutions d'IA pour accomplir des tâches, améliorer des processus et prendre des décisions avisées au sein de leur organisation.

Fournisseurs de données potentiels

Ces fournisseurs proposent des données brutes ou traitées qui peuvent être utilisées pour améliorer les performances et la précision des algorithmes de l'IA.



Le champ d'application de la cartographie de l'IA au Luxembourg a été défini conformément au « Call for the selection of Hosting Entities for acquiring or upgrading EuroHPC systems with AI capabilities and establishment of associated AI Factories » (Appel à candidatures pour la sélection d'entités d'hébergement en vue de l'acquisition ou de la mise à niveau de systèmes EuroHPC dotés de capacités d'IA et de la création de fabriques d'IA associées). Pour plus d'informations, veuillez visiter le Knowledge Hub de Luxinnovation.

N.B. : Certaines entités peuvent être classées dans plusieurs catégories, le cas échéant.

Cartographie de l'écosystème luxembourgeois de l'IA (en septembre 2024)

3. Approche

L'IA au service du bien-être sociétal

La population luxembourgeoise intègre déjà l'IA dans ses tâches quotidiennes, grâce à une connectivité généralisée, de solides compétences numériques, des initiatives d'inclusion numérique, un engagement citoyen actif et un haut niveau de confiance dans le gouvernement². Les entreprises locales adoptent et investissent activement dans des solutions de l'IA. Bien que le public soit favorable à son adoption, il est de plus en plus conscient des risques associés, tels que les partis-pris (« biais »), la désinformation et les impacts environnementaux. L'IA a le potentiel de devenir un allié précieux, mais à condition d'être alignée sur des principes éthiques et des cadres réglementaires visant à minimiser les risques et à maximiser les bénéfices.

L'approche est définie par les principes suivants :

Priorité à l'humain

L'ambition est que toute solution de l'IA développée dans le pays (1) respecte les normes et réglementations, (2) évite de perpétuer les inégalités existantes et (3) mette l'accent sur les valeurs d'une IA digne de confiance, telles que l'équité, la responsabilité et la confidentialité. Pour garantir une sécurité optimale, le Luxembourg s'est associé à d'autres États membres de l'UE pour mettre en place des installations d'essai et d'expérimentation, permettant aux développeurs de l'IA d'identifier et de réduire les risques avant le déploiement. En septembre 2024, l'Institut luxembourgeois de la normalisation, de l'accréditation, de la sécurité et de la qualité des produits et services (ILNAS) a lancé une Commission nationale de normalisation dans le domaine de l'IA (ILNAS/NSC 04³), qui contribue à la normalisation mondiale de l'IA. Elle aborde les exigences techniques d'interopérabilité et de compatibilité, tout en améliorant la qualité, la sécurité et la confiance dans les systèmes de l'IA. Un autre exemple des efforts du Luxembourg pour garantir une utilisation responsable de l'IA est sa position sur les systèmes d'armements autonomes, étant donné que le domaine de la défense est moins réglementé que le domaine civil. Grâce à ces efforts et à bien d'autres, une évaluation continue des applications de l'IA s'effectue en fonction de la valeur qu'elles apportent à la société.

Utilisation durable de l'énergie

Le Luxembourg s'engage à s'aligner à l'UE et l'ONU pour promouvoir l'utilisation responsable et durable de l'IA par les entreprises et les citoyens, à exploiter tout son potentiel pour soutenir la transition énergétique au Luxembourg et pour rendre l'approvisionnement en énergie plus fiable et plus abordable. Ainsi, l'IA jouera un rôle central dans la mise en œuvre du Plan national intégré en matière de l'énergie et du climat (PNEC⁴) du Luxembourg. De plus, l'IA fait partie de plusieurs initiatives à l'intersection de l'énergie et de la numérisation, comme la Décennie numérique du Luxembourg et un centre national d'excellence en recherche. L'importance de l'IA pour le secteur de l'énergie est encore soulignée par un projet phare dédié à cet objectif.

L'IA jouera un rôle crucial dans la mise en œuvre et le succès de ces initiatives. Cependant, sans une approche sécurisée et réfléchie du déploiement de l'IA, l'impact énergétique – et ses conséquences environnementales - de l'utilisation inadaptée ou excessive de l'IA pour diverses tâches risquera d'être conséquent : des stratégies à long terme sont nécessaires pour équilibrer les besoins énergétiques avec la durabilité tout en améliorant l'efficacité des modèles de l'IA.

² Statec, Confiance dans les institutions, la démocratie et les statistiques officielles, (n°10) 10/2023

³ Portail-Qualité, Artificial Intelligence and Big Data, Normes et Normalisation, 12/2024

⁴ Gouvernement Luxembourgeois, Plan national intégré en matière d'énergie et de climat du Luxembourg pour la période 2021-2030 (PNEC)

Discours démocratique

L'IA est devenue un outil puissant pour influencer le discours démocratique. Elle offre la possibilité d'améliorer le processus démocratique en aidant les citoyens à mieux comprendre la politique et à participer activement aux discussions politiques. Cependant, elle présente également des risques, tels que la diffusion de fausses informations et la manipulation de l'opinion publique.

Les médias, garants indispensables et essentiels de la démocratie, font face à des défis particulièrement complexes. Bien que les systèmes d'IA promettent de révolutionner la manière dont les journalistes exploitent les données et produisent du contenu, ils risquent également de nuire à l'indépendance éditoriale et à la qualité. Par exemple, en l'absence d'informations équilibrées et vérifiées, l'IA pourrait renforcer des bulles politiques. De plus, il est devenu de plus en plus difficile de distinguer les contenus créés par des journalistes de ceux générés par l'IA. Cela inclut notamment les *deepfakes*⁵ politiques, qui figurent parmi les utilisations abusives les plus répandues de l'IA et soulèvent des questions éthiques majeures, menaçant ainsi le débat démocratique. Les régulateurs doivent veiller au respect des normes éthiques, quelle que soit l'origine du contenu. La surveillance humaine et la transparence dans les salles de rédaction, telles que l'étiquetage des articles générés par l'IA comme prévu par le règlement européen sur l'intelligence artificielle⁶ « AI Act », seront essentielles pour la confiance du public. La réglementation luxembourgeoise permettra de préserver l'intégrité de l'information et de maintenir la confiance du public dans ses médias et ses institutions gouvernementales. Ainsi, la Convention entre l'État et le Média de service public 100,7 oblige ce dernier à garantir que les algorithmes reflètent le cas échéant les valeurs du service public et favorisent la découverte de contenus. Par ailleurs, le régime d'aides au journalisme professionnel constitue un pilier stratégique du débat démocratique. En soutenant un paysage médiatique pluraliste, indépendant et professionnel, il permet de renforcer la résilience de l'espace public face aux dérives informationnelles liées à l'IA, et assure aux citoyens un accès durable à une information fiable, diversifiée et de qualité.

Agilité

La capacité à s'adapter rapidement à l'évolution des demandes du marché, des chaînes de valeur et des avancées technologiques est au cœur de l'approche adoptée par le Luxembourg. Pour maintenir cette agilité, les pratiques d'achat public doivent adopter une approche prospective, en privilégiant la flexibilité par rapport aux contrats à durée indéterminée pour des besoins en IA trop spécifiques ou à court terme. Au lieu de s'engager sur le long terme pour l'offre technologique actuelle en matière de l'IA, l'administration publique du Luxembourg devrait privilégier des accords adaptables qui permettent de réagir rapidement aux évolutions technologiques de l'IA. L'agilité inclut également des processus plus rationalisés et une efficacité accrue pour favoriser un environnement propice à l'innovation en IA.

Modèles open-source

Les modèles de l'IA open-source peuvent offrir des avantages significatifs, notamment la transparence, des progrès plus rapides et un contrôle décentralisé. L'Open-Source Initiative (OSI) a défini les modèles de l'IA open-source comme des systèmes qui peuvent être librement utilisés, étudiés, modifiés et partagés, y compris la transparence des données d'entraînement, du code source et, de manière cruciale : les poids du modèle⁷. Les véritables modèles open-source offrent un accès complet à tous les aspects nécessaires pour comprendre et reproduire le modèle. Le Luxembourg continuera à valoriser à la fois les modèles open-source et closed-source, tout en se concentrant sur la manière de traiter les risques et les opportunités de ces modèles sous les perspectives juridiques et de gouvernance. Les entités publiques, y compris les organisations de recherche, sont encouragées à privilégier l'utilisation de modèles de l'IA open-source dans la mesure du possible.

⁵ Financial Times, Political deepfakes top list of malicious AI use, DeepMind finds, 06/2024

⁶ Règlement (UE) 2024/1689 du Parlement européen et du Conseil du 13 juin 2024 établissant des règles harmonisées sur l'IA et modifiant les règlements (CE) n° 300/2008, (UE) n° 167/2013, (UE) n° 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1139 et (UE) 2019/2144, ainsi que les directives 2014/90/UE, (UE) 2016/797 et (UE) 2020/1828.

Art. 50 : Les utilisateurs d'un système de l'IA générant ou manipulant des textes publiés dans le but d'informer le public sur des questions d'intérêt public doivent indiquer que le texte a été généré ou manipulé par de l'IA. Cette obligation ne s'applique pas lorsque l'utilisation est autorisée par la loi pour les fins de prévention, détection, enquête ou poursuites pour des infractions pénales, ou lorsque le contenu généré par de l'IA a été soumis à un processus de révision humaine ou de contrôle éditorial et qu'une personne physique ou morale assume la responsabilité éditoriale de la publication du contenu.

⁷ Open-Source Initiative, The Open-Source AI Definition – 1.0

Fiabilité

L'IA fiable, en particulier l'IA explicable, est fondamentale pour garantir la transparence, la robustesse et la responsabilité des systèmes de l'IA. Lors de l'adoption de nouvelles technologies, il est crucial de prendre en compte les droits de propriété intellectuelle, la protection des données, la cybersécurité et l'éthique. Ces aspects doivent être intégrés dès la conception pour que l'adoption à long terme de l'IA réussisse dans l'économie. Cela inclut le respect du consensus émergent sur les normes et réglementations pour une IA fiable. Le but est de contribuer aux efforts européens plus larges pour développer des solutions d'IA dignes de confiance.

Souveraineté

Le Luxembourg ambitionne de se positionner comme une plateforme européenne majeure pour le développement responsable d'une IA souveraine. Cette approche reflète l'importance géopolitique croissante du développement de capacités de l'IA indépendantes en Europe, tout en mettant l'accent sur les considérations éthiques et les pratiques de déploiement sécurisées. Enfin, les projets phares consacrés à l'IA serviront de démonstrations tangibles des capacités souveraines du Luxembourg et contribueront aux efforts européens plus larges visant à développer des solutions de l'IA souveraines.

Le Luxembourg mise sur une IA souveraine, transparente et éthique pour soutenir la démocratie et garantir la fiabilité de l'information.

Partie 2.

Leviers

Aborder l'IA sous tous ses aspects

La deuxième partie de cette stratégie décrit les leviers essentiels pour assurer le succès de l'IA au Luxembourg. Chaque facteur joue un rôle central dans le renforcement de l'écosystème de l'IA, avec des ambitions et des actions distinctes visant à promouvoir l'innovation et la croissance. L'accent est mis sur la création d'un environnement dynamique où l'IA peut prospérer, débloquent de nouvelles opportunités et générant une valeur durable pour les entreprises et la société dans son ensemble.

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

1. Talents et compétences

Cultiver l'expertise pour un avenir prometteur

Le Luxembourg se donne pour ambition de renforcer la capacité nationale à tirer parti de l'IA. Pour y parvenir, l'objectif est de cultiver les compétences en IA à tous les niveaux de la société. Cela implique la mise en œuvre d'approches adaptées aux profils de compétences ciblés.

Trois profils de compétences clés ont été identifiés :

1. **Excellence en IA** : Ce groupe est composé de créateurs de l'IA ayant une connaissance technique approfondie et une grande créativité. Ils conçoivent des algorithmes, entraînent et affinent des modèles, construisent des pipelines de l'IA et intègrent ces modèles dans des produits et services. Ils sont les principaux innovateurs en IA. Il est crucial de leur donner accès à l'infrastructure adéquate, à une formation technique spécialisée et à un soutien continu pour développer des solutions de pointe et des outils de l'IA impactantes. De plus, ils doivent être pleinement conscients des considérations éthiques associées.
2. **Praticiens de l'IA** : Ces professionnels maîtrisent les technologies de l'IA, mettent en œuvre et maintiennent des modèles et systèmes de l'IA dans

leurs domaines, même s'ils ne construisent pas eux-mêmes les solutions. Cette catégorie inclut les analystes commerciaux, les développeurs commerciaux, les chefs de projet, les équipes de support informatique, les intégrateurs informatiques, les experts juridiques et éthiques, et bien d'autres. Il est important qu'ils aient accès à une formation en IA spécifique à leur domaine d'expertise, à une formation de sensibilisation et à des opportunités d'échange entre pairs.

3. **Utilisateurs de l'IA** : Ce groupe comprend des professionnels non techniques dans divers secteurs qui utilisent des applications et solutions de l'IA préconstruites (par exemple, des outils d'aide à la décision, des *chatbots*, des analyses prédictives) pour améliorer la productivité et les résultats. Il est important qu'ils sachent utiliser l'IA correctement pour maximiser ses avantages et garantir une utilisation responsable. Cela inclut une formation de base sur les fonctionnalités de l'IA, les meilleures pratiques pour utiliser les outils de l'IA, et une sensibilisation aux implications juridiques, éthiques et de sécurité de l'IA.

Ambition : Développer l'excellence en IA

Le développement de l'innovation en IA et le déploiement responsable nécessitent une expertise hautement spécialisée qui va au-delà des compétences techniques et numériques générales. Les contributions des créateurs de l'IA—experts en apprentissage automatique, éthique des algorithmes, gouvernance des données et conception centrée sur l'humain—sont essentielles pour développer et affiner les modèles, construire des pipelines de l'IA, et l'intégrer dans des applications réelles.

En combinant des politiques ciblées d'attraction de talents, une coopération solide entre la recherche et l'industrie, et une infrastructure IA de pointe, le Luxembourg renforce sa position en tant que moteur clé du développement et de l'innovation en IA.

Les mesures législatives récentes incluent la simplification du processus de la Carte Bleue européenne, la facilitation des permis de travail post-diplôme pour les chercheurs non européens, et l'octroi aux membres de la famille des ressortissants de pays tiers d'un accès illimité au marché du travail. Ces initiatives favorisent un environnement accueillant pour les meilleurs professionnels de l'IA et renforcent l'écosystème de l'IA au Luxembourg.

Ambition : Outiller les praticiens de l'IA

La stratégie du Luxembourg pour **cultiver les praticiens de l'IA** est fait en deux façons : renforcer le pipeline de talents grâce à des programmes académiques et combler les lacunes de compétences immédiates par des initiatives de montée en compétences (« *upskilling* ») et de requalification des compétences (« *reskilling* »). Les initiatives suivantes sont au cœur de cette stratégie :

- **Programme structuré d'apprentissage en IA** avec le Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST): Projets de recherche collaborative en IA que le LIST mène avec des PME qui ne peuvent pas affecter de personnel à de longs programmes de formation formelle. Cela aboutit à l'*upskilling* des professionnels en milieu de carrière en experts en IA, praticiens de l'IA axés sur les domaines et leaders d'entreprise avertis en IA grâce à une combinaison de formation, d'apprentissage sur le tas et de mentorat, stimulant ainsi l'innovation en IA parmi les PME.
- **Sessions de formation pratique en HPC** avec LuxProvide, le centre national de supercalculateur du Luxembourg, et le Digital Learning Hub : Solutions de formation pratique pour doter

les praticiens des compétences techniques et opérationnelles nécessaires au déploiement de l'IA.

- **Cours de littératie des données** avec le LNDS et avec l'Institut National d'Administration Publique (INAP) pour le secteur public.
- **Plateforme de formation continue AI4All** : Combine des cours en ligne ouverts et massifs (MOOCs) hébergés au Centre de Compétence de l'Université avec des formations et ateliers en présentiel offerts par des institutions partenaires de formation, telles que le Digital Learning Hub, la House of Training, le LIST, des partenaires industriels, etc., fournissant aux participants des compétences théoriques et pratiques en IA.
- **Une offre étendue de formation continue en compétences IA** : Développement des cours modulaires pour permettre aux participants de construire progressivement une expertise.

Cette formation continue renforcera l'engagement du Luxembourg envers une éducation en IA personnalisée et de haute qualité. Développés dans le cadre du programme AI4All, ces cours adaptables peuvent également être appliqués à d'autres domaines technologiques.

Bien que l'accent soit mis ici sur les praticiens de l'IA ayant une expertise technique, il convient de reconnaître le rôle tout aussi important des professionnels ayant des compétences complémentaires (gouvernance de l'IA, cybersécurité ou gestion de projet) qui assurent un déploiement responsable et un alignement avec les objectifs organisationnels.

Ambition : Expertise et engagement en IA dans l'enseignement supérieur

La stratégie globale de l'Université du Luxembourg en matière de talents vise à attirer, développer et retenir des experts et professionnels de haut calibre en IA. Elle propose des salaires compétitifs, des installations de recherche à la pointe de la technologie, des opportunités de collaboration interdisciplinaire et de soutien à la recherche.

> Action 1 : Étendre l'intégration de l'IA dans l'enseignement supérieur

Pour doter les étudiants de l'Université du Luxembourg de compétences de pointe, le corps enseignant mettra continuellement à jour **le programme d'études en IA** pour refléter les dernières tendances de l'industrie et les avancées technologiques. Cette approche englobe tous les cycles d'enseignement, Licence, Master et Doctorat, conformément à la **stratégie globale de l'Université en matière de talents**.

- **Master en informatique et sciences de l'information** : Offre une spécialisation en IA qui enseigne aux étudiants à utiliser des approches et outils de pointe pour évaluer de grandes quantités de données ; explorer et extraire des connaissances à partir d'ensembles d'informations grands et/ou complexes ; mettre en œuvre et appliquer des méthodes d'apprentissage automatique pour résoudre des problèmes courants en IA ; utiliser la logique pour formaliser les connaissances et présenter des raisonnements, en particulier dans les systèmes multi-agents et les contextes déontiques.
- **Master en science des données ; Master en calcul haute performance ; et Master en cybersécurité et cyberdéfense** offrent une variété de cours sur l'apprentissage automatique, l'apprentissage profond et le traitement du langage naturel.
- De plus, l'Université du Luxembourg et l'ILNAS proposent le **Master en Technopreneurship (MTECH)** pour doter les professionnels de compétences en normalisation de l'IA, technologies intelligentes et fiabilité—combinant des projets industriels pratiques avec une collaboration étroite entre le monde académique, la recherche et les communautés de normalisation technique.

Les lycées luxembourgeois proposent de nombreux programmes de BTS (Brevet de technicien supérieur) : des cours post-secondaires de deux ans valant 120 ECTS. Cela inclut déjà un programme de **BTS en Intelligence Artificielle Appliquée** qui forme les étudiants à l'utilisation, la conception et l'entraînement de modèles de l'IA à travers des approches théoriques et pratiques.

En plus de son orientation technique, l'**Institut d'éthique numérique de l'Université du Luxembourg (ULIDE)** vise à encourager et soutenir les facultés dans l'intégration des principes clés de l'éthique des risques, de l'équité, de la transparence et de la durabilité dans les cours liés à l'IA, en dotant les étudiants des compétences nécessaires pour aborder les implications sociétales de l'IA, telles que les fausses nouvelles, les biais algorithmiques et l'inclusivité dans les applications de l'IA.

› Action 2 : Mise en œuvre de l'initiative « AI Sphere »

L'Université du Luxembourg étend ses efforts de collaboration scientifique avec l'initiative « AI Sphere », qui crée un pont entre le monde académique, l'industrie et la société. Elle enrichit l'apprentissage académique par des applications pratiques, des collaborations industrielles et un engagement interactif. Elle connecte les talents en IA avec l'industrie et la société à travers des espaces de création, des hackathons et des projets

de l'IA réels. Cela permet aux entreprises de s'engager avec des talents qualifiés, de développer des solutions de l'IA et de recruter de futurs employés.

Les étudiants et les chercheurs acquièrent une expérience pratique en IA, une exposition à l'industrie et des opportunités de stages et de partenariats de recherche. L'initiative « AI Sphere » promeut la diversité de genre dans les sciences, notamment en s'appuyant sur la campagne annuelle « Women & Girls in Science », qui vise à encourager la participation des femmes et des filles dans les domaines STEM.

L'initiative « AI Sphere » complète les programmes de compétences en IA existants et formels, tels que AI4ALL de la Luxembourg AI Factory. Alors que l'Université du Luxembourg renforce son rôle de centre d'éducation, d'innovation et de collaboration industrielle en IA, elle fournit aux décideurs des informations précieuses pour façonner l'économie numérique du Luxembourg.

Ambition : Étudiants et enseignants prêts pour un avenir piloté par l'IA

La maîtrise de l'IA devient une compétence essentielle pour les étudiants et les enseignants. Les outils basés sur l'IA font déjà partie de la vie scolaire quotidienne—personnalisant l'apprentissage, améliorant les processus d'évaluation et permettant des retours rapides. Ces outils peuvent favoriser la créativité, la collaboration et la pensée critique, tout en rationalisant les tâches administratives. Cependant, pour réaliser ces avantages, il faut des stratégies globales qui permettent aux étudiants et aux enseignants d'utiliser l'IA de manière responsable, critique, créative et efficace.

› Action 3 : Intégration responsable, prospective et inclusive de l'IA dans l'éducation

Le Grand-Duché vise à préparer les étudiants et les éducateurs à la vie et au travail dans un monde où l'IA sera de plus en plus répandue, en promouvant la maîtrise de l'IA et des données à tous les niveaux d'éducation. Le concept d'intelligence augmentée est au cœur de la stratégie actuelle du ministère de l'Éducation nationale : une collaboration humain-IA qui améliore l'enseignement et l'apprentissage, soutient le bien-être et maintient l'agence humaine au centre. L'objectif est de créer une culture de l'IA réfléchie et critique qui maximise les opportunités tout en abordant les risques.

- **Des formations ciblées et des programmes de développement professionnel** équiperont les enseignants et les chefs d'établissement scolaire avec les compétences nécessaires pour intégrer l'IA en toute confiance. Une **plateforme**

nationale de l'IA fournira aux écoles des outils conformes au règlement général sur la protection des données (RGPD) et validés pédagogiquement, accompagnés de directives claires, de pratiques inspirantes et de ressources de formation.

- Une **base de données de programmes d'études pilotée par l'IA et un chatbot national souverain** pour les professionnels sera développée, afin d'améliorer la planification pédagogique, d'assurer la protection des données et de promouvoir l'enseignement et l'apprentissage innovants à tous les niveaux du système éducatif.
- De plus, un **organe consultatif central** soutiendra les écoles sur les questions juridiques, technologiques et pédagogiques, garantissant que l'utilisation de l'IA est conforme aux normes éthiques et aux réglementations en matière de confidentialité.
- La stratégie met l'accent **sur l'intégration de la maîtrise de l'IA et des données dans les programmes nationaux** afin de préparer les étudiants à l'avenir numérique, en veillant à ce qu'ils deviennent des penseurs critiques et des utilisateurs responsables et créatifs de la technologie.

Au-delà des applications pédagogiques, le ministère explorera comment **l'automatisation pilotée par l'IA, telle que les bots et les assistants virtuels**, pourrait soutenir les flux de travail administratifs, rationaliser la communication et gérer efficacement les tâches routinières. Ces outils aident à réduire la charge de travail des enseignants et des chefs d'établissement scolaire, leur permettant de se concentrer sur l'apprentissage des élèves et le leadership. Assurer l'intégration responsable, sécurisée et centrée sur l'humain de ces solutions est essentiel pour maintenir des normes élevées dans l'éducation.

Ambition : Montée en compétences de la main-d'œuvre

L'impact de l'IA sur les emplois et les compétences requises est déjà visible. Son changement transformateur affectera une large gamme de travailleurs—des professionnels du savoir et des programmeurs en passant par les ouvriers d'usine. Selon l'Organisation Internationale du Travail (OIT), l'impact de l'IA sur les emplois dépend de la composition des tâches au sein d'une profession. Alors que les technologies d'automatisation ont historiquement eu le plus grand impact sur les employés ayant des niveaux d'éducation plus faibles, l'IA aura probablement un impact plus élevé sur les employés plus éduqués. D'ici 2030, 60 % des emplois pourraient voir 30 à 40 % de leurs tâches modifiées par l'IA, soulignant l'urgence de l'upskilling et du reskilling.

À l'échelle mondiale, l'OIT estime que 13,4 % des emplois pourraient être améliorés par l'IA, tandis que 5,1 % pourraient être menacés de déplacement. Les emplois qui reposent sur des compétences manuelles ou des relations interpersonnelles sont susceptibles d'être complétés et enrichis par les technologies de l'IA. Cet effet dual—risque et opportunité—souligne la nature du potentiel de l'IA.

> Action 4 : Renforcer les compétences individuelles en IA

Le Luxembourg reste engagé à intégrer la maîtrise de l'IA et les compétences numériques dans le développement professionnel, garantissant que les individus puissent s'adapter, évaluer de manière critique les applications de l'IA et travailler efficacement avec des systèmes améliorés par l'IA.

- Des institutions telles que le Centre national de formation professionnelle continue (CNFPC), l'Agence nationale pour l'emploi (ADEM), le Digital Learning Hub, l'Institut de formation de l'éducation nationale (IFEN) et l'INAP, élargiront les compétences liées à l'IA dans leurs programmes de formation afin de permettre l'upskilling continu dans tous les secteurs et professions.
- En améliorant l'accessibilité, la flexibilité et la formation en IA spécifique à chaque secteur, la stratégie d'upskilling du Luxembourg garantira que l'adoption de l'IA soit inclusive, éthiquement fondée et réactive aux demandes évolutives du marché du travail. Les cours de formation seront développés en tenant compte des différents apprenants. Une attention particulière sera accordée aux groupes particulièrement vulnérables aux avancées technologiques, tels que les demandeurs d'emploi, les personnes âgées ou les personnes en situation de handicap.
- AI4ALL, un programme organisé par l'Université du Luxembourg en coopération avec le LIST et le Digital Learning Hub, offre des parcours d'apprentissage modulaires et flexibles qui s'adaptent pour combler les lacunes en compétences et les besoins spécifiques des secteurs. Les participants peuvent progresser des bases de l'IA au niveau débutant aux applications avancées spécifiques à l'industrie. Le programme utilise à la fois des MOOCs en ligne et des formations en présentiel. Il favorise des opportunités d'upskilling continu dans des secteurs clés tels que la finance, l'espace, la cybersécurité et l'économie verte, par exemple, en reliant les connaissances théoriques aux applications réelles de l'IA.

› Action 5 : Amélioration des compétences au sein des entreprises

L'adoption de l'IA varie selon les industries, chacune faisant face à des défis et des opportunités uniques. Identifier les points de douleur spécifiques à chaque secteur permet de développer des solutions de formation sur mesure qui aident les entreprises à intégrer l'IA de manière efficace. Une collaboration étroite avec les employeurs garantit que les programmes de formation restent pertinents, réactifs et alignés avec les besoins du marché en évolution. Les partenariats public-privé tirent parti de l'expertise en IA pour améliorer la formation professionnelle continue (cVET), créant des programmes personnalisés qui dotent les travailleurs de compétences en IA ciblées et à fort impact pour stimuler la compétitivité, l'efficacité et l'innovation.

› Action 6 : Stages structurés en IA

Les initiatives de stages structurés en IA entre l'Université du Luxembourg, le LIST et les entreprises avancées dans l'IA offrent un double avantage : les étudiants acquièrent une expérience pratique inestimable en contribuant à des projets liés à l'IA, tandis que les entreprises façonnent activement la prochaine génération d'experts en IA. Cette collaboration garantit un vivier de talents dotés de connaissances de pointe et de compétences pratiques.

› Action 7 : Intégration de l'IA | aider les entreprises à exploiter leurs données et l'IA

Conscients que la plupart des entreprises utilisatrices de l'IA ne la développeront pas en interne, des efforts sont menés pour leur fournir des conseils sur les premières étapes de l'adoption. De nouveaux programmes de formation stratégiques, spécifiquement conçus pour les cadres dirigeants et dispensés par des institutions telles que le CNFPC et le Digital Learning Hub, aident les entreprises à appréhender les complexités et à acquérir les compétences interdisciplinaires nécessaires à une mise en œuvre réussie de l'IA. Cela inclut la gestion de projet, la cybersécurité, la conformité légale et les enjeux éthiques, tels que les biais.

Les mesures de soutien et de formation ciblées visent à démontrer les avantages tangibles de l'IA pour les PME, en les aidant à identifier et à mettre en œuvre des solutions individuelles adaptées à leurs besoins spécifiques. Les grandes entreprises, quant à elles, peuvent nécessiter des cadres avancés pour étendre l'adoption de l'IA à l'ensemble de leurs opérations.

Ambition : Informer les citoyens et promouvoir l'alphabétisation en IA

Pour compléter l'objectif du gouvernement de faire du Luxembourg une nation préparée pour l'IA, l'ambition est d'offrir les ressources nécessaires pour améliorer le niveau de maîtrise de l'IA des citoyens. Cela est crucial pour la qualité du discours démocratique et pour protéger la prise de décision individuelle des risques liés à l'IA.

› Action 8 : Promouvoir le MOOC « Elements of AI »

Le gouvernement luxembourgeois soutient activement le MOOC « Elements of AI » dans le cadre de son **engagement à promouvoir la culture de l'IA au sein de la population**. En collaboration avec le Centre de Compétence de l'Université du Luxembourg (ULCC), le cours finlandais a été adapté pour répondre aux besoins uniques du Luxembourg, en intégrant des fonctionnalités telles que des groupes d'étude en personne et des webinaires animés par des experts pour compléter l'expérience d'apprentissage en ligne.

En engageant des partenaires nationaux tels que l'IFEN, le Digital Learning Hub et l'INAP, cette initiative garantit l'accessibilité et la pertinence pour divers publics, y compris les éducateurs, les professionnels et le grand public.

Les participants qui terminent le cours via le portail dédié reçoivent un certificat délivré par l'ULCC. Grâce à des initiatives comme celle-ci, le gouvernement **prévoit d'équiper au moins 1 % de la population avec des connaissances de base en IA**, en alignement avec les objectifs européens plus larges en matière de culture numérique.

› Action 9 : Promouvoir l'Institut d'éthique numérique de l'Université du Luxembourg (ULIDE)

L'Institut pour l'éthique numérique de l'Université du Luxembourg **offre des opportunités en matière d'éthique et de sensibilisation** à l'IA pour le public, les étudiants, les éducateurs et les professionnels afin de promouvoir la compréhension des pratiques responsables en matière d'IA. Il engage les décideurs politiques, les chercheurs et les leaders de l'industrie pour aligner au mieux le développement de l'IA avec les normes éthiques et les objectifs de durabilité. La sensibilisation de divers groupes permet de créer une société bien informée, capable de s'engager de manière critique avec les technologies de l'IA.

2. Infrastructures

Sécuriser les bases technologiques

Le Luxembourg bénéficie d'une infrastructure numérique solide. Sa connectivité, son infrastructure énergétique et sa capacité de traitement sont à la fois substantielles et souveraines. Tous les projets de développement d'infrastructures et de services tirent parti de ces avantages.

Ambition : Investissement continu dans les capacités numériques souveraines

Le Luxembourg a comme objectif le développement continu d'infrastructures numériques souveraines et de pointe pour renforcer ses capacités technologiques tout en contribuant à la sécurité des données. Cette double approche - souveraineté et excellence technologique - constitue un levier stratégique pour l'innovation en IA.

› Action 10 : Opérationnalisation de MeluXina-AI

Le Luxembourg a récemment été sélectionné pour accueillir un supercalculateur optimisé pour l'IA, MeluXina-AI, à travers un appel européen à manifestations d'intérêt. Le projet MeluXina-AI sera détenu par EuroHPC JU et exploité par LuxProvide. Sa mise en œuvre et son lancement opérationnel sont prévus pour mi-2026, après une phase de passation de marché dirigée par EuroHPC JU en 2025, basée sur les spécifications décrites dans la proposition du Luxembourg. MeluXina-AI sera installé aux côtés de l'infrastructure HPC existante de MeluXina, la remplaçant éventuellement et se connectant de manière transparente à la future plateforme de calcul quantique MeluXina-Q.

MeluXina-AI est conçu pour offrir des performances multi-exaflop, un stockage de données efficace et un tissu d'interconnexion à faible latence. Il priorise la sécurité et la résilience grâce à sa certification ISO 27001, sa redondance multi-sites et sa conformité. L'adaptabilité de MeluXina-AI soutient les besoins évolutifs et s'intègre aux services nationaux et européens. La durabilité reste un objectif central, comme en témoigne son design écoénergétique et son faible empreinte carbone. L'accessibilité et la convivialité du système prennent en compte diverses communautés, tandis que son bac à sable SaaS permet des expérimentations en toute sécurité.

› Action 11 : Promotion des offres de cloud souverain

Alors que des agences gouvernementales clés comme le CTIE et le régulateur financier CSSF sont devenues clients de lancement de solutions de cloud souverain déconnectées fournies par des fournisseurs basés au Luxembourg, le gouvernement continue à chercher de renforcer l'offre globale de solutions de cloud souverain. Des fournisseurs de cloud européens importants ont récemment commencé à offrir des solutions de cloud souverain basées au Luxembourg au marché de l'UE. De plus, plusieurs fournisseurs de cloud à grande échelle ont annoncé des offres de cloud au Luxembourg pour des projets nécessitant une localisation nationale des données.

Les entreprises et les acteurs institutionnels peuvent bénéficier de cette variété de possibilités de cloud tout en conservant un avantage dans le domaine des services d'IA. Cela renforce considérablement la position du Luxembourg en tant que pays hôte pour les institutions internationales.

Ambition : Infrastructures de connectivité renforcée par l'IA

Le Luxembourg bénéficie d'une infrastructure de connectivité à très haut débit étendue, qui gagnera en efficacité à mesure que de plus en plus de composants se tourneront vers les technologies basées sur l'IA.

L'IA apporte de l'efficacité au découpage de réseau 5G, permettant aux opérateurs de télécommunications d'offrir des segments de réseau personnalisés pour des cas d'utilisation spécifiques, comme l'IoT (Internet of Things) ou les applications à haute bande passante. L'IA peut optimiser le fonctionnement des technologies Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) et de formation de faisceaux, qui sont cruciales dans les réseaux 5G. L'IA facilite une utilisation efficace de l'énergie en permettant d'ajuster dynamiquement les niveaux de puissance et les directions des faisceaux en fonction de la demande et de la localisation des utilisateurs. Elle aide également à gérer les ressources de l'informatique de périphérie, assurant une faible latence et une haute fiabilité pour les applications critiques, telles que celles liées aux véhicules autonomes et à la chirurgie à distance.

La gestion du trafic basée sur l'IA peut répondre aux défis rencontrés par les réseaux fixes et mobiles. Dans les réseaux fixes, l'IA se concentre sur l'optimisation des connexions stables et à haute capacité. Dans les réseaux mobiles, elle gère des conditions dynamiques et variables, telles que la mobilité des utilisateurs.

Le Luxembourg dispose d'une connectivité haut débit avancée, renforcée par l'IA pour optimiser les réseaux 5G, réduire la consommation d'énergie, et améliorer la gestion du trafic et la cybersécurité.

Dans les deux cas, l'IA améliore les performances du réseau, réduit la congestion et améliore l'expérience utilisateur globale en gérant intelligemment le trafic en temps réel. Elle peut améliorer la prévision de l'offre et de la demande, renforcer les mesures d'efficacité énergétique, tirer parti de la flexibilité des batteries et de la réponse à la demande, permettre un commerce énergétique plus efficace et optimiser la planification et l'exploitation des réseaux et de la connectivité.

L'IA a le potentiel de transformer la détection des menaces en (1) surveillant le trafic réseau pour des modèles inhabituels pouvant indiquer des menaces de sécurité, telles que des attaques DDoS (Distributed Denial-of-Service) ou des accès non autorisés, et (2) en répondant immédiatement. À l'avenir, la réponse automatisée aux incidents pourrait minimiser l'impact des violations de sécurité et réduire les temps de réponse. En essence, l'IA offre aux opérateurs de télécommunication de nouvelles façons d'améliorer leur efficacité opérationnelle, d'améliorer l'expérience client et de débloquent des sources de revenus inexploitées, tout en maintenant un réseau robuste et sécurisé. Cela soutient non seulement la compétitivité, mais préserve également la flexibilité face aux demandes en évolution rapide au sein de l'industrie des télécommunications.

Pendant les périodes de faible trafic, **les outils de l'IA peuvent gérer des modes de veille adaptés pour les équipements réseau**, tels que les routeurs, les commutateurs et les stations de base. En ajustant les cycles de veille en fonction de la demande prédite, les opérateurs réduisent considérablement la consommation d'énergie sans affecter la qualité du service. L'IA est prête à aider à la conception et à l'expansion de l'infrastructure réseau en analysant les modèles de consommation d'énergie et en recommandant des configurations qui minimisent l'utilisation d'énergie. Par exemple, pendant les heures creuses, l'IA peut réduire la consommation d'énergie des stations de base ou même éteindre sélectivement les composants réseau sous-utilisés.

Ambition : Considérations énergétiques pour l'IA et l'infrastructure numérique du Luxembourg

L'avenir des technologies et des infrastructures de l'IA impliquera une augmentation rapide des besoins énergétiques pour la collecte, le stockage et le traitement des données. Une électricité fiable, durable et abordable sera essentielle pour soutenir l'adoption généralisée des solutions numériques, attirer les entreprises et permettre le déploiement à grande échelle des infrastructures. En même temps, la croissance rapide des infrastructures numériques, en particulier grâce aux solutions d'IA, présentera des défis et des opportunités significatifs qui devront être gérés avec soin pour assurer un déploiement équilibré dans les domaines suivants :

Énergies renouvelables : les énergies renouvelables seront essentielles pour répondre aux besoins énergétiques futurs des technologies de l'IA. À mesure que l'IA continue d'évoluer, le Luxembourg nécessitera des quantités plus importantes d'énergie renouvelable pour atteindre ses objectifs de durabilité et réduire les émissions de carbone.

Efficacité énergétique : Afin de garantir une utilisation des ressources et de l'énergie la plus efficace possible, le Luxembourg prévoit d'adopter des pratiques de l'IA frugales qui se concentrent sur l'optimisation des modèles de l'IA afin de réduire leur consommation de calcul, de mémoire et d'énergie.

Développement des réseaux : La demande accrue d'électricité due à l'IA et aux centres de données impliquera des améliorations des réseaux électriques du Luxembourg permettant une alimentation électrique stable, fiable et évolutive.

Conscient que l'énergie est une considération critique, le Luxembourg offre un approvisionnement fiable, durable et abordable qui servira comme base pour devenir un centre de développement durable de l'IA. En attirant des investissements, en créant des emplois et en favorisant l'innovation, c'est possible de stimuler la croissance dans les secteurs de l'énergie et de la technologie. Cette vision positionne le Luxembourg comme un pionnier de l'IA durable et d'un modèle de collaboration exemplaire entre les infrastructures numériques et les systèmes énergétiques.

3. Éventail de services

Accélérer l'innovation et la mise en œuvre de l'IA

Pour soutenir adéquatement le secteur privé, en particulier les startups et les PME, le Luxembourg propose des services adaptés à des besoins divers. Dans le cadre des efforts visant à offrir un environnement réglementaire simplifié qui stimule l'innovation, les bacs à sable d'IA offrent aux entreprises un espace sécurisé pour innover. La Luxembourg AI Factory, aux côtés de MeluXina-AI et de ses ressources informatiques de nouvelle génération, fournit des services clés.

Ambition : Encourager un écosystème d'innovation IA intégré

L'ambition du Luxembourg est de créer un écosystème d'innovation d'IA intégré, reliant l'ensemble des acteurs, ressources et initiatives pour accélérer l'adoption, le développement et le déploiement de l'IA.

> Action 12 : Luxembourg AI Factory I un guichet unique pour les services de l'IA

Désignée pour devenir un **guichet unique de premier plan** pour les services d'IA, la Luxembourg AI Factory aidera les entreprises à explorer, développer et déployer des projets basés sur l'IA. Pour fournir une gamme complète de services, elle s'appuiera

sur l'expertise et l'expérience de cinq membres du consortium :

- **LuxProvide**, le centre national de supercalcul du Luxembourg, mettra en œuvre et exploitera MeluXina-AI, et fournira des solutions d'ingénierie HPC-IA, des applications et des services de support à l'écosystème.
- **Luxinnovation**, l'agence nationale d'innovation, collaborera avec les entreprises du secteur privé pour identifier les opportunités d'innovation en IA, rendant les entreprises plus compétitives et élargissant l'utilisation de l'IA. De plus, l'agence coordonnera les activités d'incubation d'IA et établira des partenariats avec d'autres AI Factories.
- **LNDS**, qui se spécialise dans la gestion des données intersectorielles et la création de valeur à partir de l'utilisation secondaire des données, facilitera l'accès aux grands volumes de données de haute qualité essentielles au développement de l'IA. Il contribuera à renforcer les capacités au sein de l'écosystème d'IA, notamment le soutien éthique, juridique et d'impact social adapté aux récentes réglementations sur les données et l'IA, tout en collaborant avec le bureau européen de l'intelligence artificielle (« AI Office »).
- **LIST et l'Université du Luxembourg**, tous deux organismes de recherche publics, concentreront leurs recherches sur des applications concrètes d'IA, en partenariat étroit avec le secteur privé. En outre, ils soutiendront le développement des compétences, fourniront un accès à des laboratoires et installations spécialisés, et maintiendront une veille technologique en IA.

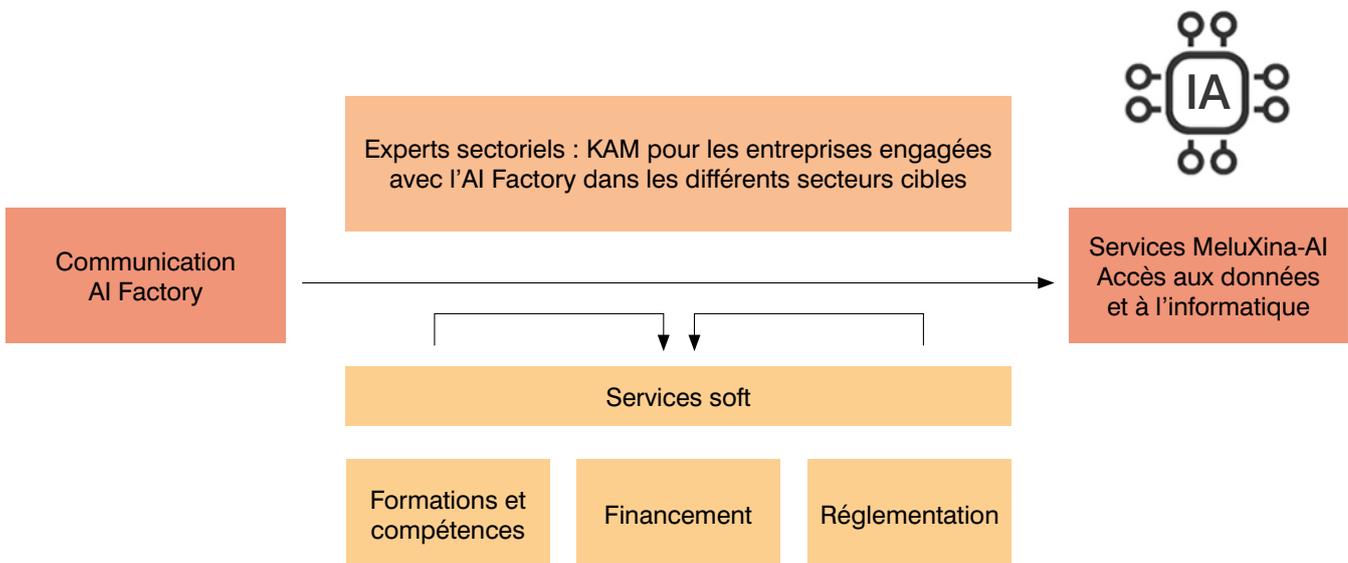


Schéma AI Factory

En plus de ces cinq membres du consortium, la Luxembourg AI Factory sera soutenue par plusieurs partenaires associés de l'écosystème. Le bureau central de la Luxembourg AI Factory, établi à Luxinnovation à Belval, servira de premier point de contact pour les entreprises, les chercheurs et autres parties prenantes intéressées par l'adoption de l'IA. Ce bureau offrira des services de conseil initial et des évaluations des besoins de chaque entreprise, les orientant potentiellement vers l'un des cinq pôles d'IA pour des services et des ressources supplémentaires :

- Pôle d'IA Finance (LHoFT, Luxembourg House of Financial Technology)
- Pôle d'IA Spatial (LSA, Luxembourg Space Agency)
- Pôle d'IA Cybersécurité (LHC, Luxembourg House of Cybersecurity)
- Pôle d'IA Économie verte (LIST)
- Pôle d'IA Agnostique sectoriel pour tous les autres domaines (Technoport)

Cette approche stratégique est conçue pour maximiser l'interaction entre les experts en IA (fournisseurs de solutions) et les acteurs sectoriels (utilisateurs de solutions), y compris les entreprises privées, les incubateurs, les chercheurs, les étudiants, les investisseurs et les équipes de soutien de la Luxembourg AI Factory. Ces pôles mettent les entreprises privées à proximité d'experts en IA spécialisés dans leur domaine, ce qui facilitera la collaboration et le développement de projets communs.

Une gamme complète de services à l'écosystème de l'IA :

La Luxembourg AI Factory vise à soutenir et à stimuler un écosystème d'IA dynamique au Luxembourg en favorisant la collaboration, l'échange de connaissances et la croissance mutuelle. Cette initiative guidera non seulement les entreprises dans le partage de leurs connaissances, mais fournira également une plateforme pour la résolution conjointe de problèmes afin d'accélérer l'adoption, le développement et le déploiement de l'IA.

La Luxembourg AI Factory soutient tous les acteurs pour accélérer l'adoption et l'usage responsable de l'IA via la collaboration, la formation et l'accompagnement personnalisé.

La Luxembourg AI Factory s'engage à soutenir toutes les parties prenantes concernées, indépendamment de leur niveau de maturité en IA, de leur expertise ou de la taille de leur organisation. Cela comprend la démystification de l'IA et la littératie numérique via des formations spécifiques et des services de conseil orientés projets, ainsi que le soutien à la conformité et les activités de réseautage. Ses activités spécifiques englobent les éléments suivants :

- Guider les entreprises de l'idéation à l'exécution afin de soutenir chaque phase d'adoption de l'IA en offrant ces services :
 - Construction de solutions d'IA avancées
 - Évaluations de maturité en IA
 - Bacs à sable réglementaires
 - Cadres de partage de données
 - Accès et valorisation des données
- Favoriser le développement de l'expertise en IA grâce à des programmes de formation et d'upskilling, permettant aux entreprises de créer et d'étendre leurs capacités internes en IA.
- Mettre en relation les entreprises avec des experts accrédités en IA et des sources de financement, y compris Horizon Europe, des subventions R&D et Innovation, et des incitations financières.
- Aider les entreprises à définir des cas d'utilisation de l'IA et à réaliser des études de faisabilité, garantissant une approche structurée et stratégique de l'intégration de l'IA.

> Action 13 : Collaborer stratégiquement en unifiant les initiatives nationales

Pour favoriser l'innovation et exploiter les synergies entre différents secteurs, la Luxembourg AI Factory travaillera en étroite collaboration avec les initiatives nationales existantes :

- Le **Luxembourg Digital Innovation Hub (L-DIH)** soutient les entreprises basées au Luxembourg, en particulier les PME, dans leur parcours de transformation numérique, avec un accent sur le secteur manufacturier. Il fournit des tests de technologies, le développement de compétences et l'accès à des opportunités de financement pour aider les entreprises à évaluer leur maturité numérique, identifier les lacunes et mettre en œuvre des solutions qui améliorent la compétitivité ; la Luxembourg AI Factory renforcera les services du L-DIH en intégrant des capacités d'IA avancées dans ses offres.
- Le **Centre national de compétences en calcul haute performance (NCC Luxembourg)** fournit aux entreprises et aux chercheurs un accès aux ressources et à l'expertise en HPC. Le projet se

concentre sur l'amélioration des connaissances et des compétences en HPC, rendant le HPC plus accessible aux communautés industrielles et de recherche du Luxembourg. Le NCC joue un rôle central dans le développement de technologies de pointe qui nécessitent une puissance de calcul considérable, notamment l'IA, les simulations et le traitement de données massives.

- **L'Institut de la Propriété Intellectuelle Luxembourg (IPIL)** sensibilise à l'importance de la propriété intellectuelle et renforce les capacités **d'application des règles de propriété intellectuelle (PI) aux projets d'IA** par le biais de formations spécialisées et d'accompagnements personnalisés. L'IPIL met en relation les parties prenantes impliquées dans des projets d'IA avec un réseau de plus de 300 professionnels de la PI disponibles au Luxembourg pour assurer des conseils juridiques de haut niveau en matière de PI.

Ambition : Financement ciblé pour le développement et l'adoption de l'IA

Le Luxembourg a créé un écosystème de financement robuste : une gamme diversifiée d'opportunités de financement couvre l'ensemble de la chaîne de valeur, encourageant la commercialisation de la recherche académique.

L'AI Factory du Luxembourg jouera un rôle crucial dans ces initiatives, soit en complétant les activités existantes, soit en élargissant leurs capacités.

› Action 14 : Nouvelle opportunité de financement thématique pour l'IA

La **Stratégie Nationale de Recherche et d'Innovation** sera révisée pour refléter des nouveaux domaines stratégiques, y compris l'IA. Les priorités de recherche définies dans ces domaines s'alignent directement avec la majorité des programmes de financement du Fonds National de la Recherche (FNR), notamment CORE. La mise à jour de la Stratégie Nationale de Recherche et d'Innovation pour refléter les développements dans les technologies numériques encourage des projets de recherche de haute qualité dans les domaines clés. De plus, l'introduction possible d'un nouvel instrument de financement pour la recherche axée sur des missions spécifiques serait explorée.

Le ministère de l'Économie, le ministère de la Recherche et de l'Enseignement supérieur, et le FNR encouragent les collaborations entre les institutions de recherche publiques et les entreprises privées par le biais de leurs **appels à projets thématiques conjoints pour des projets de Partenariat Public-Privé (PPP)** afin de favoriser les transferts de

technologie et de connaissances entre le monde académique et les entreprises dans des domaines stratégiques tels que l'IA.

Les entreprises privées bénéficient déjà d'une gamme d'instruments de recherche, de développement et d'innovation offerts par le ministère de l'Économie. Ces instruments soutiennent l'innovation en IA dans le cadre des programmes d'innovation, des nouvelles technologies et du calcul haute performance. Ces dispositifs de financement utilisent une approche ascendante (bottom-up) basée sur des projets, néanmoins, l'innovation en IA pourrait bénéficier d'un cadre descendant (top-down). Par conséquent, l'introduction d'appels thématiques avec des taux d'aide financière ajustés sera envisagée pour inciter des domaines spécifiques d'innovation parmi les entreprises privées.

Au-delà du soutien national, le Luxembourg encourage activement les entreprises locales à poursuivre des **opportunités de financement européen et à s'engager dans des initiatives collaboratives en IA.**

› Action 15 : Soutenir la création et l'accélération des startups de l'IA

Les startups et les scale-ups sont particulièrement vitales pour l'innovation en IA. Le Luxembourg offre un soutien dédié qui suit sa feuille de route «From Seed to Scale» et son plan d'action en découlant pour le développement de l'écosystème des startups. Il vise à offrir un ensemble complet de services et de programmes qui couvrent l'ensemble du processus de transfert de technologie, du **développement de spin-offs** à la **création** et à la **croissance de startups**.

Pour augmenter le nombre et la qualité des spin-offs avec des propositions de valeur basées sur la recherche luxembourgeoise, un **groupe de travail sur la stratégie de transfert de technologie** composé des principales parties prenantes nationales a récemment été mis en place. Il se propose d'identifier les obstacles actuels à la création et au développement réussi des spin-offs et de proposer un plan d'action pour les surmonter.

S'appuyant sur le succès de Fit4Start—l'initiative nationale phare du Luxembourg pour le financement d'amorçage des startups en phase de démarrage—un **programme Fit4Scale** pour aider les startups à se développer et à s'étendre vers de nouveaux marchés sera lancé. Les deux programmes se concentrent sur des domaines stratégiques et offrent des composantes adaptées aux besoins uniques des entreprises d'IA à différents stades de croissance.

Un pilier essentiel d'un écosystème de startups favorable est l'accès aux investissements : une gamme de fonds pour financer les startups au stade d'amorçage, tels que le *Digital Tech Fund*, *Orbital Ventures* et le *Luxembourg Future Fund* sont déjà en place.

Pour encourager davantage l'investissement privé dans les startups, un **crédit d'impôt** sera introduit pour les investissements dans de jeunes entreprises innovantes par des contribuables personnes physiques.

› Action 16 : Soutien à l'intégration de l'IA pour les PME

Le ministère de l'Économie offrira divers modules de soutien aux entreprises, en particulier aux PME, pour stimuler l'adoption des technologies numériques.

Des **mesures spécifiques à l'IA** complètent le soutien disponible pour les entreprises, accélérant l'adoption de l'IA parmi les PME et renforçant la compétitivité :

- **SME Packages axé sur l'IA** | Soutient les PME dans leurs premiers pas vers l'adoption de l'IA et fournit des solutions simples et faciles à mettre en œuvre
- **Fit 4 Digital – AI** | Offre aux entreprises l'opportunité de collaborer avec un consultant expérimenté pour définir les défis, les objectifs et les priorités ; comprend une analyse de faisabilité des cas d'utilisation présélectionnés et le développement d'une feuille de route (plan d'action détaillé, estimations des coûts, sélection d'une solution d'IA—qu'elle soit générique ou sur mesure—et un retour sur investissement estimé)

Ambition : Faciliter l'expérimentation responsable de l'IA

Les bacs à sable sont des cadres structurés permettant aux innovateurs de développer et de tester de nouvelles idées, produits, modèles commerciaux et services dans un environnement contrôlé. Les bacs à sable réglementaires sont organisés sous la supervision d'une autorité compétente et offrent un processus structuré pour les entreprises qui souhaitent entrer de manière responsable sur le marché de l'IA sans incertitude juridique.

› Action 17 : Bacs à sable réglementaires pour l'IA

En mai 2024, la Commission nationale pour la protection des données (CNPD) du Luxembourg a lancé un bac à sable réglementaire axé sur la protection des données en relation avec l'IA. Cet environnement numérique isolé permet aux innovateurs de tester des systèmes d'IA pour la protection des

données personnelles et la conformité au RGPD avant leur mise sur le marché. Ces tests sont menés en collaboration avec les parties prenantes locales. Les développeurs d'IA peuvent collaborer avec la CNPD pour aborder les questions de protection des données et les risques pour la vie privée. Ces efforts préventifs contribuent à des systèmes plus sûrs et plus fiables.

La CNPD mettra en place un bac à sable réglementaire national pour l'IA dans le cadre de l'AI Act une fois que la législation nationale relative entrera en vigueur⁸.

Le CGPD proposera également un bac à sable réglementaire pour l'IA conformément à l'AI Act. Le projet de loi d'application de l'AI Act permettra d'intégrer le bac à sable dans l'environnement de traitement sécurisé établi par le CGPD, conformément aux réglementations européennes sur la réutilisation des données. Cela favorise la simplification administrative, l'alignement des procédures et la sécurité juridique.

› Action 18 : LIST – Observatoire des LLM et bac à sable technique⁹

En février 2024, le LIST a introduit un bac à sable d'IA pour les entreprises, les développeurs d'IA et les régulateurs afin de réaliser des évaluations indépendantes des algorithmes d'IA à la lumière des nouvelles exigences de l'AI Act, qui diffèrent selon le secteur et le cas d'utilisation. LIST a également rendu public l'Observatoire des LLM, qui évalue les biais sociaux des grands modèles de langage (LLM) les plus populaires. Ces biais comprennent ceux fondés sur l'orientation sexuelle, l'âge, le genre, la politique, la race, la religion et l'ethnicité. Le classement des biais sociaux des LLM sensibilise les citoyens aux biais implicites intégrés dans les LLM. Les entreprises peuvent utiliser ce classement pour sélectionner le modèle pré-entraîné le mieux adapté à leurs besoins spécifiques et tester leurs solutions basées sur des LLM pré-entraînés.

⁸ Commission des Médias et des Communications, Projet de loi 8476, Chambre des Députés.pdf

⁹ The LIST AI Sandbox, Link: ai-sandbox.list.lu

4. Recherche, développement et innovation

Transformer les idées en solutions

Les petits pays avec des ressources limitées ne peuvent pas concurrencer les grandes nations capables de faire des investissements massifs dans les modèles de fondation de l'IA. C'est pourquoi le Luxembourg doit concentrer stratégiquement ses investissements pour maximiser l'impact et la compétitivité.

Ambition : Promouvoir l'excellence dans le développement d'une IA de confiance, durable et sécurisée

Le Luxembourg définira des priorités stratégiques dans le domaine de l'IA qui tirent parti des forces et des ambitions globales de l'écosystème.

› Action 19 : IA responsable, souveraine et de confiance

Le Luxembourg, avec son secteur financier internationalement connu, a toujours mis l'accent sur la mise à disposition d'une infrastructure de confiance pour les citoyens et les entreprises. Il adopte une approche similaire pour les systèmes d'IA, pour lesquels la confiance est centrale à l'adoption. Les projets de recherche et d'innovation financés par le Luxembourg prendront toujours en compte les implications ELSI - Éthiques, Juridiques et Sociales.

En se concentrant sur l'IA de confiance, le Luxembourg favorise la confiance du public dans les technologies de l'IA, encourageant leur adoption dans des secteurs critiques tels que la santé, la finance et la gouvernance. La poursuite de l'IA de confiance inclut le financement de la recherche pour développer des cadres d'audit de l'IA, de certification et de lignes directrices éthiques qui préservent des systèmes d'IA équitables et responsables. Le Luxembourg est déjà actif dans ce domaine :

- L'unité HANDS (Human Centered AI, Data, and Software) du LIST est composée de plus de 100 chercheurs et ingénieurs travaillant sur l'évaluation éthique de l'IA, la fiabilité de l'IA, l'IA explicable, l'acceptation de l'IA par les utilisateurs et la conformité de l'IA, entre autres sujets. LIST exploite également un nœud du Citcom.ai TEF (Testing and Experimentation Facilities) pour tester l'IA dans les villes intelligentes et les communautés (Smart Cities & Communities) ainsi qu'un nœud

du projet EnerTEF, répondant au besoin d'outils d'IA fiables et rigoureusement testés dans des environnements énergétiques réels.

- En février 2024, le LIST a publié un bac à sable technique de l'IA conçu pour aider les développeurs d'IA à garantir la fiabilité de leurs solutions en préparation de l'AI Act. Le bac à sable propose une évaluation publique des biais sociaux des LLM.
- Le LIST explore également comment les métriques et les benchmarks traditionnels de l'IA peuvent s'étendre pour inclure des aspects de fiabilité, de résilience et de responsabilité dans le cadre du projet EDF STORE.
- Le SnT (Interdisciplinary Centre for Security, Reliability and Trust) héberge le groupe de recherche TruX engagé dans la construction d'algorithmes d'apprentissage automatique explicables répondant aux défis liés au compromis entre précision et interprétabilité.
- La Chaire de politique de cybersécurité, établie par la Direction de la Défense du Luxembourg et l'Université du Luxembourg, entreprend des études approfondies, engage des activités de recherche et offre des conseils stratégiques et des recommandations sur les défis politiques, éthiques et juridiques liés à l'IA.

› Action 20 : IA frugale et l'efficacité des modèles

L'efficacité et la compression des modèles d'IA sont un domaine de recherche actif en raison de leur importance pour une utilisation optimale des ressources. **Le Luxembourg développera une expertise dans la création de modèles d'IA légers et efficaces qui nécessitent moins de puissance de calcul et d'énergie** et sont capables de fonctionner sur des nœuds périphériques. Cela réduit non seulement les coûts opérationnels, mais rend l'IA plus accessible à un plus large éventail d'applications et d'utilisateurs. En se concentrant sur l'élagage des modèles, la quantification et la distillation des connaissances, par exemple, il devient possible de développer des solutions d'IA à la fois puissantes et économes en ressources, donc accessibles aux utilisateurs qui ne peuvent pas investir massivement dans du matériel spécialisé.

La capacité de faire fonctionner des modèles légers et économes en ressources sur des appareils personnels deviendra possible, entraînant une augmentation de la confidentialité. La distillation des données présente une autre approche prometteuse. Elle consiste à créer de petits ensembles de données avec lesquels il est

toujours possible d'entraîner des modèles et d'obtenir une grande précision. Le Luxembourg tirera parti des données synthétiques pour surmonter la disponibilité limitée des données réelles nationales.

› Action 21 : IA pour la sécurité et sécurité de l'IA

Entre de mauvaises mains, les technologies de l'IA augmentent la menace de l'ingénierie sociale, des deepfakes, du phishing et des attaques de logiciels malveillants. Protéger les personnes et les actifs contre les cyberattaques, les fausses nouvelles et autres menaces contre la société devient maintenant une urgence nouvelle.

Heureusement, l'IA peut également être un allié puissant pour créer des outils et services de cybersécurité abordables. Des contre-mesures activées par l'IA, continuellement mises à jour, pourraient être l'antidote parfait aux attaques conçues par l'IA. La recherche, ainsi que l'AI Factory nationale, alimenteront de nouveaux outils et services de cybersécurité améliorés par l'IA pour les PME et les grandes entités.

Les systèmes basés sur l'IA sont fondamentalement imprévisibles en raison de leur nature statistique, produisant parfois des résultats incorrects ou irrationnels (les soi-disant *hallucinations*). Cela découle de la fragilité intrinsèque des modèles d'IA et des interactions complexes, souvent imprévisibles, entre les composants de l'IA et les logiciels ou matériels traditionnels. Sécuriser ces systèmes présente un défi majeur. La LHC et la communauté de recherche active au Luxembourg développeront de leurs côtés des outils d'évaluation qui détectent les vulnérabilités, atténuent les risques et renforcent les modèles d'IA avant et pendant le déploiement. Des mesures de sécurité robustes sont essentielles pour garantir la fiabilité de l'IA ; prévenir l'exploitation, la pollution, l'exfiltration ; et maintenir la confiance dans les décisions pilotées par l'IA.

Ambition : L'IA comme catalyseur de l'innovation en recherche

L'IA agit comme une force transformatrice qui accélère et amplifie l'innovation dans la recherche. En tirant parti des possibilités offertes par cette technologie, le Luxembourg aspire à développer un environnement de recherche vibrant et créatif, propice à des avancées scientifiques significatives.

› Action 22 : Ingénierie logicielle pour l'IA et l'IA pour l'ingénierie logicielle

L'IA est sur le point de transformer l'ingénierie logicielle, et il est essentiel d'adapter les compétences en

conséquence. Développer, affiner, tester et utiliser des logiciels alimentés par l'IA repose sur des principes rigoureux d'ingénierie logicielle, tels que la conception modulaire, les tests, la maintenance et la reproductibilité. L'IA elle-même peut aider à appliquer ces meilleures pratiques d'ingénierie logicielle. Dans un avenir très proche, un seul ingénieur logiciel pourra déployer des agents d'IA qui automatisent les tâches routinières, améliorent le débogage et même génèrent des codes. Le Luxembourg ne prévoit pas que cela entraîne une diminution de la demande pour les ingénieurs logiciels. Au contraire, à mesure qu'ils deviennent plus productifs grâce à l'IA, la demande pour les ingénieurs logiciels maîtrisant l'IA augmentera.

Pour réaliser pleinement cette vision, l'**Université du Luxembourg adaptera de nouveaux programmes de diplômes qui combinent l'ingénierie logicielle de base avec des études avancées en IA**. Ces programmes combineront des cours en développement logiciel traditionnel, algorithmes et structures de données avec des sujets comme l'apprentissage automatique, la science des données, l'éthique de l'IA et l'interaction homme-machine. Les Masters en Calcul Haute Performance, en Science des Données et en Biomédecine Computationnelle de l'Université du Luxembourg incluront tous des cours qui équipent les étudiants des meilleures pratiques en ingénierie logicielle. Ces diplômes prépareraient les diplômés à concevoir, construire et gérer des systèmes d'IA fiables et maintenables, tout en leur fournissant les compétences pour développer des agents d'IA qui rationalisent les processus de développement logiciel.

› Action 23 : IA pour la découverte scientifique

Le Luxembourg investira dans l'IA pour la découverte scientifique afin d'accélérer les découvertes révolutionnaires dans diverses disciplines. Ces investissements soutiendront le développement de systèmes d'IA spécialisés capables de générer de nouvelles hypothèses, d'analyser des données expérimentales complexes, d'automatiser les processus de laboratoire et de modéliser des phénomènes trop complexes pour les méthodes computationnelles traditionnelles. En établissant des collaborations interdisciplinaires entre spécialistes de l'IA et scientifiques de domaine, et en créant une infrastructure partagée pour les données et les ressources computationnelles, le Luxembourg se positionne à l'avant-garde de l'avancement scientifique piloté par l'IA.

Intégration des citoyens

Puisque ces projets reposent tous sur le soutien des citoyens, le Luxembourg lancera une série de **campagnes d'intégration des citoyens pour les projets de l'IA**. L'initiative vise à engager la

société dans la compréhension et la participation à la recherche et au développement de l'IA. En menant des entretiens structurés, des discussions et des campagnes éducatives, elle recueillera des informations sur les opinions et les préoccupations du public concernant l'IA, en se concentrant sur l'éthique, le partage des données et l'impact sociétal. Grâce à des efforts de publicité et de sensibilisation, y compris des articles de journaux et des campagnes sur les réseaux sociaux, l'initiative promouvra les avantages de la recherche en IA et encouragera une participation plus large. De plus, les projets de science citoyenne permettront aux individus de contribuer activement à la collecte de données et à la recherche en IA, favorisant un sentiment d'appartenance et d'implication.

Le Luxembourg développe une IA de confiance, efficace et sécurisée, adaptée à ses ressources.

5. Gouvernance et réglementations

L'adoption de l'IA repose sur la confiance

Ambition : Garde-fous réglementaires clairs

L'Union européenne a réussi à établir un cadre unique au sein du marché intérieur : il s'agit maintenant d'assurer une mise en œuvre efficace, pragmatique et harmonisée. Le Luxembourg accueille favorablement l'entrée en vigueur du règlement sur l'intelligence artificielle, qu'il considère comme une avancée importante vers un encadrement plus sûr et éthique de cette technologie. Tout en soutenant ses objectifs généraux, il reste attentif à sa mise en œuvre concrète, qui constituera une phase décisive pour en évaluer pleinement les effets et ajuster, le cas échéant, certaines dispositions en fonction des réalités du terrain.

› **Action 24 :** Mise en œuvre rapide et pragmatique de l'AI Act¹⁰

L'AI Act est entré en vigueur le 2 août 2024, et les premières dispositions sont devenues applicables en février 2025. Cette réglementation soutient le développement d'une IA centrée sur l'humain et digne de confiance, qui exploite les opportunités tout en protégeant contre les risques. Elle adopte une approche horizontale et basée sur les risques, interdisant les pratiques d'IA nuisibles contraires aux valeurs de l'UE.

L'AI Act établit également une méthodologie d'évaluation des risques pour identifier les systèmes d'IA « à haut risque », qui peuvent affecter de manière significative la santé, la sécurité ou les droits fondamentaux. Ces systèmes devront répondre à un ensemble d'exigences obligatoires horizontales et obtenir une évaluation de conformité avant d'être commercialisés dans l'UE.

La conformité sera supervisée par un système de gouvernance national basé sur des structures existantes, ainsi que par un mécanisme de coopération européen.

Le Luxembourg soutient une mise en œuvre pragmatique qui minimise la charge réglementaire pour les entreprises. Le dialogue réglementaire sur les cas d'utilisation de l'IA hautement complexes devra être encouragé, structuré et orienté vers des solutions tangibles. Parallèlement, le Luxembourg soutiendra le nouvel AI Office de la Commission européenne dans son rôle critique au centre de la réglementation technologique de l'UE.

Pour une application et une mise en œuvre efficaces de l'AI Act au niveau national, le projet de loi n° 8476 a été déposé le 23 décembre 2024. Étant donné que la réglementation est directement applicable, le projet de loi se concentre essentiellement sur la désignation des autorités nationales compétentes, la définition des pouvoirs et la fixation des sanctions. L'approche proposée au Luxembourg mise sur une approche décentralisée, valorisant les compétences des autorités déjà existantes et expertes dans leurs domaines respectifs (telles que la CSSF pour les acteurs du

¹⁰ Règlement (UE) 2024/1689 du Parlement européen et du Conseil du 13 juin 2024 établissant des règles harmonisées concernant l'intelligence artificielle et modifiant les règlements (CE) no 300/2008, (UE) no 167/2013, (UE) no 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1139 et (UE) 2019/2144 et les directives 2014/90/UE, (UE) 2016/797 et (UE) 2020/1828

secteur financier), afin de simplifier autant que possible les interactions pour les entreprises. A défaut d'autorité sectorielle spécifique, la CNPD assurera le rôle d'autorité de surveillance du marché par défaut, ainsi que celui de coordinateur des autorités chargées de surveiller leurs secteurs respectifs afin d'assurer une application harmonisée de l'AI Act au Luxembourg.

› Action 25 : Mise en œuvre de la Convention-cadre sur l'IA, les droits de l'homme, la démocratie et l'État de droit du Conseil de l'Europe¹¹

Le Luxembourg participe activement aux travaux du Comité sur l'Intelligence Artificielle (CAI) du Conseil de l'Europe. Le CAI met en œuvre HUDERIA (évaluation de l'impact sur les droits de l'homme, la démocratie et l'État de droit), une méthodologie pour identifier les contextes dans lesquels les systèmes d'IA pourraient menacer les droits de l'homme, la démocratie et l'État de droit, ainsi que les moyens d'évaluer et d'atténuer ces risques.

La Convention-cadre du Conseil de l'Europe sur l'intelligence artificielle et les droits de l'homme, la démocratie et l'État de droit vise à établir un cadre juridique garantissant que les systèmes d'IA respectent les droits de l'homme, la démocratie et l'État de droit. Elle promeut une gouvernance responsable de l'IA en définissant des normes internationales contraignantes pour la transparence, la responsabilité et la gestion des risques. La Convention aborde de manière collaborative les défis liés à l'IA tout en encourageant l'innovation et le développement éthique de l'IA. En harmonisant les réglementations, elle fournit une base commune pour les politiques en matière d'IA dans les pays membres et non membres. La Convention est le premier accord international contraignant sur l'IA et s'aligne pleinement avec l'AI Act de l'UE. En septembre 2024, la Commission européenne a signé la Convention au nom de l'UE lors de la conférence informelle des ministres de la Justice du Conseil de l'Europe à Vilnius.

› Action 26 : Reconnaître les aspects cybersécurité de la réglementation de l'IA

Les législateurs européens ont établi des exigences de sécurité proportionnelles aux risques inhérents à l'utilisation des systèmes d'IA. L'AI Act impose une approche globale basée sur les risques. Pour mettre en œuvre correctement les mesures de cybersécurité, les fournisseurs de systèmes d'IA à haut risque doivent se référer à des normes harmonisées (encore à adopter) et, si nécessaire, fournir la preuve de conformité par

des certifications de cybersécurité. Cela est lié à l'**Acte sur la Cybersécurité**, qui harmonise la certification à travers l'Europe. Étant donné que les systèmes d'IA sont souvent intégrés dans les processus métiers, les entités régulées doivent inclure ces systèmes dans leurs efforts de conformité. Cela relie l'AI Act à **NIS2, DORA et d'autres réglementations sectorielles**, comme celles dans le domaine de la santé. L'AI Act exige également que certains systèmes d'IA à haut risque répondent aux exigences essentielles de cybersécurité définies dans le **règlement sur la cyber-résilience (CRA)**.

Ambition : Réduire la charge administrative grâce à l'IA

L'IA peut jouer un rôle pivot dans l'assurance de la conformité aux réglementations et aux normes dans divers secteurs. Le Luxembourg utilisera l'IA pour automatiser les processus de conformité lorsque cela est possible, réduisant ainsi la charge pour les entreprises et rendant l'adhésion réglementaire plus efficace. Cela ne signifie pas abaisser les normes, mais faciliter leur respect. Un projet phare concret, **4LM**, (présenté dans la section des projets phares à la fin de ce document) présentera des utilisations des LLM pour trouver des opportunités de simplification des rapports. Ce domaine de concentration s'aligne sur la tendance mondiale vers des environnements réglementaires plus stricts, positionnant le Luxembourg comme un leader innovant en matière de technologie de conformité et exploitant la puissance de l'IA pour gérer des cadres réglementaires de plus en plus complexes au niveau de l'UE. Parallèlement, le Luxembourg **utilisera l'IA pour réduire la charge administrative** pour les entreprises grâce au développement d'outils dédiés basés sur l'IA, les aidant à gérer leurs exigences de conformité.

Le Luxembourg soutient une mise en œuvre pragmatique, la réduction de la charge administrative et le renforcement de la cybersécurité.

¹¹ COE, La Convention-cadre sur l'Intelligence Artificielle, Conseil de l'Europe 2024

6. Collaboration à l'international

Le Luxembourg comme passerelle de confiance et hub naturel pour des partenariats stratégiques

Le Luxembourg défend depuis longtemps les marchés ouverts, la fiabilité réglementaire, les investissements technologiques transfrontaliers, l'ouverture commerciale et les partenariats internationaux. Avec un marché intérieur limité, le pays se distingue en tant que porte d'entrée fiable et établie, servant de hub naturel vers l'ensemble du marché numérique européen et au-delà.

Ambition : Développer le pôle numérique Luxembourg-UE

Avec son infrastructure numérique avancée et un rôle éprouvé dans la gouvernance de la technologie et des données de confiance, le Luxembourg est idéalement positionné pour jouer un rôle central dans le renforcement de la capacité technologique de l'UE et affirmer le leadership de l'Europe dans l'IA éthique et de haute performance.

Déjà siège de plusieurs institutions de l'UE¹², le Luxembourg accueille également une partie de l'AI Office de l'UE par la présence de la DG CONNECT (Direction générale des réseaux de communication, du contenu et des technologies). Le Luxembourg entend soutenir le travail de la Commission européenne dans la mise en place de nouveaux services numériques destinés aux citoyens de l'UE, ainsi que renforcer les capacités et les compétences de l'AI Office par le biais d'expertises, de projets communs et de conférences.

› Action 27 : Connexion aux régions phares de l'écosystème de l'IA

Pour un écosystème aussi puissant que possible, le Luxembourg doit se connecter aux écosystèmes régionaux de l'IA qui complètent ses propres besoins. L'établissement de ce réseau facilitera l'échange de la valeur et ouvrira de nouvelles opportunités.

- La proximité régionale du Luxembourg avec des centres de recherche d'excellence en IA mondialement reconnus—tels que CISPA et DFKI en Sarre, INRIA à Nancy, et le centre IA de Tübingen en Bade-Wurtemberg—présente une

opportunité idéale pour positionner le Luxembourg comme un hub multilingue et un bâtisseur de ponts européens.

- La Luxembourg AI Factory renforcera davantage les liens du pays avec l'écosystème IA européen en collaborant avec un réseau entier d'AI Factories, l'AI Office de l'UE, l'ESA (European Space Agency), les EDIHs (European Digital Innovation Hubs Network) et les TEFs.

› Action 28 : Participation active aux consortiums européens d'infrastructures numériques

Le Luxembourg participe activement à plusieurs EDICs (European Digital Infrastructure Consortium), nouveaux instruments juridiques européens qui facilitent les projets multi-pays. Chacun couvre un sujet stratégique d'intérêt commun pour les États membres. Cela permet des avancées partagées à l'échelle européenne. Le Luxembourg participe actuellement à divers EDICs, parmi d'autres :

- **Alliance pour les technologies linguistiques EDIC**, particulièrement pertinente pour les pays où la disponibilité des données est relativement rare en ce qui concerne leur langue, comme c'est le cas pour le Luxembourg.
- **Genome EDIC**, qui construit des infrastructures d'accès aux données génomiques, permettant des résultats de recherche de nouvelle génération. Le Luxembourg a l'intention de devenir le pays hôte.
- **CitiVerse EDIC**, qui bénéficie au Luxembourg en stimulant la gestion des ressources, l'innovation urbaine et la durabilité grâce à des solutions alimentées par l'IA qui répondent aux menaces potentielles.

› Action 29 : Contribution à la normalisation internationale

Le Luxembourg joue un rôle actif dans la normalisation technique de l'IA via divers comités européens et internationaux. Ces activités sont coordonnées par la Commission nationale de normalisation ILNAS/NSC 04 Intelligence Artificielle, une plateforme clé pour les acteurs du marché luxembourgeois afin de suivre et de contribuer aux activités de normalisation. En partageant

¹² La Cour de justice de l'Union européenne, la Cour des comptes européenne, la Banque européenne d'investissement, le Fonds européen d'investissement, le Mécanisme européen de stabilité, l'Office des publications de l'Union européenne, des parties de l'administration du Parlement européen, plusieurs unités de la DG DIGIT, de la DG CNECT et de la DG Santé de la Commission européenne

leur expertise, ils aident à façonner les normes mondiales de l'IA. Toute entité nationale intéressée peut inscrire des délégués pour participer aux efforts de normalisation.

La Commission participe activement aux travaux des comités techniques de normalisation suivants :

- **Le sous-comité ISO/IEC JTC 1/SC 42 Intelligence Artificielle** : Développe des normes pour l'IA et aborde les aspects technologiques : terminologie ; cadre d'apprentissage automatique ; gouvernance et systèmes de gestion de l'IA ; données ; fiabilité ; cas d'utilisation et applications ; caractéristiques des systèmes et algorithmes pour la mise en œuvre de l'IA.
- **Le Comité technique conjoint 21 (JTC 21) de CEN-CENELEC** : Joue un rôle clé dans le développement de normes pour l'IA qui soutiennent la mise en œuvre de l'AI Act de l'UE, alignant les systèmes d'IA avec les valeurs et les droits européens. Il se concentre sur la création de normes répondant aux besoins du marché et de la société. En développant des normes harmonisées, telles que le cadre de confiance et la gestion des risques de l'IA, le JTC 21 aide les entreprises à se conformer à l'AI Act. Le groupe de travail 2 du JTC 21 est présidé par un représentant du Luxembourg et couvre les risques liés à l'IA, la gestion de la qualité et l'évaluation de la conformité de l'IA.
- **Le Groupe de spécification de l'industrie pour la sécurisation de l'intelligence artificielle (TC SAI)** de l'ETSI (Institut européen des normes de télécommunications) : Développe des spécifications techniques qui aident à atténuer les menaces pour les systèmes d'IA, tant de la part d'autres systèmes d'IA que de sources conventionnelles.
- **L'UIT-T** : Considère l'utilisation et l'impact de l'IA dans différents domaines et fournit des recommandations dédiées, principalement par le biais de groupes de travail.

> Action 30 : Participation aux forums internationaux liés à l'IA

Le Luxembourg participe activement aux groupes de travail sur la politique numérique de l'OCDE et aux **réunions d'experts de l'AIGO (Artificial Intelligence Governance)**. L'OCDE a établi et aidé à mettre en œuvre les Principes de l'IA de l'OCDE, les premières normes internationales pour une IA responsable.

Le Luxembourg est également membre du Partenariat mondial sur l'intelligence artificielle (GPAI) pour promouvoir une IA centrée sur l'humain, sûre et digne de confiance, conformément aux Principes de l'IA de l'OCDE. Étant donné l'impact transversal et mondial de l'IA, le GPAI favorise la coopération internationale et les synergies avec l'OCDE pour relever les défis de gouvernance et aligner les initiatives en matière d'IA.

Partie 3. Secteurs à haut impact

Transformer le statu quo grâce à la technologie de l'IA

Après avoir analysé les leviers clés qui permettront l'accélération de l'adoption de l'IA au Luxembourg, l'attention se porte désormais sur les secteurs à fort impact dans lesquels l'IA apportera des changements significatifs. À mesure que l'IA continue d'évoluer, son potentiel transformateur devient de plus en plus évident. Ce chapitre explore quatre secteurs clés : l'administration publique, la finance, la santé et la culture.

Administration publique : promouvoir l'adoption de l'IA de confiance

Accélérer l'adoption de l'IA au sein de l'administration publique

La compétitivité d'une nation dépend de l'efficacité de son administration publique et de la disponibilité de services de qualité et accessibles aux citoyens et aux entreprises. Le déploiement progressif de l'IA est en cours dans l'ensemble du gouvernement luxembourgeois, ce qui a un impact sur la gestion interne quotidienne et les services publics.

Principes clés pour le développement de l'IA dans le secteur public

1. Centrés sur l'humain

Les modèles de l'IA du secteur public doivent être au service des citoyens, respectant l'intérêt public et les droits fondamentaux. Leurs succès reposent sur des méthodes de contrôle efficaces et l'atténuation des risques.

2. Performance et durabilité

L'IA devrait permettre d'améliorer continuellement les performances de l'ensemble de l'administration publique. Elle permet une meilleure organisation/gestion interne (G2G) et améliore la réactivité et la fiabilité au service des entreprises et des citoyens (G2B et G2C).

3. Transparence et traçabilité

L'IA améliore la prise de décision politique en exploitant les données, les analyses et une information étendue et objective. Cependant, pour maintenir la confiance, il est essentiel de pouvoir démontrer le raisonnement derrière ces décisions, en particulier celles soutenues par des systèmes d'apprentissage profond.

4. Inclusion

Les applications de l'IA favorisent une approche numérique dès la conception et permettent d'adapter les services publics à la diversité de la population. Il est essentiel d'éviter de manière proactive toute discrimination dans l'accès, l'utilisation, la compréhension, etc., des services publics. Tout agent public qui développe ou sélectionne des systèmes de l'IA doit donc être formé aux pratiques d'application non discriminatoires de l'IA.

5. Gouvernance, éthique et réglementation

Un système de gestion des risques doit être mis en place pour aider les agents de l'État à concevoir et à intégrer des systèmes de l'IA non discriminatoires, conformément à l'AI Act. Une approche de gouvernance multidisciplinaire et interministérielle, faisant appel à des compétences juridiques, techniques et éthiques, permettra d'accompagner les professionnels dans le développement, l'application et l'analyse de l'IA.

Objectifs pour l'adoption des modèles d'IA dans l'administration publique

Il est nécessaire de poursuivre des objectifs stratégiques spécifiques qui garantissent l'intégration efficace et responsable des modèles de l'IA dans l'administration publique. Ces objectifs visent à créer une administration proactive, axée sur les données et orientée vers la performance, dans le respect des principes éthiques et juridiques.

1. Améliorer l'expérience des citoyens

Les capacités de traitement du langage naturel de l'IA permettent de créer de nouveaux services publics qui améliorent la manière dont les citoyens interagissent avec les agents gouvernementaux. La communication est ainsi plus fluide, plus inclusive et plus personnalisée.

2. Optimiser l'efficacité des processus internes de l'État

En combinant les algorithmes LLM avec l'apprentissage automatique, l'IA offre un potentiel énorme pour l'analyse de grands ensembles de données, l'identification d'informations et la reconnaissance de structures. Elle est donc très efficace pour automatiser des tâches et optimiser des processus.

3. Affiner la prise de décision grâce à l'analyse des données

Les capacités d'analyse et de reconnaissance de schémas de l'IA peuvent être exploitées sur de grands ensembles de données, en dégagant des informations approfondies et en détectant des corrélations et des schémas que les humains ne remarquent pas.

4. Soutenir des projets innovants en matière de l'IA

Continuer le soutien financier et l'expertise pour les projets de l'IA via des initiatives telles que Tech-in-Gov et explorer de nouvelles technologies dérivées de l'IA.

5. Promouvoir le développement des compétences et le partage des connaissances

Partager les meilleures pratiques, offrir des formations de qualité, renforcer les capacités et les compétences en matière de données et de l'IA. Cela inclut le soutien aux projets et initiatives du Groupe de travail en science des données, tels que le « Guide de bonnes pratiques pour les scientifiques des données du secteur public ».

6. Soutenir les initiatives liées au développement de modèles dédiés à la langue luxembourgeoise

Veiller à ce que les solutions de l'IA soient efficaces, inclusives, culturellement pertinentes et répondent aux besoins uniques des citoyens du Luxembourg.

7. Créer un registre recensant les algorithmes de l'IA pour l'administration publique

Essentiel pour une utilisation éthique et responsable de l'IA, en renforçant la transparence, la responsabilité et la confiance des citoyens dans les systèmes de l'IA.

Établir les bases de l'IA auprès du CTIE

Le CTIE (Centre des technologies de l'information de l'État) est un partenaire de confiance pour les ministères et les administrations en matière de développement de solutions *eGovernment*. À mesure que l'IA a fait son apparition et a évolué, le CTIE a soutenu la mise en œuvre de projets intégrant des éléments de l'IA.

Le CTIE continuera de prendre les mesures nécessaires pour fournir **un environnement informatique favorable aux projets de l'IA** en intégrant les éléments essentiels de l'IA dans son infrastructure informatique et en établissant un cadre solide pour le développement et le déploiement de modèles de l'IA. Il veillera à ce que toutes les équipes gouvernementales disposent **des outils et du soutien** nécessaires pour intégrer efficacement l'IA dans leurs processus et services, offrant différents types de modèles de l'IA (par exemple, des modèles de recherche et des modèles génératifs) qui peuvent être combinés et ajustés pour répondre à des besoins spécifiques.

Le CTIE maintiendra sa **philosophie de normalisation** par le partage d'infrastructures, de plateformes et de méthodes de gestion de projet. Les clients auront la possibilité de réaliser leurs projets de manière indépendante ou en collaboration avec le CTIE. Grâce à cette approche normalisée, le CTIE garantit la conformité des projets aux réglementations nationales et européennes, ainsi que le respect des exigences en matière de sécurité informatique et d'interopérabilité.

Offrir des assistants intelligents basés sur l'IA pour la productivité

La croissance des modèles linguistiques avancés a popularisé les assistants intelligents en ligne faciles à utiliser, mettant en évidence le potentiel de l'IA auprès du grand public. Dans le secteur public, ces assistants peuvent simplifier l'acquisition de connaissances, résumer des textes complexes, générer des contenus, suggérer des textes pour les réseaux sociaux et permettre une communication multilingue fluide.

Le CTIE propose des assistants intelligents dans son catalogue de services pour deux raisons principales :

- Les assistants intelligents disponibles gratuitement sur le Web présentent des risques importants pour la sécurité des données sensibles. En revanche, les assistants intelligents proposés dans le cadre du catalogue de services du CTIE fonctionnent dans un cadre contractuel entre le fournisseur et

le CTIE, ce qui garantit une plus grande sécurité et confidentialité des données.

- Ces assistants sont faciles à utiliser et dotés d'interfaces en langage naturel qui aident les employés, même les moins habitués aux outils numériques, à s'adapter progressivement aux technologies de l'IA. Cette approche facilite la transition vers des pratiques modernes.

Centre de compétences en IA pour le secteur public

Le CTIE a récemment établi un centre de compétence en IA pour le secteur public. Au-delà de la définition et de la mise en œuvre de l'architecture et des outils nécessaires à l'adoption de l'IA, il met l'accent sur la veille technologique, la collaboration interdisciplinaire, la formation et le mentorat pour faciliter l'adoption de l'IA au sein des autres équipes du CTIE. Ces équipes peuvent bénéficier directement de la technologie ou collaborer sur des projets d'IA pour des clients. Le centre de compétence permettra une adoption généralisée et rapide de l'IA dans le secteur public.

Cas d'usage :

Exploiter l'IA générative pour soutenir la diplomatie économique du Luxembourg

Cette initiative vise à exploiter de manière sécurisée et éthique l'IA générative fiable (RAG (Retrieval Augmented Generation) et IA souveraine) pour **améliorer la diplomatie économique du Luxembourg et façonner sa stratégie internationale** future à travers une approche intégrée « Team Luxembourg ».

Offrir des **résultats mesurables**, suivre les progrès et améliorer l'allocation des ressources pour garantir un impact plus important sur les marchés prioritaires, telle est l'ambition de la Direction de la Promotion du Commerce Extérieur et des Investissements (MFEA D8), qui joue un **rôle essentiel dans la définition et la conduite de la diplomatie économique du Luxembourg**. La préparation des dossiers se fait en étroite collaboration avec d'autres ministères et parties prenantes clés : l'outil mis en place pourra être un support indéniable dans ces préparations.

Finance : appliquer l'IA à travers l'écosystème

L'IA au cœur de l'innovation financière

L'écosystème financier du Grand-Duché, déjà reconnu pour son expertise réglementaire, sa mise en œuvre rapide et son expérience transfrontalière, a la possibilité d'améliorer considérablement son avantage concurrentiel grâce à l'adoption stratégique de l'IA dans des domaines tels que la conformité réglementaire, la gestion des risques et les services aux clients. Tant le régulateur que le ministère des Finances s'orientent vers la mise en œuvre de l'IA pour pouvoir montrer l'exemple.

Application de l'IA auprès des autorités financières publiques

En décembre 2024, la **CSSF (Commission de Surveillance du Secteur Financier)**, le régulateur financier, est devenue un client de lancement d'un cloud souverain déconnecté. Cela aide à améliorer

son efficacité et à agir en tant qu'agent d'innovation pour l'écosystème. Avec un projet phare et une action concrète dans cette stratégie, développés par le LHoFT, l'écosystème financier du Luxembourg a l'opportunité de profiter de cette stratégie sectorielle.

Plusieurs départements du ministère des Finances explorent ou mettent déjà en œuvre des projets de l'IA. Les avantages potentiels de l'IA sont particulièrement significatifs pour ces départements en raison de leur grande taille et de leur gestion extensive des données :

- **Administration du Cadastre et de la Topographie**

Responsable de fournir des données géographiques essentielles au développement territorial et au fonctionnement du marché immobilier, l'Administration du Cadastre et de la Topographie met actuellement en œuvre deux projets de l'IA :

- EXTIOPIA a démontré avec succès la faisabilité de l'utilisation de l'apprentissage profond pour extraire des objets topographiques, en particulier des bâtiments, à partir d'images aériennes. Cette technologie est désormais utilisée pour les mises à jour récurrentes des bases de données des bâtiments.
 - UrbIA vise à automatiser la transcription des anciens livres cadastraux manuscrits. Ce projet permettra un accès plus facile aux titres de propriété datant d'avant 1972 et améliorera l'efficacité des recherches.
- **Administration des Contributions Directes du Luxembourg**

Intègre stratégiquement l'IA dans ses initiatives de transformation numérique. Une équipe spécialisée développe activement des modèles de l'IA, en s'inspirant des pratiques des autorités fiscales internationales. Les projets actuels sont catégorisés en intelligence de la population fiscale (pour la prévision et la simulation), détection de la non-conformité et de la fraude, et modèles opérationnels utilisant l'IA générative. Bien que les applications initiales soient principalement internes, l'administration prévoit d'étendre les capacités de l'IA aux services destinés au public, tels qu'un chatbot.
 - **Administration des Douanes et Accises**

L'administration met actuellement en œuvre le projet LUCCS, une solution informatique complète visant à faciliter le commerce international et à renforcer la position du Luxembourg en tant que hub logistique européen. LUCCS a intégré diverses fonctions pour la gestion des risques, les inspections sur site et le suivi après dédouanement. La prochaine phase consiste à ajouter une couche exploratoire pour optimiser les processus de gestion des risques et améliorer la précision du ciblage des expéditions à haut risque.
 - **Administration de l'Enregistrement, des Domaines et de la TVA**

Développe en ce moment trois projets de l'IA pour optimiser les processus administratifs, réduire les erreurs humaines, accélérer la prise de décision et poser les bases de l'automatisation future de l'analyse des documents :

 - Déploiement d'un chatbot pour faciliter la recherche d'informations à partir de sources fiscales et non fiscales. Le chatbot fournira aux employés des résumés concis et des liens pertinents, permettant de gagner du temps et d'améliorer l'efficacité.

- SmartRetrieve, un outil innovant de recherche d'informations conçu pour aider les agents de la taxe d'abonnement à traiter les documents des fonds d'investissement collectifs. Il rationalise le processus d'analyse en fournissant des réponses contextuelles et des extraits de documents, permettant aux agents de se concentrer sur des tâches à plus forte valeur ajoutée et d'améliorer la précision des vérifications.

- **Inspection Générale des Finances (IGF)**

L'IGF a mené une étude pour explorer les avantages potentiels, les défis et les risques associés à l'utilisation de l'IA dans ses opérations et a identifié plusieurs bénéfices. Les cas d'utilisation spécifiques incluent l'automatisation de la préparation et du suivi du budget, la mise en œuvre d'assistants virtuels, l'analyse des données liées à la préparation du budget et l'utilisation de l'analyse prédictive. Les prochaines étapes de l'IGF consisteront à créer une feuille de route pour la mise en œuvre de l'IA, à préparer son infrastructure technologique et à développer un catalogue de données.

- **Trésorerie de l'État**

Comme l'IGF, la Trésorerie de l'État vise à inclure l'IA dans ses projets de numérisation, en mettant particulièrement l'accent sur l'automatisation de la gestion des dossiers au sein de la Caisse de consignation, ainsi que sur la gestion des risques, la détection des fraudes pour les transactions de paiement, et la surveillance globale des opérations et des rapports.

Législation et réglementation de l'IA

L'intégration de l'IA dans les services financiers améliore la prise de décision, l'efficacité opérationnelle, la gestion des risques et l'expérience du client. C'est crucial d'avoir une gestion des défis tels que la conformité, la connaissance du client (KYC), la confidentialité des données et les biais algorithmiques. Le rôle du secteur financier dans le financement des innovations en IA souligne son importance dans la promotion du progrès économique et technologique.

Cependant, à mesure que l'IA évolue, la réglementation doit également évoluer. Le ministère des Finances surveille de près la législation européenne sur l'IA pour garantir la conformité. Bien que le Luxembourg ait choisi de ne pas introduire de réglementations nationales spécifiques sur l'IA pour le secteur financier, l'alignement sur les normes européennes est essentiel pour maintenir un environnement compétitif et conforme.

Action: Évènement « AI for FinTech »

À partir de 2026, une conférence annuelle sur le thème de l'IA dans la FinTech représentera un développement crucial dans la stratégie plus large de l'IA du pays, spécifiquement conçue pour accélérer l'adoption au sein de son secteur des services financiers. En tant qu'initiative clé, l'évènement réunira les institutions financières établies du Luxembourg, les innovateurs émergents de la FinTech et les experts internationaux en IA pour favoriser la collaboration et l'échange de connaissances. La forme de la série d'évènements sera conçue par le LHoFT, sous la direction stratégique du ministère des Finances.

En connectant les forces traditionnelles du secteur bancaire du Luxembourg avec les capacités de pointe de l'IA, le pays vise à se positionner à l'avant-garde de l'adoption responsable de l'IA dans les services financiers. Cela représente une évolution naturelle pour le marché financier luxembourgeois, qui a constamment démontré son adaptabilité à travers diverses transformations du marché tout en maintenant sa réputation de stabilité et de sécurité dans le domaine des services financiers hautement réglementés.

Santé : rendre la médecine personnalisée une réalité à travers l'IA

Personnaliser les soins, transformer les vies

L'écosystème de la santé englobe l'ensemble des activités contribuant à l'amélioration et à la préservation de la santé. Même s'il inclut les professionnels de santé, les hôpitaux, les entreprises pharmaceutiques et de dispositifs médicaux, ainsi que les décideurs politiques et les patients, il est en réalité bien plus vaste. Il s'étend également à des domaines tels que la recherche universitaire, l'innovation industrielle, les technologies de l'information et le droit. Les grandes avancées dans ces domaines ont un impact significatif sur l'écosystème de la santé. Les progrès de l'IA sont peut-être les plus remarquables.

La stratégie du Luxembourg pour la santé

L'objectif ultime de la stratégie de l'IA en santé est d'améliorer la santé humaine en renforçant la prévention et les soins. La **médecine de précision basée sur l'IA**, également appelée **médecine personnalisée**, constitue une avancée majeure dans la prévention et le traitement. Son but est d'adapter ces derniers aux spécificités génétiques, environnementales et comportementales de chaque individu.¹³

Les instituts de recherche exploitent l'IA pour analyser des données biomédicales à grande échelle, offrant ainsi une meilleure compréhension des maladies complexes, l'identification de biomarqueurs, la prédiction de l'évolution des pathologies et l'adaptation des traitements aux profils individuels des patients.

Cette avancée est en partie rendue possible grâce à l'infrastructure de calcul haute performance du Luxembourg, qui permet aux chercheurs et aux établissements de santé de traiter de vastes quantités de données médicales de manière sécurisée et efficace, facilitant ainsi le développement de modèles de l'IA appliqués à la génomique, à l'épidémiologie et à la découverte de médicaments.

La médecine de précision nécessite de vastes quantités de données, et en tant que petit pays, le Luxembourg a beaucoup à gagner en s'intégrant dans des initiatives paneuropéennes. La participation à l'Espace européen des données de santé (EHDS) et à des initiatives internationales telles que l'initiative 1+ Million Genomes et le Genome EDIC, sera essentielle pour accéder à des données de haute qualité et mettre en commun des ressources afin d'optimiser les coûts.

Les startups et les entreprises établies au Luxembourg investissent de plus en plus dans les solutions de santé basées sur l'IA, allant des dispositifs portables aux plateformes exploitant le traitement du langage naturel pour la gestion des dossiers médicaux.

Mission

La stratégie de l'IA pour la santé inclut un **cadre de préparation à l'intégration de l'IA dans l'écosystème de santé** au Luxembourg. Elle propose une feuille de route favorisant des contributions coordonnées et proactives des parties prenantes, tout en renforçant les capacités techniques et analytiques essentielles à l'amélioration continue. Les facteurs clés pour la préparation à l'IA au Luxembourg incluent la

¹³ Jørgensen JT. Twenty Years with Personalized Medicine: Past, Present, and Future of Individualized Pharmacotherapy. *Oncologist*. 2019 Jul;24(7):e432-e440. doi: 10.1634/theoncologist.2019-0054. Epub 2019 Apr 2. PMID: 30940745; PMCID: PMC6656435.

préparation numérique, l'accès au marché, la recherche et l'éducation, l'innovation, la législation, l'engagement des parties prenantes et l'engagement international.

Vision

Le Luxembourg deviendra un pionnier européen de la santé numérique, intégrant l'IA de façon transparente dans toutes les composantes de ses systèmes de santé. Le pays se positionnera à l'avant-garde de la prévention des maladies et des traitements de précision, et s'établira comme **un centre économique majeur de la santé numérique en Europe**.

Objectifs

- (1) Identifier les facteurs clés – qu'ils relèvent des secteurs, des disciplines ou des acteurs – qui jouent un rôle essentiel dans la préparation du Luxembourg à l'adoption de l'IA.
- (2) Créer un cadre de préparation à l'IA pour son intégration dans les soins de santé.
- (3) Identifier les lacunes et les problèmes empêchant l'intégration de l'IA dans l'écosystème de la santé.
- (4) Développer un cas de test qui définit et traite les éléments essentiels à l'adoption complète de l'IA dans le système de santé.

Principes directeurs

- (1) Le Luxembourg vise à élaborer des lignes directrices et des cadres à long terme conçus pour être prêts pour l'IA dès leur adoption.
- (2) Le cadre sera applicable quel que soit le secteur ou le niveau de maturité.
- (3) L'IA sera développée et déployée selon les principes d'une IA digne de confiance, garantissant transparence, explicabilité, robustesse et respect de la confidentialité des données.

Les éléments contribuant au cadre de préparation à l'IA du Luxembourg sont également des points focaux d'autres politiques et stratégies gouvernementales. Les actions menées dans ces domaines viendront à soutenir et compléter les lacunes identifiées ci-dessus.

1) Stratégie numérique pour les données de santé :

Le règlement relatif au EHDS¹⁴ sera au cœur de la nouvelle stratégie numérique pour les données de santé, développée par le ministère de la Santé et de la Sécurité sociale du Luxembourg. Cette stratégie vise à mettre le patient au contrôle de ses données de santé et au cœur du système de soins afin d'assurer des soins qualitatifs, intégrés et multidisciplinaires. Elle établira des cadres favorisant l'adoption de technologies numériques innovantes dans le domaine de la santé, répondant aux besoins des patients et des professionnels de santé.

2) Stratégie nationale en matière de données :

L'utilisation des données du secteur public inclut le développement de systèmes qui soutiennent la santé de chaque individu et la création d'un environnement économique attractif pour les innovateurs.

3) Organismes d'accès aux données de santé (HDAB-LU) :

Dans le cadre du règlement EHDS encadrant l'utilisation secondaire transfrontalière des données, chaque État membre de l'UE devra être connecté à l'infrastructure européenne HealthData@EU et mettre en place des organismes nationaux offrant des services de gestion des données et des environnements de traitement sécurisés aux utilisateurs et détenteurs de données.

4) L'initiative 1+Million Genomes : Soutenue par des projets de l'UE depuis 2018, l'initiative 1+MG cherchera à créer un espace de données formel pour la collecte, la curation et le partage de données génomiques et phénotypiques, afin de permettre de nouvelles recherches et des soins de santé personnalisés basés sur le génome, entièrement intégrés à l'EHDS.

¹⁴ Règlement (UE) 2025/327 du Parlement européen et du Conseil du 11 février 2025 relatif à l'espace européen des données de santé et modifiant la directive 2011/24/UE et le règlement (UE) 2024/2847

Culture : vecteurs d'intégration, de créativité et d'inclusion

Rencontre entre l'IA et l'imagination

Les arts et la culture ont appris à la société comment faire face aux défis communs par une pensée inclusive et critique. Tout comme les bibliothèques, les espaces culturels donnent naissance à des débats, des interactions humaines et à l'engagement civique. Le secteur culturel offre une approche fondée sur l'humain et les valeurs, qui peut apporter un équilibre à l'IA et à l'automatisation, en veillant à ce que la technologie reste au service de l'humanité.

Une approche fondée sur les valeurs

La **stratégie culturelle en matière de l'IA** vise à établir un cadre pour les applications et les développements de l'IA, afin de le rendre accessible aux entités publiques et privées. L'ambition est de positionner le secteur culturel non seulement comme utilisateur des technologies de l'IA, mais aussi comme acteur impliqué dans le développement de solutions adaptées à ses besoins et à ses valeurs.

La **mission du ministère de la Culture** est d'élaborer des cadres politiques favorisant la durabilité et la confiance, tout en conciliant le rythme rapide des avancées technologiques avec la cadence souvent plus lente de leur adoption. L'objectif est d'encourager la créativité, l'inclusion, le développement des compétences, la culture numérique et la pensée critique, tout en sensibilisant le public aux défis potentiels.

Protection des créateurs et des utilisateurs

L'IA doit être non seulement accessible et intuitive pour le marché, mais aussi adaptée aux créateurs et utilisateurs. Pour accompagner la transition numérique du secteur créatif, il est essentiel de prendre en considération la législation existante en matière de droits d'auteur et droits voisins pour valoriser les compétences créatives.

Une **approche centrée sur l'humain** devrait être associée à une **approche centrée sur les créateurs**, en mettant l'accent sur les droits d'auteur et les droits voisins, le principe de rémunération appropriée et proportionnée et la valeur des matières premières créatives. Une approche centrée sur les créateurs prend en compte à la fois l'impact de la culture sur l'IA et celui de l'IA sur les créateurs et les institutions culturelles.

La mission des institutions du patrimoine culturel a toujours été de préserver l'intégrité des données en

s'appuyant sur une chaîne de conservation fiable, garantissant ainsi leur provenance et leur authenticité. Dans une économie fondée sur les données, les compétences, les infrastructures et les processus développés dans le secteur du patrimoine culturel représentent des atouts majeurs.

Ces institutions contribuent aux efforts nationaux, notamment : (1) par leur expertise en gestion des flux de travail et des données fiables, et (2) par leurs vastes volumes de données pouvant servir à l'entraînement des modèles de l'IA. Les acteurs de ce secteur doivent être reconnus non seulement comme des utilisateurs des technologies de l'IA, mais aussi comme de précieux acteurs impliqués dans le développement de solutions.

Points d'actions :

- Répondre à la complexité de l'IA par une approche transversale, adaptée aux créateurs et aux utilisateurs.
- Reconnaître les institutions du patrimoine culturel comme des atouts et des partenaires clés dans le développement d'un écosystème de l'IA, en les positionnant comme un terrain d'expérimentation pour explorer l'éthique, la gouvernance et la transparence.
- Maintenir un cadre équilibré de la propriété intellectuelle et poursuivre les activités de sensibilisation à travers les services de l'IPIL concernant l'IA et la propriété intellectuelle.
- Élaborer des politiques en matière de droits comme première étape vers une réglementation et une plus grande transparence sur la réutilisation des données du patrimoine culturel pour l'entraînement des modèles de l'IA.

L'IA comme outil au service des créateurs

L'IA générative fait désormais partie de la vie quotidienne. Elle doit être considérée comme un **facilitateur plutôt qu'une menace pour la création artistique** : l'IA améliore plutôt qu'elle ne remplace les capacités humaines. Ces outils ouvrent la voie à de nouvelles méthodes de génération et de partage d'idées, ainsi qu'à une plus grande précision. La maîtrise de ces technologies est essentielle. À l'échelle de l'UE, des initiatives spécifiques devraient combler le déficit actuel en matière d'éducation aux médias, en privilégiant une approche multipartite pour un impact plus inclusif.

Points d'actions :

- Intégrer la langue luxembourgeoise aux plateformes de l'IA générative, qui nécessitent un minimum de deux millions de mots. Les institutions culturelles pourraient contribuer à cet effort, à condition qu'elles disposent d'abord des moyens nécessaires pour renforcer leur maturité numérique.
 - À noter que le ministère de la Culture et le Zenter fir d'Lëtzebuenger Sprooch participent et apportent leur soutien au projet ALT-EDIC, qui vise à développer de grands modèles de langage (LLM) pour le Luxembourg.
- Réduire l'écart entre l'évolution rapide des technologies et leur adoption plus lente.
- Donner la priorité aux catalogues de formation et aux programmes de perfectionnement qui tiennent compte des besoins du secteur et y répondent.

Inclusion et éducation

L'IA peut favoriser l'inclusion, en particulier pour les personnes neurodivergentes ou en situation de handicap. Au Luxembourg, certaines entreprises ont lancé des projets illustrant comment l'IA est capable de renforcer l'autonomie de ces communautés. Par exemple, les institutions du patrimoine culturel pourraient exploiter les technologies immersives, telles que la réalité virtuelle et l'IA, pour rendre leurs collections plus accessibles et inclusives. En collaboration avec les musées, des partenariats pourraient être mis en place afin de créer des espaces de réalité virtuelle dédiés, garantissant un accès équitable aux collections et aux installations artistiques pour les personnes en situation de handicap. À terme, cette initiative pourrait servir de base à une stratégie publique plus large.

La culture comme moteur de l'innovation

Les créateurs ont toujours été des pionniers dans l'adoption des technologies émergentes. L'État joue un rôle clé dans l'accompagnement de l'évolution du secteur créatif et le développement de nouvelles compétences. Il occupe une position unique pour absorber certains coûts et offrir un espace d'expérimentation, de recherche et de développement. La mise en place de pôles d'innovation internes et la promotion d'une culture de l'essai et de l'erreur redéfinissent le rôle du gouvernement, qui ne se limite plus à un simple organe administratif, mais devient un véritable facilitateur de la cocréation transversale.

L'IA comme outil de développement linguistique et de multiculturalisme

Zenter fir d'Lëtzebuenger Sprooch (Centre pour la langue luxembourgeoise)

En tant qu'environnement hautement multilingue, le Luxembourg est un cadre idéal pour faire progresser les technologies de l'IA qui reflètent un monde multilingue, tout en soutenant activement la croissance et la durabilité de la langue luxembourgeoise.

Le Zenter fir d'Lëtzebuenger Sprooch (ZLS) est bien placé pour guider ces efforts, grâce à son expertise en luxembourgeois et en développement technologique linguistique. Grâce à ce travail, le Luxembourg peut démontrer comment les langues minoritaires peuvent prospérer grâce au développement éthique des ensembles de données, des modèles et des technologies. De cette manière, l'IA soutient à la fois les langues mondiales ainsi que celles qui sont centrales à l'identité et au patrimoine culturels.

Points clés :

- Dès le départ, les systèmes de l'IA doivent être développés pour fonctionner de manière transparente entre les langues, reflétant la réalité linguistique quotidienne du Luxembourg et établissant une norme pour une technologie inclusive et adaptable.
- Le développement durable de l'IA repose sur des ensembles de données publics partagés et de haute qualité, ainsi que sur des outils qui garantissent un accès équitable et des avantages à long terme pour toute la communauté linguistique.
- L'IA doit contribuer non seulement aux besoins de communication, mais aussi à la préservation, à l'évolution et à l'enrichissement de l'identité culturelle par le biais de la langue.
- En travaillant ensemble avec d'autres régions, institutions et communautés confrontées à des défis similaires, le Luxembourg peut jouer un rôle dans le développement de solutions partagées pour les langues petites et/ou peu dotées en ressources.

Partie 4.

Projets phares

Administration publique : Modèle linguistique juridique large du Luxembourg (4LM)

Le projet 4LM vise à développer un grand modèle de langage (LLM) spécialisé dans les textes juridiques luxembourgeois. Un LLM spécifique à un domaine améliorera l'efficacité juridique et réglementaire, au profit des institutions gouvernementales, des professionnels du droit, du système judiciaire et des entreprises. Le public aura également accès à des outils de l'IA, tels que des chatbots et la traduction automatique, améliorant ainsi l'accès à l'information juridique. Les entreprises bénéficieront d'outils basés sur l'IA qui les aideront à se conformer à un corpus de plus en plus complexe de contraintes légales et réglementaires, augmentant ainsi leur productivité grâce à une automatisation des processus de conformité pilotée par l'IA.

Ce projet s'aligne sur les objectifs de transformation numérique du Luxembourg, renforçant sa position dans la gouvernance et l'innovation juridique pilotées par l'IA.

Le contexte du projet 4LM se concentre sur le développement et le déploiement d'un grand modèle de langage (LLM) spécifiquement adapté aux processus législatifs, juridiques et réglementaires au Luxembourg. Ce projet se situe à l'intersection de l'innovation en matière de l'IA, de la transformation numérique et de la modernisation de l'administration publique. Il s'aligne avec les stratégies nationales et européennes visant à améliorer la gouvernance numérique tout en répondant aux défis sociétaux, économiques et sécuritaires critiques.

Voici une répartition détaillée du contexte :

Pour le grand public :

- Améliorer la compréhension, l'accessibilité et l'inclusivité de la législation.
- Rendre les textes législatifs actuellement en vigueur disponibles dans le plus grand nombre de langues possible pour répondre aux besoins d'un public multiculturel et multilingue.
- Produire des résumés «compréhensibles» pour les citoyens (Einfach Sprooch).

Pour l'administration gouvernementale et les professionnels du droit :

- Identifier les besoins législatifs et les cas d'utilisation du LLM, en particulier pour la rédaction et la conformité aux lois européennes.
- Former un LLM luxembourgeois pour une interprétation précise des textes législatifs.
- Assurer l'interopérabilité avec les plateformes numériques gouvernementales pour améliorer la coopération.

Pour les entreprises :

Les entreprises cherchent de plus en plus à naviguer dans les exigences réglementaires croissantes aux niveaux national et européen. Assurer la conformité peut être complexe, en particulier pour les PME, et peut affecter la productivité. Le projet 4LM vise à fournir une solution en développant des outils spécialisés pilotés par l'IA, conçus pour rationaliser et automatiser les processus de conformité, aidant ainsi les entreprises à remplir leurs obligations de manière plus efficace et efficiente.

Finance : Le Centre d'expérience IA au sein du LHoFT

Le Luxembourg est un centre financier européen de premier plan, avec des priorités stratégiques axées sur la transformation numérique, l'innovation et la durabilité. Cependant, l'adoption de technologies avancées telles que l'IA reste naissante dans de nombreuses institutions. Le Centre d'expérience IA répond à cela en abaissant les barrières à l'expérimentation et à l'adoption, aidant les institutions financières à comprendre et à intégrer l'IA dans des conditions sécurisées et souveraines.

Le LHoFT joue un rôle clé dans l'écosystème des services financiers du Luxembourg en catalysant l'adoption précoce des technologies de pointe. Le Centre d'expérience IA, une expérience physique au sein des bureaux en expansion du LHoFT au cœur de la ville de Luxembourg, activera l'engagement du secteur financier envers l'IA. Il vise à soutenir la compétitivité future du secteur et à consolider le Luxembourg en tant que hub de premier plan pour l'innovation en finance numérique.

LuxProvide apporte son superordinateur MeluXina et son expertise en calcul haute performance, essentiels pour gérer des ensembles de données étendus et exécuter des modèles de l'IA sophistiqués. La Fondation LHoFT apporte son vaste réseau au sein de l'écosystème FinTech et sa compréhension des réglementations financières et des dynamiques de marché. Cette combinaison unique garantit que le Centre d'expérience IA sera à la fois technologiquement avancé et parfaitement adapté aux défis, besoins et opportunités spécifiques du secteur financier.

Les objectifs du Centre d'expérience IA :

- **Manifester le potentiel de l'IA dans la finance.** Montrer comment l'IA peut être utilisée pour améliorer les services financiers en améliorant les processus de prise de décision, en augmentant l'efficacité opérationnelle et en fournissant des solutions de gestion des risques supérieures.
- **Faciliter l'innovation et l'adoption de la technologie.** Accélérer l'adoption des technologies de l'IA dans le secteur financier luxembourgeois en offrant des expériences pratiques, des démonstrations et des histoires de réussite.
- **Renforcer la collaboration entre la technologie et la finance.** Encourager et renforcer la collaboration entre les fournisseurs de technologies, les institutions financières et les organismes de réglementation en créant un environnement qui encourage le dialogue et le partenariat.
- **Éduquer et former les professionnels du secteur.** Développer et proposer des programmes éducatifs et des ateliers qui forment les professionnels du secteur financier aux dernières technologies de l'IA et à leurs applications.

Ce projet phare est conçu pour évoluer en étroite collaboration avec le programme AI Factory du gouvernement, agissant à la fois comme un mécanisme d'admission et une interface d'engagement du marché pour les solutions de l'IA issues du pipeline national d'innovation. En exposant les institutions financières à des applications réelles de l'IA et en facilitant l'expérimentation, le Centre aidera à identifier des cas d'utilisation viables et évolutifs qui pourront être davantage industrialisés dans le cadre de l'AI Factory. Inversement, il mettra en valeur les résultats de l'AI Factory, créant un démonstrateur public des capacités d'innovation en IA du Luxembourg.

Médecine de précision : L'IA prête pour la médecine de précision

Le Luxembourg fera progresser sa stratégie de santé numérique en intégrant l'IA et les données de santé pour soutenir la médecine de précision. Il s'agira de passer d'un modèle réactif à un système proactif qui exploite les données génomiques et cliniques. Cette nouvelle approche reposera sur une boucle continue de recherche, de déploiement et de perfectionnement, axée sur l'intégration des données cliniques, une infrastructure robuste, du personnel qualifié, la conformité légale et l'engagement des citoyens. S'appuyant sur 15 années d'investissements significatifs dans la recherche biomédicale, essais cliniques et initiatives de données de santé à grande échelle, le Luxembourg donnera la priorité à ces domaines pour améliorer l'interopérabilité et soutenir la prise de décision fondée sur des preuves.

Ce projet sera un catalyseur de cette évolution en développant l'infrastructure nécessaire et des outils basés sur l'IA pour personnaliser les traitements. Il s'appuiera sur plusieurs initiatives clés telles que le projet 1+Million Genomes/Genome EDIC, l'Espace européen des données de santé (EHDS) et des actions pour éliminer les décès évitables dus au cancer et dus aux maladies neurodégénératives. De plus, il tirera parti de l'expertise nationale actuelle en analyse multimodale basée sur l'IA pour personnaliser les traitements pour des conditions telles que la sclérose en plaques, la polyarthrite rhumatoïde, le cancer et les maladies neurodégénératives, incarnant la philosophie du «bon médicament pour le bon patient». Étendre ces efforts au-delà de la recherche nécessitera de relever des défis en matière de gouvernance des données, d'interopérabilité, de voies d'accès au marché et d'engagement public. Le projet visera à minimiser les décès évitables pour les cas de cancer et de maladies neurodégénératives grâce à la prévention, à la détection précoce et les thérapies personnalisées. La médecine de précision nécessitera des quantités de données considérables, et le Luxembourg bénéficiera grandement de sa participation aux efforts paneuropéens.

L'initiative 1+Million Genomes, soutenue par des projets de l'UE, cherchera à créer un espace de données formel pour la collecte, la curation et le partage des données génomiques à travers l'Europe. Cela permettra de nouvelles recherches et des soins de santé personnalisés basés sur le génome. En 2025, une nouvelle entité juridique, le Genome EDIC, prendra en charge les opérations principales de l'initiative 1+MG, et le Luxembourg sera bien positionné pour en être l'hôte.

Le projet phare de l'IA en santé sera construit sur une stratégie intégrale de données de santé et un cadre de maturité en IA qui couvrent l'ensemble du parcours du patient, avec une amélioration continue de l'IA grâce aux retours cliniques. L'infrastructure numérique avancée du Luxembourg, y compris le superordinateur MeluXina et le futur ordinateur quantique MeluXinaQ, soutiendra la recherche en IA dans des domaines tels que la génomique, le cancer, les maladies neurodégénératives et la découverte de médicaments. De plus, l'AI Factory accélérera le développement, améliorant ainsi le rythme de l'innovation.

Cette approche apportera un avantage clair pour les patients :

- **Elle améliorera les résultats pour les patients et soutiendra les prestataires de soins de santé en rationalisant la prise de décision et les flux de travail, assisté par des outils tels que des scribes IA pour la saisie de données standardisée.**

Néanmoins, des défis en matière de gouvernance des données, d'interopérabilité, de voies d'accès au marché et d'engagement du public devront être résolus pour étendre ces efforts de manière efficace. Le règlement EHDS favorisera l'échange de données de santé électroniques à travers l'Europe, en alignement avec les objectifs pan-européens du Luxembourg. Grâce à ces investissements stratégiques, le Luxembourg visera à se positionner en tant que leader dans l'innovation en santé alimentée par l'IA.

Marché du travail : Perspectives sur les compétences alimentées par l'IA

Le Luxembourg fait face à des défis spécifiques dans l'exploitation des données sur les compétences en raison de son marché du travail diversifié, multilingue et très dynamique. La stratégie des compétences de l'OCDE¹⁵ a mis en évidence des lacunes cruciales dans la qualité des données sur les compétences existantes au Luxembourg, notamment des données incomplètes (par exemple, limitées aux résidents luxembourgeois), des données incorrectes (par exemple, des erreurs dans les professions déclarées à la sécurité sociale), des données obsolètes (par exemple, des enquêtes périodiques, espacées de plusieurs années), des détails insuffisants (par exemple, des données sur les catégories de professions et non sur les compétences détaillées), et un manque d'interopérabilité (différentes classifications utilisées entre les administrations).

Ces défis signifient qu'il est actuellement impossible de dire combien de personnes travaillent dans une profession donnée au Luxembourg, sans même évoquer les compétences manquantes ou la prévision des tendances futures. Cependant, ces défis présentent des opportunités significatives pour l'innovation en tirant parti des technologies de l'IA.

ADEM cherche à utiliser l'IA pour améliorer notre compréhension des besoins et des pénuries de compétences au Luxembourg.

Ces informations peuvent être utilisées pour :

- Orienter les citoyens (y compris les jeunes) vers des professions à fort potentiel.
- Orienter les citoyens (y compris les jeunes) vers des cours afin d'acquérir les compétences nécessaires sur le marché du travail.
- Montrer les opportunités de upskilling et de reskilling entre différentes professions.
- Aider les employeurs dans leurs efforts de recrutement.
- Évaluer la pertinence de l'offre d'éducation/formation au Luxembourg et identifier les offres manquantes.
- Fournir des incitations financières (par exemple, des bons de formation) axées sur les compétences en forte demande ou en pénurie.
- Concentrer les efforts d'attraction des talents sur les régions et les profils pouvant répondre aux pénuries de compétences nationales.
- Comparer les données détaillées sur les compétences avec celles de la Grande Région ou d'autres pays pour identifier les opportunités de collaboration.

Cette initiative s'aligne sur les objectifs stratégiques du Luxembourg visant à favoriser une main-d'œuvre prête pour l'avenir, à répondre aux pénuries de compétences et à soutenir l'élaboration de politiques fondées sur des preuves. En tirant parti des technologies de l'IA, le projet vise à créer un écosystème de données sur les compétences complet et dynamique, au profit des individus, des employeurs et des décideurs politiques, contribuant ainsi à la croissance économique et à la cohésion sociale.

¹⁵ Gouvernement Luxembourgeois, OECD Skills Strategy: des recommandations pour renforcer les compétences au Luxembourg, 02/2023

Éducation : Chatbot IA souverain pour soutenir les programmes éducatifs

La vision stratégique pour l'adoption de l'IA promeut l'utilisation responsable, une gouvernance robuste des données et des garanties solides en matière de confidentialité. Dans l'éducation, plusieurs programmes existent pour divers parcours, niveaux scolaires et contextes linguistiques, ce qui crée une complexité pour les enseignants, les décideurs politiques, et autres parties prenantes. Les dépôts numériques sont souvent statiques et fragmentés, rendant l'obtention d'une vue d'ensemble du paysage curriculaire difficile.

En construisant une base de données dynamique, hébergée localement, et en la couplant avec des outils alimentés par l'IA, ce projet phare s'inscrit dans la stratégie nationale de l'IA du Luxembourg et ses objectifs de souveraineté des données. La solution non seulement facilite l'exploration et la planification des programmes, mais également d'adopter des approches pédagogiques axées sur l'apprenant et préparées pour l'avenir. En fin de compte, elle garantit une innovation en harmonie avec la préservation des valeurs fondamentales, telles que la confidentialité, l'autonomie et l'accès aux opportunités éducatives.

Ceci vise à révolutionner la manière dont les enseignants, les administrateurs, les décideurs politiques et les étudiants interagissent avec les programmes éducatifs en créant une plateforme locale de l'IA. L'objectif principal est de construire une base de données multidimensionnelle contenant tous les programmes du système scolaire, entièrement interconnectée et continuellement mise à jour, puis d'y ajouter des capacités de recherche intelligente et un *chatbot* alimenté par un grand modèle de langage (LLM).

Les ambitions clés incluent :

- **Gestion souveraine des données** : Héberger toute la solution sur des serveurs basés au Luxembourg pour garantir la protection des données, la confidentialité et la conformité aux réglementations nationales et européennes.
- **Répertoire dynamique des programmes** : Développer une base de données curriculaire robuste et multidimensionnelle permettant des mises à jour faciles, des interconnexions profondes et des insights granulaires sur les parcours éducatifs.
- **Enseignants et décideurs politiques autonomes** : Fournir des «widgets» modulaires et des fonctionnalités de recherche, permettant aux utilisateurs de découvrir des liens inter-curriculaires, d'identifier des sujets transversaux et d'informer les décisions politiques.
- **Enseignement et apprentissage améliorés par l'IA** : Exploiter la technologie LLM pour générer des plans de leçon personnalisés, des stratégies de différenciation pour les classes à capacités mixtes, des plans de soutien aux étudiants, et plus encore.
- **Renforcement des capacités évolutives** : Offrir des formations et un développement professionnel continu (CPD) aux enseignants, afin qu'ils puissent utiliser la nouvelle plateforme de manière efficace et responsable, favorisant une culture de la littératie en IA dans le paysage éducatif.

À travers ce projet, le Luxembourg se positionne à l'avant-garde de l'innovation éducative, démontrant comment des solutions d'IA souveraines et éthiquement gouvernées peuvent transformer la gestion des programmes et les pratiques en classe, tout en respectant la protection des données et les valeurs centrées sur l'humain.

Mobilité : Mouvement IA 1.0

Ce projet propose une approche innovante pour mieux comprendre les besoins de mobilité au Grand-duché. Son objectif est de permettre les décideurs politiques de cibler de manière encore plus efficace les investissements publics en la matière. En appliquant l'IA à des sources de données fragmentées, AI Move 1.0 permettra d'améliorer la qualité des données, d'en accélérer le traitement et d'en faciliter l'interprétation. Le résultat sera une meilleure disponibilité des données dans le domaine de la mobilité, avec la certitude que ces données sont adaptées à l'objectif, c'est-à-dire qu'elles fournissent les informations nécessaires aux décideurs politiques.

Cette initiative répond au besoin réel de renforcer l'Observatoire digital de la Mobilité (OdM), objectif explicite de l'accord de coalition 2023-2028. Les bénéfices pour la politique de mobilité du gouvernement sont démultipliés si ce renforcement est accompagné par de l'IA. En l'occurrence, le champ d'application d'AI Move 1.0 concerne un huitième du budget de l'État (13 % du budget 2023 alloué au ministère de la Mobilité et des Travaux publics) et plus largement les investissements dans la mobilité des entreprises et des ménages.

Grâce à une meilleure disponibilité des données de haute qualité sur la mobilité, AI Move 1.0 débloque les avantages suivants :

- **Social** : Les méthodes de l'IA permettent d'approfondir l'analyse des données de mobilité existantes et à créer, conduisant à une compréhension plus profonde des besoins de mobilité des personnes. Une meilleure connaissance des besoins à satisfaire permet de cibler encore plus efficacement les investissements et d'améliorer davantage l'accès à la mobilité.

- **Économique** : Il existe déjà une forte demande pour des données de mobilité de haute qualité. AI Move 1.0 élargira ce champ et renforcera la communauté des producteurs et consommateurs de données de mobilité au Luxembourg. Cela créera un terreau propice à l'innovation.
- **Environnemental** : L'accélération de l'atteinte des objectifs de répartition modale en faveur de moyens de transport moins polluants peut entraîner des bénéfices environnementaux secondaires.
- **Collaboration et synergies** : AI Move 1.0 s'aligne avec les initiatives européennes des « systèmes de transport intelligents » et de l'espace de données de mobilité, favorisant la coopération transfrontalière. Un exemple de cette collaboration en cours est le projet **LuxMobil** d'OdM, réalisé en étroite coordination avec nos voisins français, belges et allemands, afin de produire une vision internationale unique de la mobilité transfrontalière.

Dans cet écosystème, AI Move 1.0 met particulièrement l'accent sur les producteurs de données publiques. Ils constituent le pilier principal du paysage des données de mobilité au Luxembourg, car ils fournissent la majorité des services et infrastructures de mobilité. Ceci ne diminue pas les contributions et l'importance des autres acteurs de l'écosystème. AI Move 1.0 est conçu comme une étape initiale et fondamentale. Il reconnaît que même les analyses les plus sophistiquées nécessitent une base de données solide et fiable, et que les données publiques en constituent une grande partie. À mesure que cette base se forme, de nouvelles opportunités peuvent émerger. Les institutions de recherche et les entreprises privées pourraient diriger le développement d'analyses avancées ou contribuer de nouveaux types de données, soit en soutien à la mission centrale de l'OdM, soit dans le cadre de leurs propres initiatives.

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 CCloud & 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.

Énergie : Améliorer la transition énergétique du Luxembourg par l'intégration de données en temps quasi-réel

Alors que le Luxembourg progresse dans la transition énergétique et passe à un système énergétique décentralisé et décarboné, sa gestion devient plus complexe à mesure que de nouvelles dynamiques apparaissent avec un nombre croissant de producteurs-consommateurs, de sources renouvelables, d'actifs électriques et de vecteurs énergétiques. Le projet vise à adresser les défis tels que les limitations du réseau, l'expansion des données, les prix volatils, la consommation fluctuante, les congestions et les vecteurs énergétiques multiples dans la prochaine phase de la transition énergétique, en appliquant un changement de paradigme dans la gestion du système énergétique du pays : l'opération en temps quasi-réel du futur système énergétique.

L'approche cible à positionner le Luxembourg comme vitrine d'un système énergétique efficace et numérisé. Un système énergétique abordable, durable et sécurisé sera garanti tout en débloquant la flexibilité nécessaire du système et l'adaptabilité du marché. La vision est d'améliorer le système énergétique du Luxembourg en exploitant les capacités de l'IA, le rendant plus robuste, sécurisé et durable, tout en garantissant une énergie abordable pour tous.

Pour atteindre cet objectif, les aspects suivants seront couverts :

- **Exploitation des données énergétiques en temps quasi-réel** : Collecter et utiliser la vaste quantité de données générées par diverses sources d'énergie (par exemple, électricité, gaz, chaleur et hydrogène) en temps quasi-réel pour créer un système de gestion de l'énergie hautement optimisé, économiquement viable et durable. Les interactions des flux de données existants seront cartographiées et de nouvelles seront créées tout en assurant l'harmonisation et la cybersécurité.

- **Exploitation de l'informatique avancée et de l'IA** : Développer des outils de l'IA qui permettent l'opération en temps quasi-réel du système énergétique. Par exemple, détection des pannes, maintenance prédictive des actifs, reconfiguration du réseau, surveillance des vecteurs énergétiques multiples, tarifs dynamiques explicites en temps réel, optimisation solaire et éolienne, véhicule au réseau. Établir un bac à sable de l'IA pour l'énergie pour permettre aux développeurs et aux chercheurs de tester les performances et le comportement des modèles d'IA, d'évaluer la fiabilité des différents algorithmes d'IA, d'identifier et de mitiger les risques et biais potentiels, et de tester la conformité réglementaire.
- **Développement de la communication bidirectionnelle et en temps quasi-réel** : Mise en place de canaux de communication bidirectionnels pour acquérir des données, surveiller et contrôler de manière optimale le système énergétique en temps quasi-réel.

L'impact attendu englobe une multitude d'aspects. Économiquement, l'intégration de la prise de décision basée sur l'IA vise à réduire les coûts opérationnels et à créer de nouvelles opportunités de marché. Environnementalement, l'opération en temps quasi-réel permettra de prendre des décisions énergétiques avec un équilibre entre l'abordabilité, la durabilité, la sécurité de l'approvisionnement et la résilience. En équilibrant l'offre et la demande et en optimisant la production, le stockage et la consommation d'énergie renouvelable, le projet actuel contribuera directement aux objectifs climatiques. Socialement, la participation active des citoyens est encouragée, permettant aux consommateurs de s'engager sur les marchés de l'énergie, d'ajuster leur consommation en fonction des prix dynamiques et de bénéficier des programmes de réponse à la demande. En conséquence, la littératie énergétique est améliorée.

Sciences du climat : Jumeau numérique régional du changement climatique

L'impact économique croissant du changement climatique souligne l'urgence de solutions innovantes pour la résilience. À mesure que les risques augmentent, le marché de l'analyse prédictive des risques devrait passer de 22 milliards de dollars en 2019 à 55 milliards de dollars d'ici 2027¹⁶. Le projet **Regional Digital Twin Climate Change (RDTCC)** a pour ambition de répondre à ce besoin en fournissant des services climatiques avancés et des solutions de gestion des risques pour l'énergie, la finance, l'agriculture et les services publics. Le projet exploitera les données, l'IA, le HPC, le cloud souverain et l'interopérabilité des plateformes de l'UE pour développer un portefeuille complet de services climatiques.

Ses principaux objectifs sont les suivants :

- Améliorer la résilience au changement climatique pour les organismes gouvernementaux et les industries critiques,
- Faire progresser les algorithmes de l'IA pour les applications de prédiction et de gestion des risques,
- Établir le Luxembourg comme un leader mondial de la technologie des jumeaux numériques et des services climatiques.

L'initiative s'appuiera sur des contextes européens et nationaux favorables, en alignement avec Destination Earth (DestinE), une initiative européenne ambitieuse visant à développer une réplique numérique très précise de la Terre pour surveiller, simuler et prédire les changements climatiques et environnementaux. Elle tirera parti des activités initiées par la LSA et l'ESA, telles que le prototype de jumeau numérique des inondations au Luxembourg en 2024 et l'étude d'architecture et les cas d'utilisation du RDTCC en 2025. Cette approche stratégique pose les bases du développement industriel à partir de 2026.

En tirant parti de l'expertise et des avancées technologiques développées par le Space Hub de la Luxembourg AI Factory, le RDTCC appliquera l'IA et le HPC pour optimiser les évaluations régionales de l'impact climatique, permettant une analyse précise des risques et une prise de décision éclairée. Le système intègre des images satellites, des mesures locales in-situ, des cartes topographiques et des données régionales auxiliaires, les ingérant et les traitant automatiquement en utilisant MeluXina(-AI) et les capacités d'hébergement sur les solutions de cloud souverain du Luxembourg. Une caractéristique clé est son interopérabilité avec DestinE, qui fournit les scénarios climatiques mondiaux que le RDTCC affinera en modèles haute résolution et spécifiques à la région.

Le projet **améliora les services climatiques multisectoriels, en fournissant des modèles IA prédictifs et des simulations de scénarios**, adaptés aux secteurs de l'énergie, des services financiers et des infrastructures numériques, et soutiendra des jumeaux numériques spécifiques aux secteurs tels que ceux de l'énergie et des transports, garantissant un écosystème numérique cohérent et évolutif. De plus, des outils alimentés par l'IA, y compris des assistants virtuels et des fonctions de recherche avancées, permettront des analyses en temps réel et une récupération efficace des données, permettant aux entreprises et aux décideurs politiques d'anticiper et de réduire les risques.

Le consortium sera composé d'acteurs luxembourgeois clés dans l'IA, le Cloud et le HPC tels que les centres de recherche, les universitaires, les entreprises privées, les fabriques européennes de l'IA et d'autres agences nationales ayant une expertise ou besoins pertinents et confirmant leur intérêt à participer au projet.

¹⁶ Fortune Business Insights, Risk Analytics Market Size to Touch USD 54.95 Billion by 2027, (23.06.2020)

Espace : Durabilité de l'espace

Les technologies et applications spatiales jouent un rôle crucial dans notre vie quotidienne, en permettant la navigation GPS, les prévisions météorologiques et les communications mondiales. En raison du nombre croissant de satellites lancés, l'espace devient encombré. Par conséquent, pour continuer à bénéficier des technologies spatiales, il est essentiel de garantir un espace durable. La position du Luxembourg dans le secteur spatial est bien établie avec de grands opérateurs bien établis, un écosystème étendu de startups et de PME ainsi qu'un cadre juridique pour les activités spatiales.

Le projet actuel abordera le problème complexe de la durabilité spatiale en différentes phases :

- **Space Situational Awareness (SSA)** : Améliorer la SSA avec des outils d'IA pour l'identification des objets, l'optimisation des manœuvres et la prévention de collisions. L'utilisation d'observations terrestres et de radars en combinaison avec des données spatiales est prévue. Le développement des capacités de gestion des données SSA, allant de la collecte, l'agrégation, la détection des erreurs, l'estimation des biais et à l'archivage, est encouragé. Des bases de données SSA hébergées sur une infrastructure cloud souveraine et d'un marché SSA seront explorés.
- **Santé des satellites** : Optimiser la maintenance des engins spatiaux. L'IA révolutionnera l'analyse de la santé des satellites grâce à l'apprentissage automatique, l'analyse prédictive et la détection d'anomalies. L'IA pourrait surveiller les données de télémétrie des satellites en temps réel et détecter des anomalies qui indiquent des dysfonctionnements de capteurs, des problèmes de communication, des écarts par rapport

aux schémas ou une consommation d'énergie inattendue. L'IA pourrait potentiellement signaler la nécessité d'actions (maintenance prédictive) à partir de la télémétrie historique, de facteurs environnementaux tels que la météo spatiale ou de comportements anormaux précédents.

- **Autonomie à bord et services en orbite** : Renforcer la durabilité dans l'espace en permettant de (i) planifier des itinéraires efficaces et prendre des décisions en temps réel pour les missions spatiales ainsi que (ii) prolonger la durée de vie des engins spatiaux, réutiliser des modules et désorbiter des objets qui ne peuvent pas manœuvrer vers un cimetière spatial. L'IA jouera un rôle crucial dans les services en orbite en permettant des opérations autonomes et efficaces pour réparer, ravitailler, relocaliser et désorbiter des satellites. Cela implique la vision par ordinateur, l'informatique en périphérie et l'apprentissage automatique pour la reconnaissance d'objets en temps réel. Le contrôle robotique peut être utilisé pour exécuter des opérations dédiées qui ne peuvent pas dépendre de la latence requise par la supervision humaine.
- **Fabrication dans l'espace** : La pierre angulaire d'une future économie spatiale. Des avancées en impression 3D, assemblage dans l'espace, réutilisation des débris, informatique en périphérie dans l'espace sont prévues.

La réalisation du projet actuel, largement portée par les initiatives des entreprises privées, comprendra le lancement de trois appels à projets couvrant les trois premières phases de l'initiative « Sustainability in Space ». Ces appels devraient encourager des projets de R&D industrielle dans les domaines de « l'IA pour la SSA », « l'IA pour la santé des satellites » et « l'IA pour l'autonomie à bord, pour les services en orbite » grâce à des aides financières attractives.

Patrimoine culturel : Un cadre stratégique pour l'intégration de l'IA dans le secteur culturel luxembourgeois

Les institutions culturelles assurent un équilibre essentiel entre progrès technologique et valeurs humaines. Le projet phare *Patrimoine Intelligent* vise à positionner le secteur culturel luxembourgeois comme consommateur et acteur impliqué dans le développement de solutions d'IA, en développant le cadre politique adapté. L'IA ouvre des perspectives inédites : relier des collections disparates par le biais de métadonnées intelligentes, détecter des motifs dans des archives multilingues, ou rendre accessibles d'immenses ensembles de données historiques. Le projet entend réduire la fracture numérique entre les grandes institutions et les archives locales grâce à des outils d'IA évolutifs, une infrastructure technique partagée et des dispositifs de transfert de connaissances. Des volets consacrés à l'éthique, à la protection de la création, aux outils innovants, à l'inclusion et à l'engagement du public renforceront l'esprit critique et favoriseront la souveraineté numérique à l'échelle nationale. En exploitant les capacités de l'IA, nous démocratiserons l'accès au patrimoine multilingue du Luxembourg, renforcerons les liens entre citoyens et mémoire collective, et ferons du pays un leader de la gestion patrimoniale augmentée par l'IA, en lien avec la stratégie nationale en matière d'intelligence artificielle.

Contexte :

Depuis une enquête menée en 2018 par le ministère de la Culture, le secteur du patrimoine culturel luxembourgeois présente des niveaux variés de maturité numérique. Le projet LuxTIME a approfondi ce diagnostic en proposant un consortium décentralisé pour structurer les activités de recherche. Ce projet phare, reconnu pour sa pertinence stratégique, vise à relever les enjeux et saisir les opportunités liées à l'IA dans le domaine culturel.

Les objectifs du projet sont les suivants :

- **Renforcer les archives et les collections :** Accompagner les institutions culturelles dans une gestion qualitative et pérenne de leurs données, tout en renforçant leur interopérabilité. Dans une économie des données, il est important de reconnaître ces compétences et savoir-faire comme des atouts stratégiques essentiels.
- **Faciliter la recherche et le développement :** Améliorer les processus internes des institutions patrimoniales et proposer des services innovants centrés sur l'utilisateur. Les projets associés facilitent la recherche intelligente, l'enrichissement des métadonnées, les liens sémantiques et l'accès multilingue.
- **Mettre en place un cadre éthique :** Établir des cadres juridiques transparents pour garantir que l'innovation en IA respecte les droits des créateurs. Soutenir le secteur GLAM (Galeries, Bibliothèques, Archives et Musées) en établissant un cadre éthique propice à une innovation responsable et durable.
- **Sensibiliser et former le public :** Positionner l'État comme un catalyseur stratégique de l'innovation dans le secteur culturel. En créant des espaces d'expérimentation internes, prévoir des actions de sensibilisation et de formation ciblées pour les petites institutions GLAM.
- **Mettre en œuvre un modèle de gouvernance collaborative :** Instaurer un modèle de gouvernance flexible et adaptatif, capable d'évoluer avec les besoins des parties prenantes et le rythme soutenu des avancées en IA, tout en assurant une cohérence stratégique et en favorisant l'innovation.

Partie 5. Conclusion

Perspectives

Accélérer le déploiement de l'IA grâce à une culture de l'expérimentation

Pour saisir pleinement l'ambition du Luxembourg en matière de préparation à l'IA, un seul document stratégique ne saurait suffire. Depuis des décennies, le pays s'appuie sur une culture d'innovation et donc une culture d'adoption d'avancées technologiques. Ceci fait vivre une économie fondée sur les compétences.

Cet esprit se reflète dans l'approche de l'innovation du Luxembourg, où les questions difficiles sont systématiquement abordées en premier, en menant des discussions sur les implications éthiques et réglementaires. Grâce à la taille agile, vision technologique cohérente et collaboration étroite entre les régulateurs, les ministères, les organisations et le secteur privé, le Luxembourg se positionne comme un véritable terrain d'expérimentation, un accélérateur et un incubateur d'innovation, toujours avec une perspective européenne et internationale élargie. Cette dynamique constitue l'une des plus grandes forces du Grand-Duché et fait du Luxembourg un catalyseur de premier plan pour l'émergence et la mise sur le marché de nouvelles applications et solutions de l'IA.

Des années de réorientation, d'expérimentation et de spécialisation ont permis de se concentrer sur ces points essentiels: cultiver les compétences des talents, leur fournir une infrastructure propice à l'innovation et, toujours, garantir la protection des droits et libertés fondamentaux. Les régulateurs savent comment dialoguer ouvertement avec les entrepreneurs à la

pointe de la technologie afin de comprendre leurs défis précis. Une trajectoire qui concilie innovation et protection des droits individuels. En tant que pionnier de la technologie financière, par exemple, le Luxembourg a su relever les défis réglementaires nécessaires pour renforcer la sécurité, la confiance et les obligations éthiques lors de la transformation rapide d'une industrie globale et sophistiquée. Pour faire progresser les nouvelles technologies, l'accent est mis sur des solutions ayant un impact direct sur la vie quotidienne des concitoyens. Cela a été démontré, que ce soit à travers des appels à projets (comme les projets pilotes 5G), des financements (tel que le Digital Tech Fund) ou des nouvelles infrastructures (comme MeluXina).

Cette unité d'action a permis d'allouer les fonds nécessaires pour renforcer les compétences de la main-d'œuvre et le déploiement d'infrastructures de nouvelle génération, comme la fibre optique ultra-haut débit pour chaque foyer. Cette stratégie en matière de l'IA repose sur les perspectives et recommandations issues de tous les secteurs, ministères et segments de la société. Elle adopte une approche véritablement holistique, considérant l'IA non seulement comme une avancée technologique, mais aussi comme une nouvelle ère de collaboration entre l'humain et la machine.





Éditeur

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

Auteur

Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg

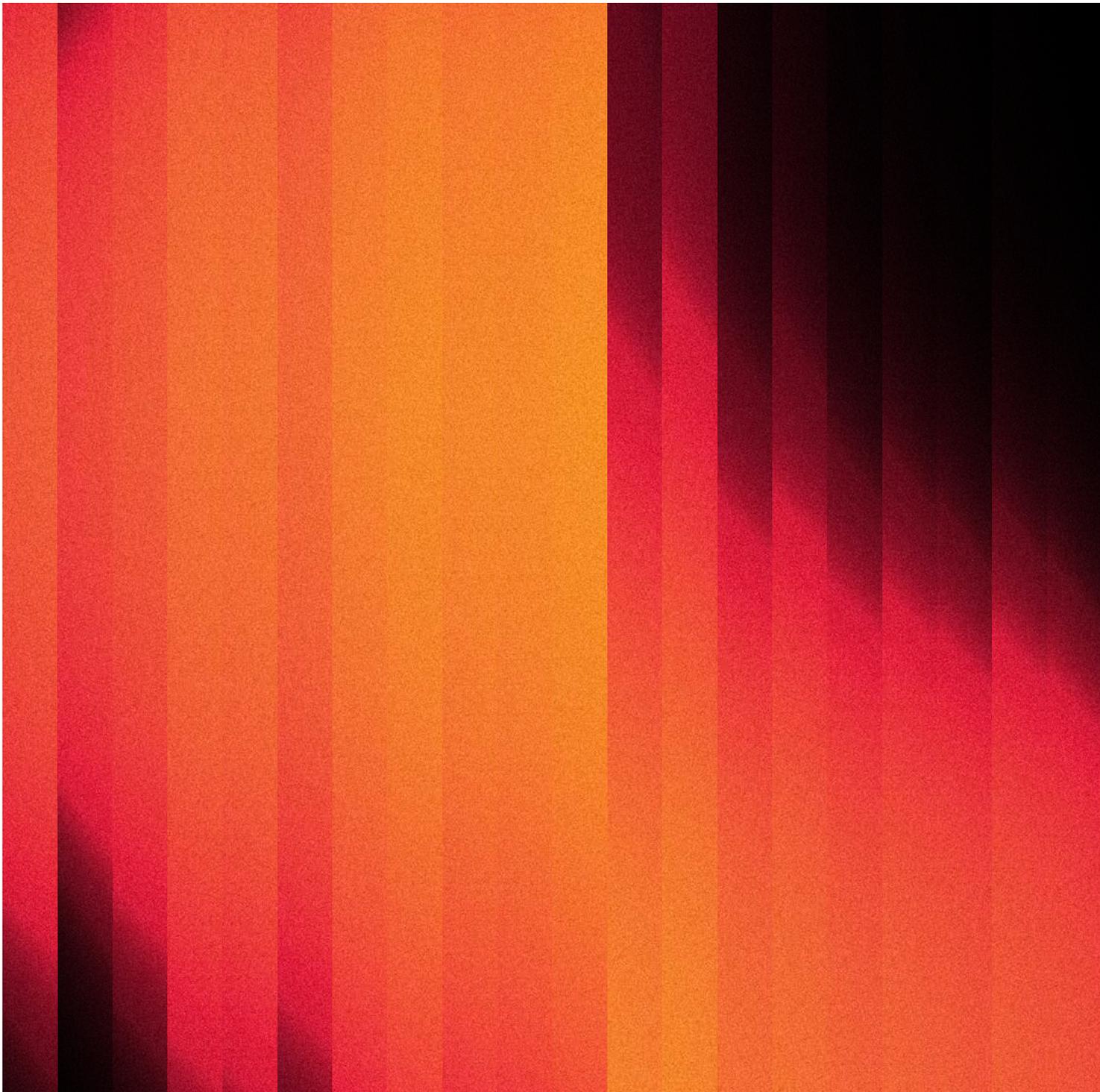
Layout

Cropmark

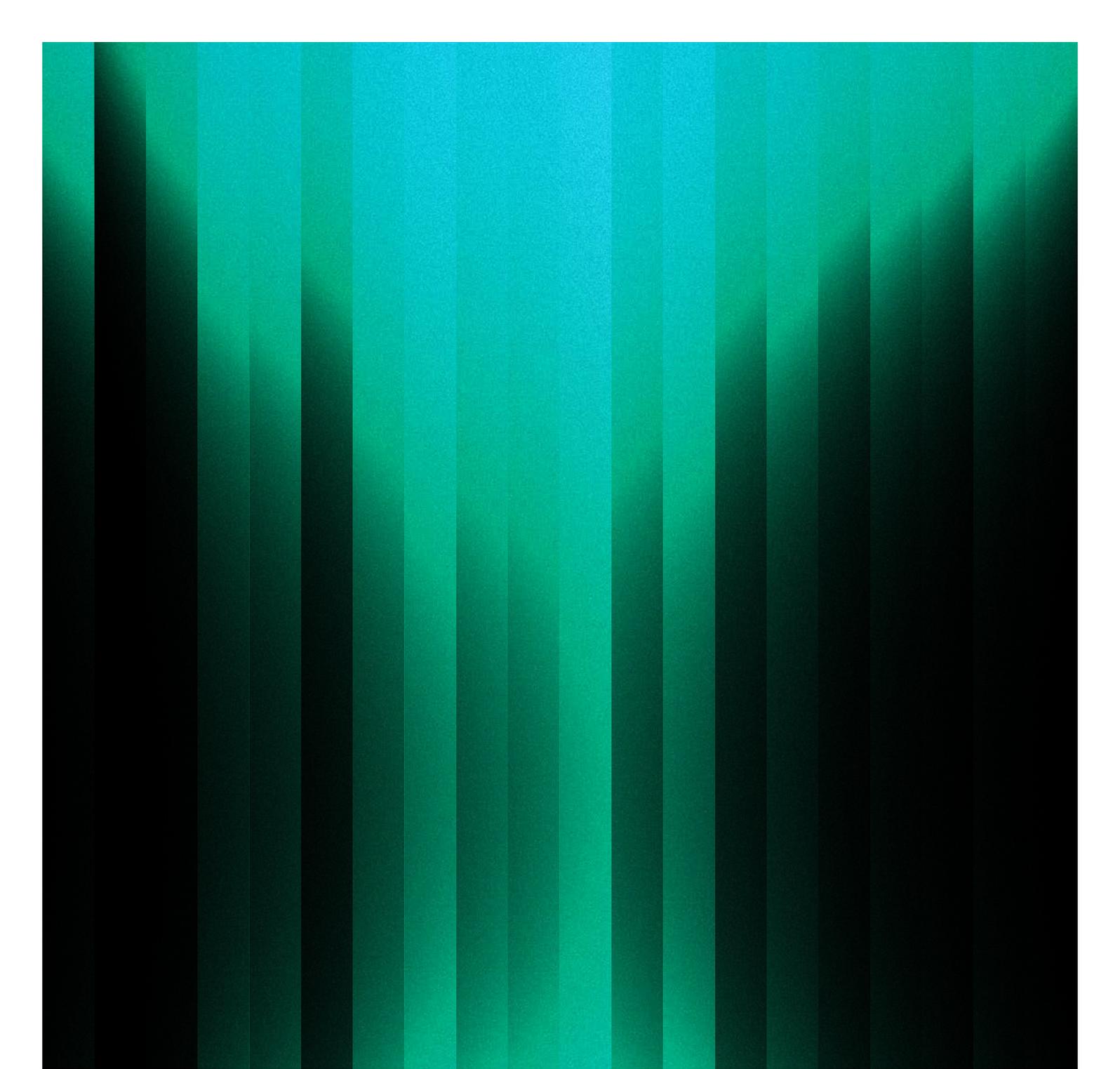
Impression

Imprimerie Reka

Mai 2025



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG

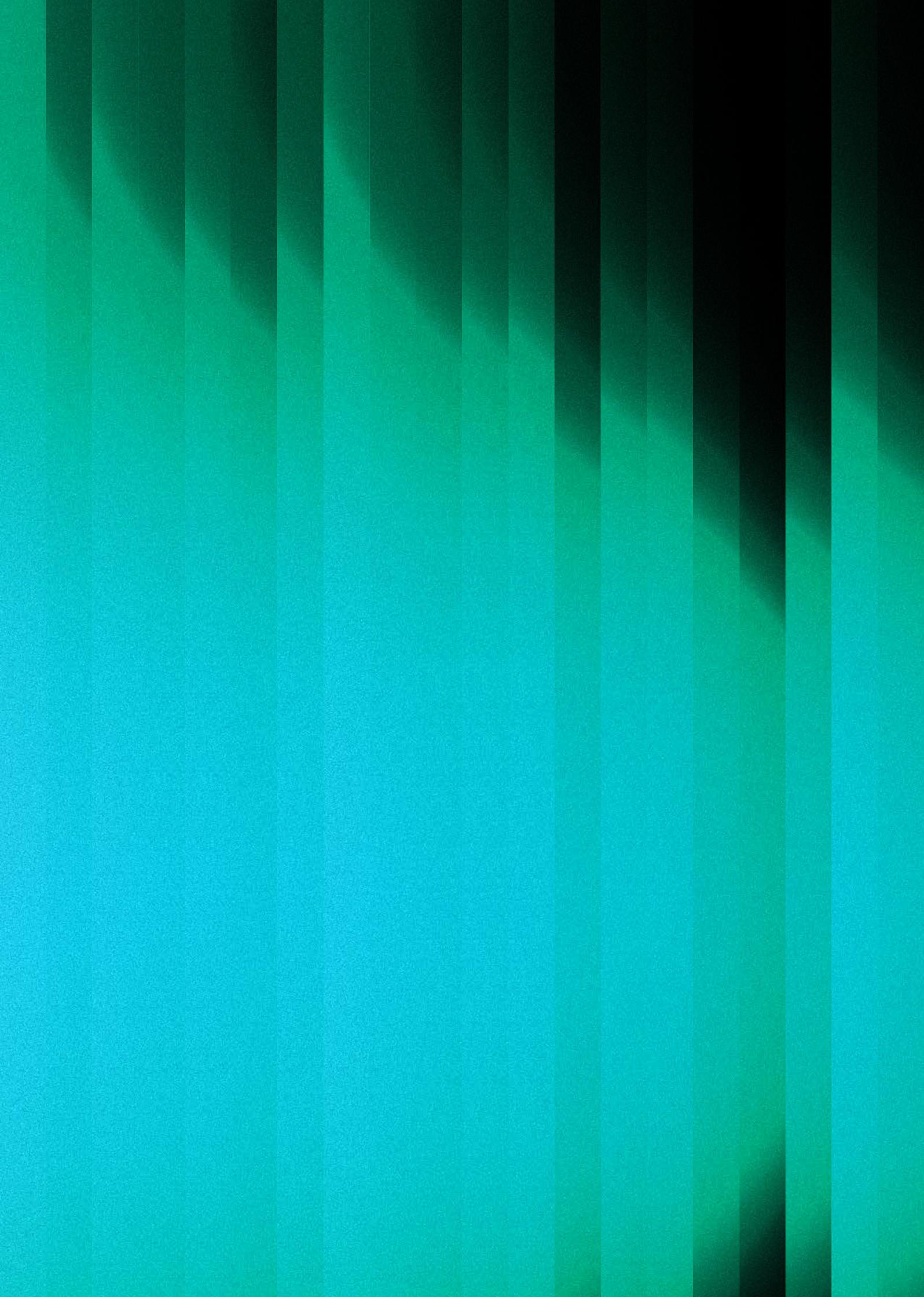


Accélérer la souveraineté numérique 2030

La stratégie du Luxembourg en matière de données



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG



Accélérer la souveraineté numérique 2030

La stratégie du Luxembourg en matière de données

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

La stratégie du Luxembourg en matière de données _____ 17

1. À propos de ce document _____ 17

2. Méthodologie participative _____ 17

3. Approche générale _____ 17

4. Vision stratégique _____ 23

5. Principes directeurs _____ 27

Partie 2. Leviers _____ 28

Six leviers d'action _____ 29

1. Gouvernance et réglementations _____ 29

2. Talents et compétences _____ 31

3. Infrastructures _____ 35

4. Éventail de services _____ 38

5. Recherche, développement et innovation _____ 43

6. Collaboration à l'international _____ 45

Partie 3. Projets phares _____ 50

Administration publique : Modèle linguistique juridique large du Luxembourg (4LM) _____	51
Finance : Le Centre d'expérience IA au sein du LHoFT _____	52
Médecine de précision : L'IA prête pour la médecine de précision _____	53
Marché du travail : Perspectives sur les compétences alimentées par l'IA _____	54
Éducation : Chatbot IA souverain pour soutenir les programmes éducatifs _____	55
Mobilité : Mouvement IA 1.0 _____	56
Cybersécurité : Démocratiser la cybersécurité _____	57
Énergie : Améliorer la transition énergétique du Luxembourg par l'intégration de données en temps quasi-réel _____	58
Sciences du climat : Jumeau numérique régional du changement climatique _____	59
Espace : Durabilité de l'espace _____	60
Patrimoine culturel : Un cadre stratégique pour l'intégration de l'IA dans le secteur culturel luxembourgeois _____	61

Partie 4. Conclusion _____ 62

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

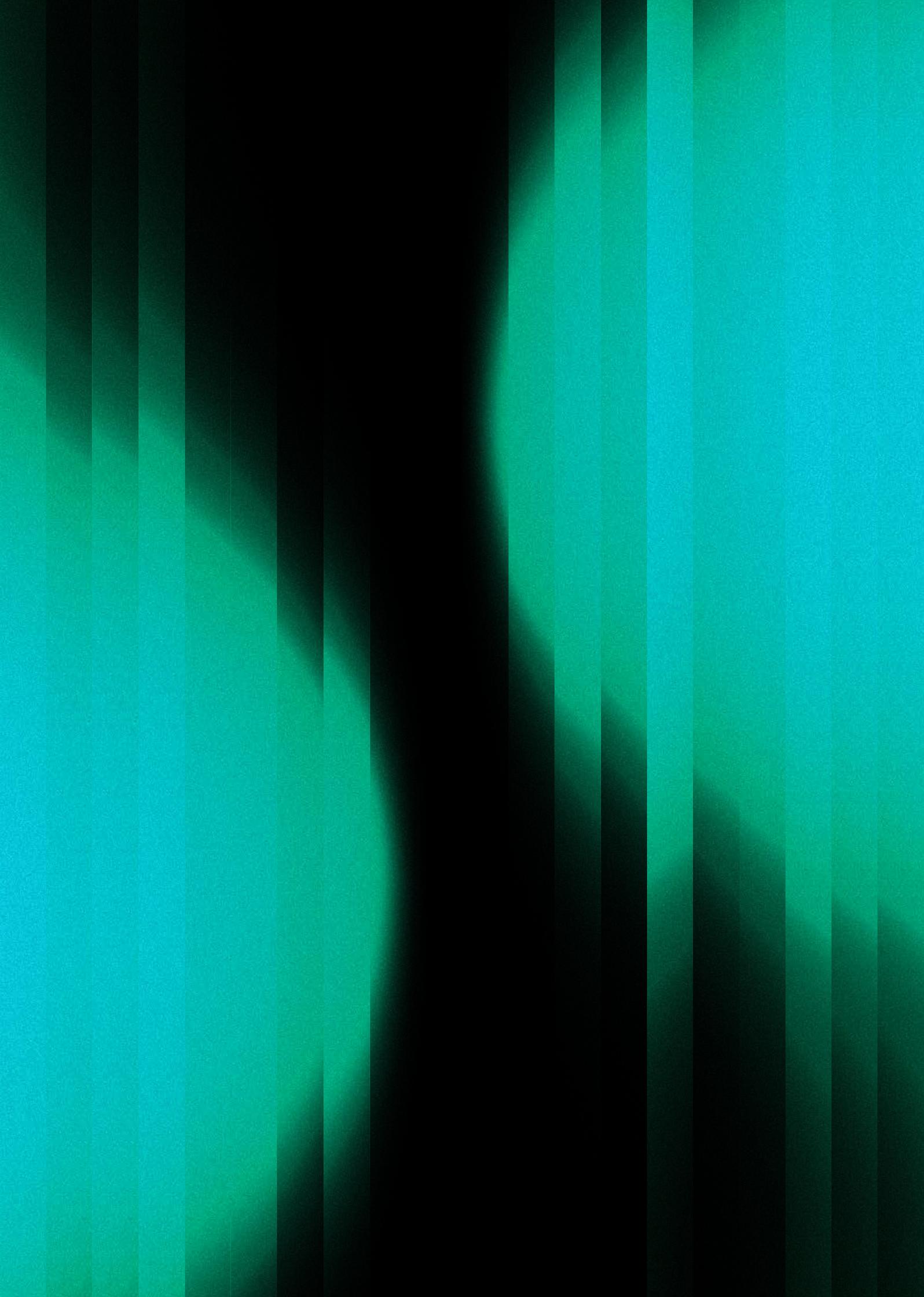
« Priorité à l'adoption concrète et utile – c'est le principe qui nous a guidé en fixant les actions en matière d'intelligence artificielle. Que ce soit à l'intérieur de l'administration publique ou des secteurs-clés comme la finance ou la santé. Chaque secteur, chaque entreprise et chaque personne aura 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.

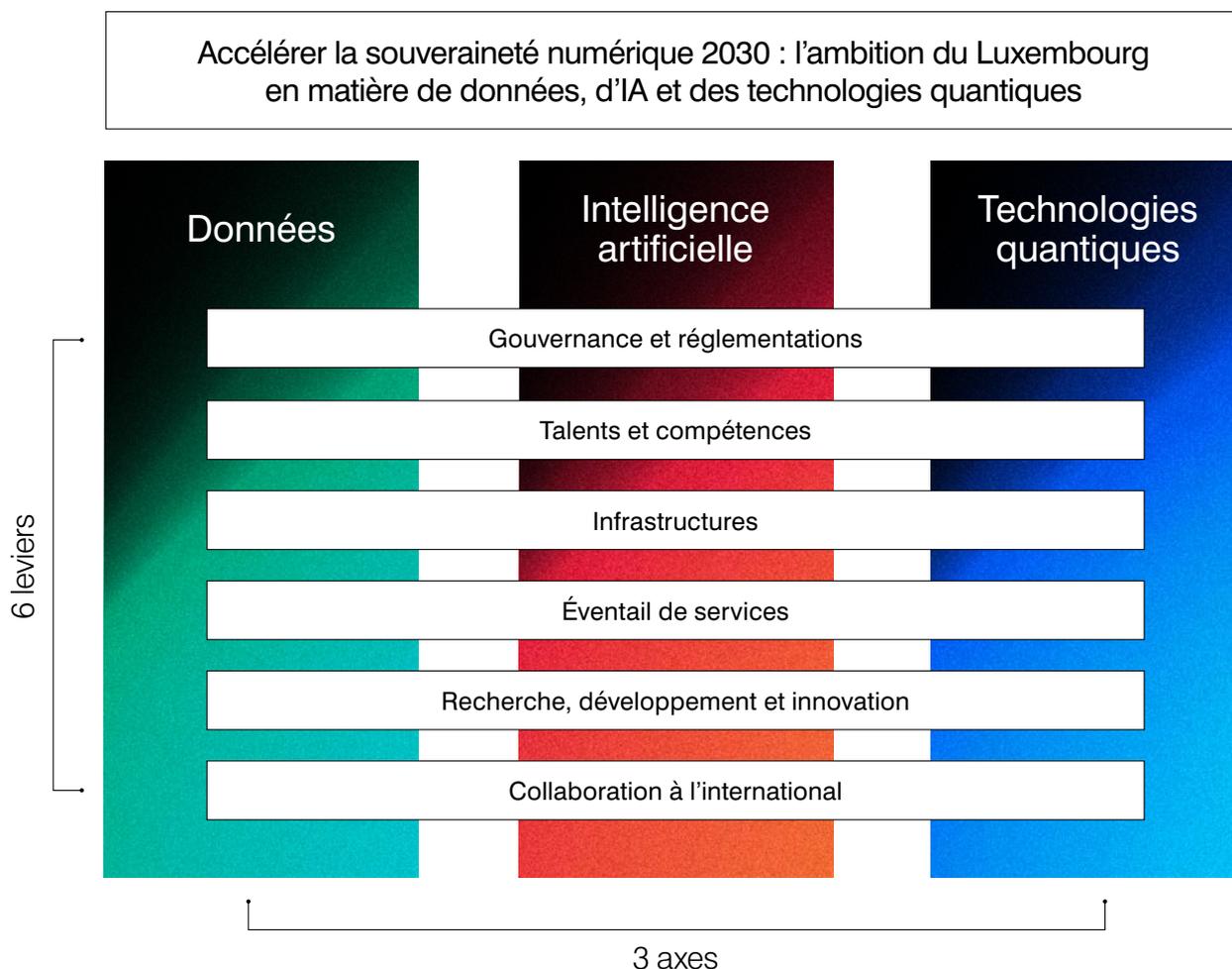
Cette vision commune pour le **corpus stratégique** repose sur la conviction que l'innovation numérique et technologique, est essentielle pour garantir la compétitivité et la prospérité future du pays. Se basant sur ses avantages uniques telles qu'une **infrastructure souveraine de pointe** et l'**agilité 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

La stratégie du Luxembourg en matière de données

1. À propos de ce document

La stratégie nationale des données du Luxembourg couvre le premier de trois axes stratégiques du programme « **Accélérer la souveraineté numérique 2030** ». En lien étroit avec les axes stratégiques traitant de l'intelligence artificielle et des technologies quantiques, elle expose une vision holistique et cohérente des ambitions y relatives ainsi que des actions concrètes à entreprendre afin de contribuer à la valorisation des données au Luxembourg, et ainsi à la vision commune du présent programme.

Conformément à la vision stratégique présentée ci-après et aux principes directeurs qui en découlent la stratégie nationale des données établit, pour chacun de ces six leviers, les ambitions du Luxembourg à l'horizon 2030 ainsi que les actions concrètes pour les réaliser.

2. Méthodologie participative

La présente stratégie est le **résultat d'une étroite collaboration avec un grand nombre d'acteurs clés** issus de la société civile, des secteurs privé et public et de la recherche. Cet exercice participatif et de cocréation s'est déroulé sous différentes formes, notamment des réunions du Haut comité à la transformation numérique, des workshops, des ateliers collaboratifs, des échanges bilatéraux et d'autres formats adaptés. À chacune de ces étapes, les parties

prenantes ont été invitées à exprimer leurs besoins, présenter les défis auxquels ils sont confrontés et à poser leurs questions. En complément de l'expertise du secteur public luxembourgeois en valorisation des données, les connaissances recueillies auprès de ces acteurs ont contribué à l'élaboration de la vision, des principes directeurs, des ambitions et des actions concrètes présentées ci-après.

3. Approche générale

Les données et leur impact sur la création d'un écosystème

La donnée étant l'élément-clé de cette stratégie, il convient d'en donner une définition. Les données, y compris les données à caractère personnel, sont **des éléments susceptibles d'être communiqués, analysés ou traités** (que ce soit par un individu, par ordinateur ou par d'autres moyens automatisés)

pour en dégager des informations. Elles peuvent être brutes ou traitées et sont utilisées dans divers contextes, allant de la recherche scientifique aux opérations commerciales.

Les données sont utiles pour prendre des décisions éclairées, identifier des tendances ou prendre un certain recul analytique. Les données peuvent être qualitatives (descriptives) ou quantitatives (numériques), provenir de sources diverses et être

stockées dans des bases de données, des tableaux ou d'autres formats numériques et traitées à l'aide d'outils logiciels et d'algorithmes.

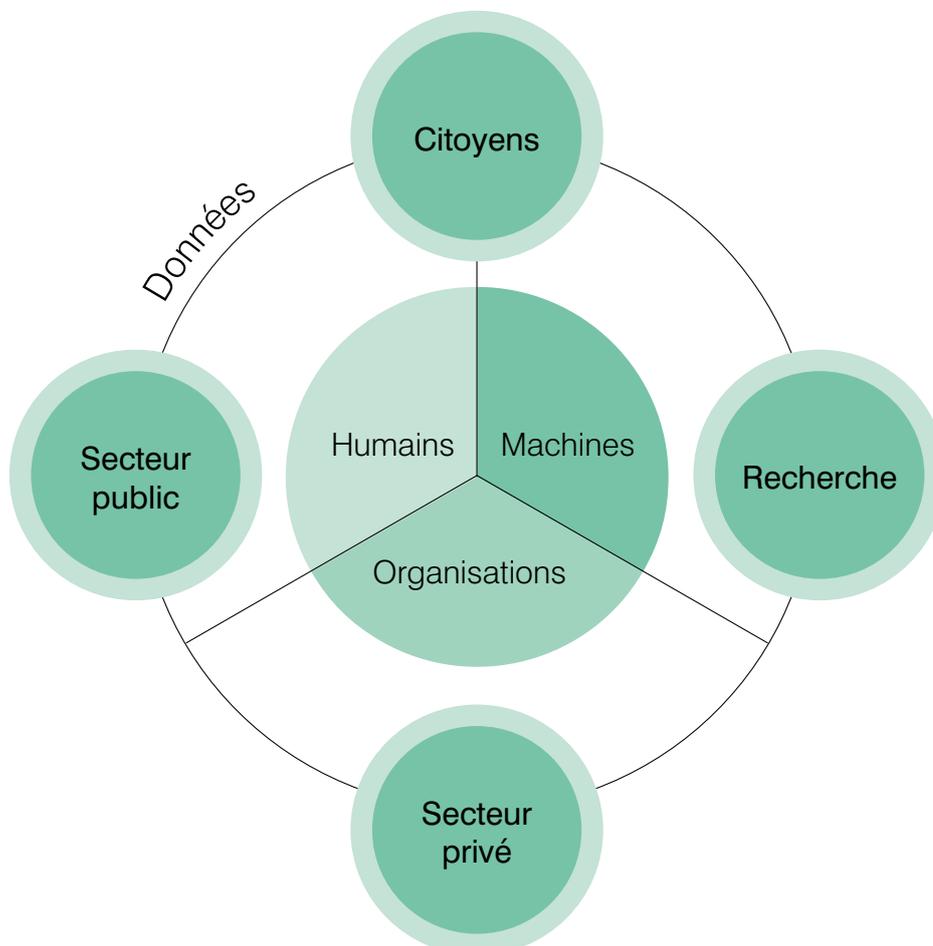
Cette stratégie vise à établir un cadre complet et cohérent pour la gestion, l'utilisation et la valorisation des données à travers l'ensemble du pays et au niveau international. Cette approche holistique englobe tous les secteurs clés de la société luxembourgeoise : le secteur privé, pour lequel les données constituent un moteur d'innovation et de croissance économique ; le secteur public, qui cherche à optimiser ses politiques, ses services et sa gouvernance grâce à une utilisation judicieuse des données ; le secteur de la recherche qui bénéficiera d'un accès privilégié aux données pour faire avancer la science et l'innovation ; et les citoyens, qui profiteront d'une meilleure transparence, de produits et services optimisés et d'une protection renforcée de leurs informations personnelles, tout en étant encouragés à participer activement à l'économie numérique.

À l'ère numérique, **les données proviennent d'une multitude de sources diverses et complémentaires.**

Les êtres humains génèrent constamment des données à travers leurs interactions quotidiennes telles que leurs publications sur les réseaux sociaux, leurs achats en ligne, leurs recherches sur internet ou leurs communications électroniques. De leur côté, les machines produisent un volume encore plus conséquent d'informations : capteurs

Cette convergence des sources crée un écosystème de données extraordinairement riche, dont l'interconnexion et l'analyse offrent des perspectives révolutionnaires.

environnementaux mesurant la qualité de l'air, dispositifs médicaux surveillant les signes vitaux, compteurs intelligents enregistrant la consommation d'énergie, ou encore véhicules connectés collectant des données sur leur utilisation et leur environnement. Les organisations, quant à elles, constituent une troisième source majeure de données : entreprises cataloguant leurs transactions commerciales, institutions publiques archivant des documents administratifs, établissements de santé documentant les dossiers médicaux, organismes de recherche compilant leurs résultats scientifiques, etc. Cette convergence des sources crée un écosystème de données extraordinairement riche, dont l'interconnexion et l'analyse offrent des perspectives révolutionnaires.



En termes de périmètre des données, cette stratégie adopte une approche équilibrée qui reconnaît la diversité des types et des usages des données. D'une part, elle promeut activement la publication et l'utilisation des **données ouvertes**, dont l'accès, le partage et l'usage sont libres pour tout le monde, pour stimuler l'innovation, la recherche et la transparence gouvernementale. D'autre part, elle établit un cadre robuste pour la gestion des **données protégées**, garantissant leur utilisation responsable et sécurisée dans le respect de la vie privée des individus et des intérêts légitimes des organisations, tout en facilitant leur partage contrôlé. Cette dualité permet au Luxembourg de maximiser la valeur socio-économique des données tout en préservant la souveraineté numérique, la confidentialité et la sécurité qui constituent des piliers essentiels de la confiance dans l'écosystème numérique national.

Les données, un axe stratégique au service de l'humain et de l'innovation

Dans un monde en transformation numérique constante et accélérée, **les données** ne sont pas seulement une ressource technologique : elles sont **une ressource fondamentale qui doit être placée au service de l'humain**. Lorsqu'elles sont exploitées de manière responsable, elles permettent d'améliorer la qualité de vie de tous les concitoyens, d'en favoriser l'inclusion sociale et de relever des défis sociétaux majeurs. La présente stratégie place l'humain au cœur de l'économie des données, en veillant à ce que leur utilisation profite aux citoyens, aux entreprises et aux institutions.

Face à des défis critiques – fragmentation des écosystèmes de données, préoccupations en matière de souveraineté numérique et de protection de la vie privée, concentration des pouvoirs entre les mains de quelques acteurs technologiques – le Luxembourg adopte une approche proactive et responsable. Il s'agit non seulement d'accompagner l'évolution numérique mondiale, mais également de la façonner activement en créant un cadre qui garantisse un juste équilibre entre innovation, sécurité et respect des droits fondamentaux.

L'**ambition de cette stratégie** est de :

- **placer l'humain au cœur des usages des données**, en garantissant les notions de transparence et d'éthique ainsi que le contrôle des individus sur leurs propres informations ;
- **stimuler l'innovation et la compétitivité** en facilitant l'accès à des données de qualité pour les acteurs de la recherche et les entreprises dans le respect des droits fondamentaux ;
- **renforcer la souveraineté numérique du Luxembourg** en développant des infrastructures

et des standards indépendants, afin de préserver son autonomie stratégique ;

- **créer une économie des données durable et inclusive**, où la valeur générée bénéficie à l'ensemble de la société.

Les données vont au-delà d'un simple outil technologique ou économique : elles sont le socle d'une intelligence collective, d'une prise de décision plus éclairée et d'une transformation numérique au service du bien commun. Par cette stratégie, le Luxembourg s'engage à ne pas subir les évolutions du numérique, mais à en être une force motrice, au service d'un futur plus innovant.

Exploiter le potentiel des données

Dans le monde numérique, les données sont omniprésentes. Elles doivent être traitées comme **ressource principale** qui renferme un énorme potentiel notamment pour la prise de décisions, la conception de politiques efficaces, le développement de produits, et la fourniture de services publics et privés efficaces et de haute qualité. De plus, les données constituent la **matière première** d'un large éventail de technologies telles que l'intelligence artificielle (IA) qui occupent de plus en plus de place dans notre vie quotidienne.

Par conséquent, les données représentent une grande richesse pour les citoyens, les entreprises et les décideurs politiques, car elles permettent d'avoir une meilleure compréhension des défis socio-économiques et environnementaux. Elles permettent une planification plus précise et efficace des actions à entreprendre, et le développement de solutions et de produits innovants. La valeur d'une donnée découle donc de son utilisation, de sa réutilisation et de son analyse, idéalement de haute qualité et en grands volumes.

Le Luxembourg souhaite fédérer un écosystème des données et devenir un pôle d'excellence attractif et reconnu sur le plan international.

Une valorisation des données dans les secteurs public et privé repose également sur la **création de données de qualité, fiables et facilement exploitables**, et le **respect de principes directeurs comme le principe FAIR**, visant la **Facilité** des données à être trouvées, leur **Accessibilité**, leur **Interopérabilité** et leur **Réutilisation** ; la **protection des individus, de leurs données et de leurs droits fondamentaux** ; ou encore la **centralité du bien-être de l'être humain**.

Afin d'exploiter pleinement le potentiel des données, une gouvernance centralisée d'accès et de réutilisation des données du secteur public au niveau d'une entité étatique compétente en application du règlement (UE) 2022/868 sur la gouvernance européenne des données¹ (DGA) et des autres réglementations sectorielles

¹ Règlement (UE) 2022/868 portant sur la gouvernance européenne des données et modifiant le règlement (UE) 2018/1724 (règlement sur la gouvernance des données)

en la matière, tel que le règlement (UE) 2025/327 relatif à l'espace européen des données de santé² (EHDS), est mise en place. En instaurant une approche d'autorisation par un organe centralisé et spécialisé en charge d'octroyer les accès et la réutilisation par des entités publiques et privées éligibles, le **Luxembourg garantit un cadre propice et cohérent à la valorisation des données dans un environnement de confiance**, accessible au secteur public et privé éligible. Cette instance va substantiellement dynamiser l'échange de données dans un strict respect du règlement (UE) 2016/679 relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données³ (RGPD), des droits d'auteurs et droits voisins ainsi que la protection des secrets d'affaires et secret bancaire. Pour ce faire, elle propose des infrastructures sécurisées d'échanges et de traitements des données, le cas échéant avec le recours aux services de tiers de confiance.

Par ailleurs, une instance proposant les catalogues de données disponibles respectivement au sein du secteur public et dans les espaces européens communs de données ou encore dans le secteur privé est mise en place. Elle accompagne également toutes les entités, si celles-ci veulent rendre leurs jeux de données interopérables.

Vers une société axée sur les données : enjeux et perspectives pour le Luxembourg

La stratégie nationale des données s'inscrit dans un contexte de *datafication*, c'est-à-dire la transformation sociétale et économique par les données, et dans la continuité d'initiatives et de stratégies internationales et nationales visant à exploiter les bénéfices de cette transformation.

Un des indicateurs de cette nouvelle réalité sont les nouvelles technologies qui de plus en plus reposent sur l'utilisation et l'exploitation de données et qui à leur tour peuvent, soit générer d'énormes quantités de données (par exemple l'internet des objets), soit ingérer une grande quantité de données pour mener des analyses et en dégager de l'information (par exemple l'intelligence artificielle - IA).

Depuis quelques années, la collecte des données peut se faire en continu, ce qui permet de réagir rapidement et de prendre des décisions en temps réel. De plus, les données provenant de produits connectés sont recueillies directement à la source. Elles sont donc

plus détaillées et permettent d'examiner les processus de manière plus approfondie. Bien que ces données engendrent de nouveaux défis au vu de leurs volumes et de leur nature décentralisée, elles offrent également un potentiel insoupçonné pour la recherche de nouvelles solutions à des problèmes complexes.

La production, le stockage, le traitement et le transfert de données entre prestataires de services sont déjà devenus plus accessibles, entraînant ainsi l'avènement de nouvelles opportunités socio-économiques et technologiques.

Le gouvernement luxembourgeois vise à mettre en place un cadre exhaustif, couvrant tout, du cadre réglementaire aux services de mise en œuvre nécessaires, pour exploiter ces opportunités et encourager tous les acteurs de l'écosystème luxembourgeois à en faire de même. Cette initiative s'inscrit dans la continuité de la *Data-driven innovation strategy for the development of a trusted and sustainable economy in Luxembourg*.

Le Luxembourg, un précurseur numérique

Une réflexion sur l'écosystème des données doit nécessairement s'inscrire dans le contexte des actions entreprises par le Luxembourg pour donner suite aux recommandations de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) en matière de gouvernement numérique, publiées en 2022, ainsi que dans celui de la stratégie des données publiée par la Commission européenne. Elle s'adresse donc aussi bien au secteur public, qu'au secteur privé et à celui de la recherche.

Dans son rôle de précurseur, le Luxembourg accorde aussi une importance particulière à la création d'instances nationales des espaces européens communs de données ainsi qu'à la participation à des initiatives internationales telle que Gaia-X. La stratégie vise à **rendre accessible à un large public la description des jeux de données** contenus dans les espaces européens communs de données et à **simplifier par l'instauration d'une seule instance d'autorisation, l'accès respectivement la réutilisation des données** par les secteurs publics, privés et de la recherche.

De cette manière, le Luxembourg et ses partenaires internationaux peuvent capitaliser sur des synergies au niveau de la gouvernance des espaces européens communs de données thématiques, comme celui de la santé, de la cybersécurité, de la mobilité ou encore de

² Règlement (UE) 2025/327 relatif à l'espace européen des données de santé et modifiant la directive 2011/24/UE et le règlement (UE) 2024/2847

³ Règlement (UE) 2016/679 relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données, et abrogeant la directive 95/46/CE

l'énergie, grâce la mise en place d'une seule instance d'autorisation, par la publication de catalogues de données centralisés et par la promotion de standards interopérables. Par ailleurs, la gouvernance met en place les acteurs aptes à répondre aux besoins spécifiques de chaque secteur, tout en assurant l'interopérabilité (technique, sémantique, juridique et organisationnelle) et la sécurité des données partagées. À terme, cet écosystème interconnecté facilitera la mise en œuvre de technologies avancées, notamment de l'intelligence artificielle, en fournissant un accès à des données massives, diversifiées et de haute qualité, tout en assurant la protection des droits des utilisateurs.

En adoptant des pratiques de gestion et de valorisation des données harmonisées qui favorisent l'innovation, l'interopérabilité et la sécurité, **la présente stratégie contribue aussi aux ambitions européennes de construire une économie numérique robuste et résiliente.** Cela inclut le développement d'infrastructures numériques avancées, le soutien apporté à une main-d'œuvre qualifiée dans le domaine des données, et l'encouragement de la transparence et de l'accessibilité des données, tout en respectant les normes européennes en matière de protection des données et de la vie privée. Le Luxembourg contribue ainsi activement à une Europe plus numérique, compétitive et inclusive.

Initiatives nationales existantes liées à la gestion et la valorisation des données

Dans nos réflexions pour créer un cadre exhaustif pour la valorisation des données, **le Luxembourg peut compter sur l'élan et la dynamique des stratégies et initiatives nationales déjà en place** dans ce domaine.

- En réponse au besoin croissant d'interactions entre les services exploitant des données, le Conseil de gouvernement a adopté le 1^{er} mars 2019 le cadre d'interopérabilité national (NIF : National Interoperability Framework) élaboré par le ministère de la Digitalisation. Le NIF fournit un cadre général ainsi qu'une gouvernance permettant et facilitant un plus haut niveau d'interopérabilité entre les organismes du secteur public.
- À travers ses activités dans le domaine des technologies émergentes, le ministère de la Digitalisation vise à sensibiliser les ministères et administrations aux innovations pouvant offrir des solutions aux défis de notre société. Pour ce faire, le ministère de la Digitalisation a mis en place l'appel à projets Tech-in-GOV. De plus, le GovTech Lab, une initiative conjointe du ministère de la Digitalisation et du Centre des technologies de l'information de l'État (CTIE), lance également des appels à solutions, combinant les technologies employées au sein du secteur public et l'innovation ouverte pour accélérer le développement et l'amélioration des services publics numériques.
- La stratégie des données ouvertes mise en place par le Service information et presse (SIP), approuvée par le Conseil de gouvernement le 7 décembre 2022, soutient le programme national du Luxembourg pour la mise en œuvre des principes liés aux données ouvertes. La mise à disposition continue de données du secteur public sous forme de données ouvertes, dès lors que cela s'avère possible sous les conditions légales régissant la matière, constitue une partie intégrante de la valorisation des données du secteur public dans un environnement de confiance.
- La *Stratégie nationale de la Recherche et de l'Innovation*⁷ du ministère de la Recherche et de l'Enseignement supérieur, qui fixe le cadre du développement de l'écosystème de la recherche, est étroitement liée à une gestion et utilisation optimale des données.
- La stratégie du ministère de l'Économie *The Data-Driven Innovation Strategy for the Development of a Trusted and Sustainable Economy in Luxembourg* vise le secteur privé afin de renforcer une économie durable et fiable au Luxembourg par l'utilisation accrue des données.
- La stratégie nationale de cybersécurité pour le Luxembourg, élaborée sous la coordination du Haut-Commissariat à la protection nationale, vise à renforcer la résilience numérique du pays face aux cybermenaces. Cette stratégie est essentielle pour le développement d'une économie numérique fiable.
- L'espace des données cybersécurité ouvert mis en place par le *Luxembourg House of Cybersecurity* sera alimenté par des centres des opérations de sécurité (SOC) publics et privés. Il va promouvoir le développement d'outils de protection autonomes pour petites et moyennes entreprises (PME).
- La stratégie nationale spatiale reconnaît le potentiel des données spatiales pour une large gamme d'applications en dehors de l'industrie spatiale et souligne la participation active du Luxembourg aux discussions internationales sur l'exploration spatiale et l'utilisation durable. Le Luxembourg prend également des mesures pour établir un cadre réglementaire national solide, incluant, par exemple, une loi proposée sur les données sensibles d'observation de la terre à haute résolution.
- La stratégie spatiale de défense met en avant son plan de soutien aux initiatives intentionnelles visant à intégrer des données provenant de sources publiques et privées pour permettre une surveillance continue de la Terre et un accès

rapide aux images lorsque cela est nécessaire. De plus, la stratégie souligne l'importance de protéger les données envoyées vers et depuis les satellites en orbite.

- Enfin, le groupement d'intérêt économique dénommé *Luxembourg National Data Service* (LNDS) a été créé par le gouvernement luxembourgeois pour aider dans l'implémentation des stratégies fédérant la recherche, l'innovation et la numérisation par la mise à disposition de services de données fiables. Le LNDS vise à créer de la valeur, pour les organismes du secteur public ainsi que pour les acteurs du secteur privé et de la recherche, à partir de la réutilisation des données du secteur public et des espaces de données européens. Par ses services, il veut faciliter la découverte des données, en améliorer la qualité, enrichir leurs contenus, sécuriser leur traitement, gérer leur cycle de vie, protéger la confidentialité des sujets de données et renforcer la capacité de traitement.

Vers une approche réglementaire nationale pragmatique

L'utilisation, la réutilisation et l'analyse des données aux fins de leur valorisation repose aujourd'hui déjà sur un cadre réglementaire robuste et toujours en cours d'expansion. Il traite notamment de la gouvernance des données, de la protection des droits fondamentaux, de l'utilisation et de la réutilisation des données du secteur public, des intermédiaires de données entre acteurs du secteur privé, de la sécurité des données, de l'interopérabilité des données, de la mise à disposition de données relatives aux produits connectés, de la mise à disposition de données à caractère non personnel détenues par le secteur privé au profit du secteur public dans des situations exceptionnelles, de la facilitation du changement de service de traitement de données et du développement de normes d'interopérabilité pour les données.

Le gouvernement a décidé que la gouvernance mise en place dans le règlement (UE) 2022/868 sur la gouvernance européenne des données (DGA) sera reproduite pour tous les espaces européens communs de données dans un but de simplifier, pour les potentiels utilisateurs, l'accès aux catalogues de données contenus dans les espaces de données respectifs et accélérer les demandes d'accès. Dans le cadre du règlement sur les données, le Luxembourg veille à établir une gouvernance en cohérence avec la régulation sur la gouvernance européenne des données et de l'espace numérique en général et à soutenir la création d'un marché unique européen pour les données.

En ce qui concerne l'utilisation, la réutilisation et l'analyse des données aux fins de leur valorisation, le cadre réglementaire que le Luxembourg entend mettre en place, sera étendu dans les années à venir, notamment à travers l'adoption de règlements européens en matière des espaces européens communs de données.

En effet, la Commission européenne paraît envisager l'adoption de règlements européens additionnels afin de réglementer de manière spécifique les (a priori) 14 espaces communs européens sectoriels⁴. Le premier de ces règlements est celui relatif à l'espace européen des données de santé (règlement (UE) 2025/327), qui constitue un cadre dédié aux données de santé (*lex specialis*), qui spécifie les règles prévues par le règlement sur la gouvernance des données (*legi generali*).

Une fragmentation réglementaire dans le cadre de la mise en œuvre des 14 différents régimes juridiques d'accès et de réutilisation de données sectoriels, qui risquent de s'appliquer de manière concurrente et/ou de manière complémentaire, aura comme effet de complexifier l'accès et la réutilisation des données et de potentiellement freiner la valorisation des données.

Pour éviter de tels effets, le Luxembourg préconise l'adoption d'**une approche d'autorisation harmonisée par un organe centralisé et spécialisé en charge d'octroyer les accès et la réutilisation** par des entités publiques et privées éligibles.

La présente stratégie nationale des données vise à soutenir tous les acteurs de l'écosystème des données en préconisant une approche réglementaire nationale pragmatique et en construisant une procédure unique d'accès et de réutilisation des données à travers les secteurs concernés par les espaces européens communs de données. Ainsi, les acteurs de l'écosystème des données peuvent bénéficier d'une sécurité juridique augmentée pour générer une plus-value à partir des données. En insistant sur la transformation numérique du pays, le Luxembourg vise à mettre en place des infrastructures de pointe, d'augmenter l'efficacité, la proactivité des services publics et d'encourager l'innovation dans le secteur privé.

⁴ À savoir : agriculture, patrimoine culturel, énergie, finances, Pacte vert, santé, langue, fabrication, médias, mobilité, administration publique, recherche et innovation, compétences et tourisme.

À travers une gouvernance des données efficace : l'importance de la valorisation des données dans un environnement de confiance

Les bases de l'approche réglementaire nationale pragmatique ont été posées par le gouvernement luxembourgeois par ses efforts en vue d'une valorisation des données dans un environnement de confiance.

Le gouvernement luxembourgeois a donné un nouvel élan à la réutilisation des données au Luxembourg en proposant un cadre juridique pour la mise à disposition, l'utilisation et la réutilisation des données dans le cadre du règlement sur la gouvernance des données et en établissant comme principe le *Once Only* qui vise à réduire la redondance des échanges d'informations entre les administrés et les administrations publiques pour simplifier les démarches, et par là diminuer la charge administrative pour les citoyens et les entreprises.

La gouvernance y établie, a la vocation de servir de plan-modèle pour gérer l'échange de données et la création d'espaces communs de données à travers

les différents secteurs d'activité de l'écosystème luxembourgeois. Le gouvernement en conseil a d'ailleurs confirmé cette approche législative centralisée en actant son intention d'établir au Luxembourg une gouvernance et procédure uniques d'accès et de réutilisation des données à travers tous les futurs espaces européens communs de données.

La stratégie nationale des données vise par ailleurs à faire de cette gouvernance pour la valorisation des données, un levier de la compétitivité numérique du Luxembourg en garantissant son attractivité et compétitivité sur le plan national et international comme échangeur des données, par l'unicité et par la convivialité des procédures d'accès et de traitement des données de manière transsectorielle.

En posant ce cadre de valorisation de données, l'État veut positionner le Luxembourg comme acteur de premier plan dans une économie des données, où les échanges peuvent se dérouler de manière fluide et sécurisée, tout en renforçant la collaboration entre acteurs intéressés de différents États membres au sein de l'Union européenne.

4. Vision stratégique

Pour saisir pleinement les opportunités que peuvent renfermer les données, le Luxembourg crée un environnement socio-économique attractif, performant, souverain et sécurisé pour tous les acteurs publics et privés ainsi que pour les citoyens. Grâce à une utilisation judicieuse des données, le Luxembourg facilite la prise de décision éclairée et efficace, promeut l'innovation et la recherche par l'exploitation et la valorisation des données, stimule ainsi l'économie de données, et rend les démarches administratives plus efficaces et simples d'utilisation. Sur le plan international, le Luxembourg devient un hub européen de données fiables, de haute qualité et facilement exploitables. Le Luxembourg s'engage à promouvoir un accès transparent et une utilisation respectueuse des données, tout en garantissant leur sécurité et leur protection, en conformité avec les valeurs européennes. Le bien-être des citoyens et la contribution à un monde plus durable est au cœur de cette stratégie de données.

Être le garant d'un environnement de données attractif, performant, souverain et sécurisé

Pour réaliser cette vision, le gouvernement luxembourgeois endosse le rôle de précurseur en matière de données. Il établit **une gouvernance centralisée facilitant l'accès, l'utilisation et la réutilisation des données du secteur public par des organismes publics et privés à l'échelle nationale et internationale**. Les effets positifs de cette gouvernance se répercuteront aussi bien sur le secteur public que sur le secteur privé et la recherche, et se manifesteront concrètement dans l'adoption de nouvelles réglementations, de standards et de technologies interopérables, ainsi que de procédures opérationnelles efficaces et exemplaires. Il devient par-là le garant d'un environnement des données attractif, performant, souverain et sécurisé.

- **Attractif**, parce que la facilité à trouver, l'accessibilité, l'interopérabilité et la réutilisabilité des données au Luxembourg fait partie de l'essence même de cet écosystème des données. Tous ces acteurs se voient donc non seulement immergés dans une culture de données existante ou bénéficient de partenaires potentiels à leur niveau de savoir en matière de données, mais

également d'un accès facilité aux données et d'une position de départ avantageuse pour valoriser les données.

- **Performant**, parce que le Luxembourg mise d'une part sur une gouvernance centralisée dont les mécanismes et procédures sont réutilisés pour répondre aux exigences des réglementations nationale et européenne. Les acteurs de l'écosystème des données au Luxembourg peuvent donc profiter de procédures homogènes, allant de la demande d'accès pour une réutilisation des données du secteur public jusqu'à la participation dans les espaces européens de données. Et, d'autre part, sur une gouvernance transversale laissant à chaque acteur de l'écosystème des données du secteur public, la liberté d'adresser les spécificités de son propre domaine.
- **Souverain et sécurisé**, parce que le gouvernement vise à mettre en œuvre une réglementation pragmatique et des solutions propres pour adresser les opportunités et défis d'un écosystème de données dynamique et évolutif. L'idée, telle que décrite dans la vision, est de progresser sans sacrifier ni la sécurité, ni la protection des données.

La volonté et les efforts précités aboutissent finalement dans **la mise en place par le gouvernement, d'une Data Factory**, supervisée par le ministère de la Digitalisation. L'objectif de la *Data Factory* est de soutenir les entités des secteurs privé et public, ainsi que les acteurs de la recherche scientifique, dans la mise en œuvre de la présente stratégie nationale des données.

La Data Factory vise le développement d'un écosystème de valorisation des données, basé sur la mise à disposition et de la réutilisation d'informations prêtes à l'emploi et permettant la création de services et de produits de données accessibles et interopérables.

Ainsi, la **Data Factory** constitue une collaboration de parties prenantes qui facilite, en particulier :

- la **collaboration** entre les principaux acteurs de la stratégie nationale des données et les diverses initiatives nationales contribuant à sa mise en œuvre ;
- la **fourniture d'informations relatives aux ressources et services** dans le contexte de la valorisation des données ;
- la **fourniture d'informations relatives aux activités** de l'*AI Factory*, de la *Quantum Factory* et d'autres initiatives contribuant à une chaîne d'innovation numérique ;

- la **mise en œuvre de la promotion nationale et internationale de l'écosystème** de la valorisation des données ;
- la **fourniture de conseils** liés à la mise en œuvre de la stratégie nationale des données.

Habiliter le citoyen à valoriser ses propres données

Les effets d'un environnement de données attractif, performant, souverain et sécurisé a des répercussions tangibles sur les citoyens du Luxembourg. Une culture des données avancée et dynamique dans la sphère professionnelle impacte la société en général, contribuant ainsi à la prolifération d'**une culture des données forte, effective et partagée par tout le tissu social luxembourgeois**. Elle crée les bases solides d'une **compréhension plus large des opportunités et des défis du partage et de l'utilisation des données par le grand public**, et pour une gestion plus efficace et maîtrisée de ses propres données. Les nouveaux besoins doivent être adressés par toute une panoplie d'acteurs économiques en proposant de nouveaux produits et services pour favoriser réellement le rapprochement des citoyens avec leurs propres données.

Concevoir des politiques axées sur les données

Le Luxembourg construit l'avenir avec ambition et dans l'intérêt général de la société, de façon équitable et à la pointe des défis écologiques. À cette fin, il **se dote des moyens pour enrichir ses vues sur des opportunités ou défis par les informations générées à partir des données à sa disposition**, soit directement, soit par agrégation, le cas échéant, à partir de données en provenance d'autres acteurs du secteur public, ou dans des cas exceptionnels définis par la loi, en provenance d'acteurs privés⁵. Les données aident donc à établir des initiatives politiques et entrepreneuriales fondées et informées, ainsi qu'à leur évaluation continue pour procéder aux ajustements nécessaires de manière agile.

Le Luxembourg entend donc favoriser :

- l'**élaboration de stratégies, politiques et initiatives** en enrichissant l'expertise et les informations directement disponibles aux décideurs par des informations contenues dans les données ;
- la **prise des décisions informées** en interrogeant les données à leur disposition ; et
- la **mesure de l'impact de ses politiques, décisions et initiatives**, et leur ajustement le cas échéant sur base de ces analyses d'impact.

⁵ Règlement (UE) 2023/2854 concernant des règles harmonisées portant sur l'équité de l'accès aux données et de l'utilisation des données et modifiant le règlement (UE) 2017/2394 et la directive (UE) 2020/1828 (règlement sur les données)

Fournir des services publics simples, rapides et efficaces

L'utilisation et la valorisation des données facilitent **l'amélioration et l'optimisation des services publics en vue d'une diminution de la charge administrative pour les citoyens, les entreprises et les agents de l'État**. Les ministères et administrations veillent à échanger les données nécessaires à accomplir leurs missions et **proposent proactivement des services** qui soutiennent les citoyens et les entreprises dans la réalisation de leurs projets tout en respectant la vie privée, **renforçant ainsi les principes directeurs comme le *Once Only***. Ceci implique également la suppression de procédures superflues, **promouvant ainsi la simplification administrative**. À l'avenir, dans un écosystème de données performant, il est envisageable qu'avec le consentement explicite des individus ou des entités concernées, les données provenant du secteur privé ou de la recherche puissent être utilisées pour améliorer les processus publics.

L'augmentation de la performance des services administratifs est directement mise au bénéfice des citoyens et entreprises, et va de pair avec une nouvelle culture des données ainsi que les compétences y relatives, qui feront du Luxembourg un partenaire attractif dans tout projet en matière de données.

Créer de la plus-value et de l'innovation axée sur les données

Le Luxembourg vise à créer **un écosystème de données favorable à l'innovation et la création de valeur ajoutée**. Un écosystème qui stimule la création de nouvelles connaissances et apporte des solutions à de nombreux défis actuels et futurs de la société. Concrètement, il vise à **améliorer la compétitivité des entreprises luxembourgeoises, tant au niveau national qu'international**, et soutient leur capacité à **attirer les talents nécessaires** à leur bon développement. Il encourage l'esprit d'initiative, assurant ainsi la diversification de l'économie et le développement de secteurs de pointe.

L'écosystème des données envisagé comprend des services de données exhaustifs, interopérables et interconnectés pour les secteurs public et privé, signifiant une réelle avancée en matière de valorisation des données : facilitation et encadrement de l'accès aux données ; amélioration de la qualité, la gestion et la sécurité des données ; renforcement des capacités de traitement de données ; génération de données synthétiques ; anonymisation et pseudonymisation ; ainsi que réflexions sur les implications éthiques, juridiques et sociales du travail avec les données. Tous ces services doivent permettre la création de valeur ajoutée à partir de l'utilisation et de la réutilisation des données, y compris les données du secteur public, dans un environnement de confiance.

La *Data Factory* mentionnée précédemment veut faciliter l'émergence de cet écosystème des données. Elle rassemble une grande diversité d'acteurs offrant des services en matière de traitement de données, oriente les porteurs de projets de données vers les bons acteurs ou crée les synergies entre eux en vue d'une optimisation de la valorisation des données de l'écosystème au sein d'un projet précis.

Devenir un pôle d'excellence en matière de données

Le Luxembourg aspire à **consolider sa position comme nation numérique modèle, axée sur les données**. Il entend développer et rendre accessibles des ensembles de données riches et de haute qualité, soumis à des mécanismes de gouvernance solides et efficaces. Pour ses secteurs phares, tels que l'espace ou la finance, le Luxembourg s'efforce de réaliser des jeux de données stratégiques de grands volumes, tout en maintenant l'accent sur la qualité.

En plus de rendre ses propres données accessibles, le Luxembourg endosse le **rôle d'un pont vers les ensembles de données d'autres pays et encourage un écosystème de données par le biais de collaborations internationales**. Pour ce faire, il développe son expertise en matière de données, sa gouvernance et ses connaissances sur la mise à disposition des données nationales, ainsi que la gouvernance et les conditions d'accès dans d'autres pays. Compte tenu de sa réalité géopolitique, il continue à considérer les flux de données transfrontaliers comme une priorité. Il établit des cadres juridiques et techniques en collaboration avec les États membres de l'Union européenne ainsi que d'autres pays partenaires stratégiques pour garantir que les données soient échangées de manière sécurisée et responsable.

Le Luxembourg **continue d'investir par ailleurs dans des programmes de recrutement de talents et de formation pour renforcer les compétences** et permettre la reconversion de la main-d'œuvre existante dans tous les domaines liés aux données. Enfin, il encourage les collaborations entre le monde académique, l'industrie et les services publics par diverses mesures, promouvant ainsi le pays comme une destination attrayante pour les talents nationaux et internationaux.

Le Luxembourg vise à devenir un pôle d'excellence en données grâce à une gouvernance centralisée et sécurisée, favorisant l'innovation, la compétitivité et des services publics efficaces.

5. Principes directeurs

Approche centrée sur l'humain

Le Luxembourg construit l'avenir avec ambition et dans l'intérêt général de la société, en adoptant une approche équitable et en relevant les défis écologiques. La **centralité de l'humain dans ces réflexions** est primordiale. Ses besoins et exigences doivent être pris en compte dès le début de toute valorisation des données et doivent constituer la base des décisions prises, des politiques élaborées, ainsi que des produits et services conçus.

Pour placer davantage l'humain au centre des réflexions et maximiser le potentiel des données, le Luxembourg offre aux personnes intéressées un cadre pour accéder à leurs propres données produites par l'internet des objets ou les aider à mettre volontairement à disposition, à des fins altruistes, des données personnelles détenues par des organismes du secteur public.

Protection de l'individu et des données

Au Luxembourg, **tout traitement des données doit respecter les droits fondamentaux** garantis par la Constitution, la Charte des droits fondamentaux de l'Union européenne et la Convention européenne des droits de l'Homme.

Ainsi, les données doivent être traitées de manière à garantir les exigences en matière de protection des données, notamment en termes de transparence, de loyauté et de sécurité des données.

Valorisation des données

Dans un esprit d'optimisation de la valorisation des données de son écosystème, le Luxembourg promeut des données **FAIR**, soit **F**aciles à trouver, **A**ccessibles, **I**nteropérables et **R**éutilisables.

- **Faciles à trouver** : une vue d'ensemble sur les données de l'écosystème via un ou plusieurs catalogues des données permet de créer une meilleure visibilité sur les données, de la transparence, d'en faciliter l'identification et de fédérer leur utilisation.

En même temps, un écosystème des données doit instaurer une transparence quant à la collecte, le traitement et l'utilisation des données du secteur public, ainsi qu'une transparence quant au rôle des données dans la prise de décision et délivrance de produits, services ou encore décisions.

- **Accessibles** : chaque donnée, doit être aisément accessible dans le respect du cadre légal en vigueur afin de faciliter sa réutilisation par des tiers, de fédérer la création de valeur ajoutée et de stimuler l'innovation. En rendant les données de l'écosystème luxembourgeois accessibles de manière proactive, systématique et standardisée, ses acteurs peuvent permettre aux administrations, citoyens, chercheurs, entreprises et organisations de les utiliser pour améliorer leurs services aux citoyens, prendre des décisions avisées, pour innover et pour participer au processus démocratique.

L'accessibilité des données doit être approchée par le principe de l'ouverture par défaut. Toute donnée produite doit, par défaut et dans les limites du cadre légale et réglementaire en vigueur, être considérée comme donnée ouverte. Toute dérogation à ce principe doit être justifiée.

- **Interopérables** : des applications et des systèmes doivent pouvoir échanger des données de manière sécurisée, standardisée, automatique, voire proactive, indépendamment des silos organisationnels pour favoriser la collaboration entre organisations et fédérer l'échange d'informations entre différents systèmes, et de ce fait, créer une valeur ajoutée pour le citoyen, les entreprises et les organisations.
- **Réutilisables** : les organismes détenteurs de données font en sorte que leurs données soient facilement réutilisables en spécifiant clairement les conditions d'un traitement ultérieur ou d'une réutilisation, en spécifiant de manière détaillée la provenance de la donnée ainsi que le contexte de leur collecte et en s'alignant sur des standards sémantiques et techniques partagés par l'écosystème.

Chaque donnée relevée doit l'être **par défaut au format numérique**. Toute donnée, qui dans un esprit d'inclusion et d'accessibilité est relevée dans un format non-numérique, doit faire l'objet d'une procédure de numérisation a posteriori afin de rendre cette donnée disponible au format numérique.

Dans une optique d'optimisation de l'exploitation de l'information et des connaissances contenues dans les données, une mise à disposition des données sous format lisible à la machine doit être la finalité.

Partie 2.

Leviers

Six leviers d'action

La présente stratégie nationale des données prévoit des ambitions et des actions concrètes, organisées selon six leviers, qui seront implémentées d'ici 2030 afin de réaliser la vision du gouvernement et de **faire de l'écosystème des données au Luxembourg un cadre propice pour le secteur public, la recherche et les entreprises nationales et internationales** soutenant l'innovation et la croissance du pays par le biais de la valorisation responsable des données.

La **Data Factory** apportera un soutien précieux aux parties prenantes impliquées dans une multitude d'actions à suivre. Elle vise à développer un écosystème de valorisation des données, basé sur la mise à disposition et la réutilisation d'informations prêtes à l'emploi, permettant ainsi la création de services et de produits de données accessibles et interopérables.

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

1. Gouvernance et réglementations

Ambition : Établir une gouvernance des données

Pour réaliser la vision de la présente stratégie, la mise en place d'une **gouvernance claire, structurée et transversale** est nécessaire afin d'offrir à tous les acteurs une vue d'ensemble sur les données potentiellement accessibles, une procédure d'accès unifiée et simple, des environnements sécurisés de traitement des données, des services d'anonymisation et de pseudonymisation et un contact simple et évident avec des experts tout au long de la chaîne de production de valeur.

Le gouvernement, en mettant en place une telle gouvernance des données, s'assure que les secteurs public, privé et de la recherche puissent bénéficier pleinement des informations contenues dans les données du secteur public et des espaces européens communs de données.

➤ Action 1 : Une gouvernance centralisée – approche unique du gouvernement luxembourgeois comme catalyseur de l'innovation et levier de la compétitivité numérique

Le gouvernement luxembourgeois met en place une gouvernance des données centralisée, unique et efficace pour gérer l'accès aux données du secteur public et des espaces européens communs de données. Cette initiative vise à fédérer les efforts des différents acteurs de l'écosystème des données afin d'optimiser, d'innover et de renforcer la compétitivité numérique, tout en respectant les nombreuses normes liées à l'accès, au traitement et à la réutilisation des données.

Cette gouvernance des données centralisée repose sur quatre piliers fondamentaux.

- Un **point d'information unique** est placé sous l'autorité du ministère de la Digitalisation auprès duquel toutes les parties intéressées peuvent, à travers un catalogue des données, recueillir l'information concernant l'existence de jeux de données et l'information concernant la procédure et les conditions d'accès.
- Une seule **Autorité des données**, le Commissariat du gouvernement à la protection des données auprès de l'État (CGPD), autorise ou refuse, via

une procédure de demande d'accès harmonisée et unifiée, l'accès et l'utilisation des données du secteur public et des espaces européens communs de données sur base de critères légaux.

- Le CTIE met à disposition un **environnement sécurisé de traitement** des données et d'**outils connexes** dans lequel les traitements des données préalablement autorisés par le CGPD sont effectués, le cas échéant avec l'intervention d'un tiers de confiance pour des opérations d'anonymisation, de pseudonymisation et d'agrégation de données.
- Le LNDS fournit une **assistance** à toutes les entités pour accéder aux espaces européens communs de données et pour la préparation des demandes d'accès et de réutilisation à introduire auprès de l'Autorité des données.

› Action 2 : Standardiser les conditions d'accès aux données

L'accès aux données du secteur public est défini par les politiques, les normes et procédures nationales de gouvernance, qui visent à garantir la valorisation des données tout en les protégeant contre toute utilisation abusive.

Comme mentionné dans les alinéas précédents, une **gouvernance centralisée, unique et efficiente assure que les procédures d'accès aux données du secteur public et aux espaces européens communs de données ainsi que les espaces de traitements sécurisés respectifs soient synergétiques et standardisés**. Ce haut niveau de standardisation au niveau juridique et organisationnel permet aux acteurs de l'écosystème d'apprendre rapidement et de comprendre parfaitement les procédures de demandes d'accès aux données et d'optimiser leurs propres flux et procédures internes en fonction.

Le secteur privé peut s'inspirer à son tour des procédures et des conditions d'accès standardisées du secteur public pour établir son propre cadre définissant l'accès aux données. Cela aboutit à un écosystème de données qui facilite l'accès et la réutilisation potentielle de toutes sortes de données, dans un cadre à la fois efficace et sécurisé.

La mise en place d'un registre référençant les cas de partage de données réussis au sein de l'écosystème des données luxembourgeois permet de diffuser des informations sur les procédures et conditions d'accès correspondantes. Cela peut aider à orienter les acteurs de l'écosystème dans leurs démarches et inspirer la création de standards organiques initiaux, suivie de l'adoption de standards effectifs et prouvés pour l'écosystème entier.

L'adoption de tels standards permet également de régler des matières plus intrinsèques telles que des considérations éthiques et morales. Ces valeurs

peuvent être figées dans des standards au niveau des conditions d'accès et de réutilisation des données et s'appliquer à l'écosystème entier. Par exemple, le Code de conduite européen pour l'intégrité en recherche exige que les chercheurs, les institutions et les organisations de recherche veillent entre autres choses, à ce que l'accès aux données soit aussi ouvert que possible et aussi fermé que nécessaire, et qu'ils soient transparents sur les modalités d'accès et d'obtention des autorisations d'utilisation.

› Action 3 : Définir des sources authentiques

Le renforcement de la confiance dans l'accessibilité ainsi que le partage de données nécessitent une approche de **définition de sources authentiques communes** entre les acteurs de l'écosystème des données et plus spécifiquement au sein du secteur public. La définition des sources authentiques repose sur plusieurs éléments clés : l'identification des données authentiques et des sources qui les contiennent, l'acceptation des responsabilités de maintenance, de mise à jour et d'accès, la description standardisée des données, et la mise en œuvre de normes techniques. Ces éléments sont essentiels pour garantir un partage efficace et efficient des données, afin d'atteindre les objectifs de la stratégie en cours.

En plus d'un démarchage proactif pour identifier les sources authentiques auprès des organismes responsables, le ministère de la Digitalisation consultera le futur registre des protocoles *Once Only* afin d'identifier des sources authentiques de données.

› Action 4 : Définir des standards interopérables

La **définition de standards organisationnels, juridiques, sémantiques et techniques** (p. ex : API) ou structurels (format de données) **est une précondition au partage accéléré, fluidifié et facilité des données**. L'élaboration de définitions et de significations communes pour des structures sémantiques de données (dictionnaires de données), par exemple, assure que les données disponibles soient utilisées sans mécompréhension, diminuant ainsi considérablement le risque d'analyses erronées. La mise en place d'une stratégie nationale unifiée pour la création d'identifiants uniques et persistants pour tout jeu de données du secteur public facilitera le repérage de données et garantira un suivi cohérent de la provenance tout au long du cycle de vie des données.

Ces efforts de standardisation forment la pierre angulaire de l'échange des données entre les secteurs public et privé prévus par la loi. Ce sont eux qui garantissent que les données échangées puissent être comprises sans équivoque, assimilées de manière efficace et puissent être exploitées par le pays et la

société en général. Ce besoin d'interopérabilité ancré depuis 2019 dans le Cadre d'interopérabilité national au Luxembourg, se reflète de plus en plus dans les textes légaux de l'Union européenne qui en voit une condition de base pour la réalisation de sa stratégie des données européennes, plus précisément de ses espaces européens communs de données.

En outre, un standard national, DCAT-AP-LU, sera recommandé pour décrire les données, formant une extension luxembourgeoise du DCAT-AP, un standard de partage des informations sur les catalogues contenant des descriptions d'ensembles de données et de services de données en Europe, assurant ainsi l'interopérabilité des catalogues nationaux et européens.

› Action 5 : Établir un cadre d'identification du secteur public améliorant la protection des données

Le numéro d'identification nationale des personnes physiques, le « matricule », est l'identifiant unique pour les citoyens au Luxembourg. Il est également souvent utilisé par le secteur privé pour effectuer des correspondances d'identité.

Bien que le numéro d'identification nationale se soit avéré simple et efficace, il affiche ouvertement des informations sur la personne concernée, telle que la date de naissance. Pour ces motifs, il doit être protégé en raison de ses caractéristiques globales uniques. De plus, sa collecte n'est justifiée que dans des cas de figure limités prévus par la loi.

Dès lors, il convient d'**explorer d'autres solutions, comme la gestion d'identifiants pour établir des liens uniques entre différents jeux de données** sans affichage ouvert d'informations sur les individus auxquels elles se rapportent.

2. Talents et compétences

Ambition : Promouvoir une société axée sur les données et renforcer les talents numériques

L'ambition du Luxembourg de renforcer les talents et compétences en matière de données nécessitera une **approche multidimensionnelle**. Pour accélérer l'adoption des technologies autour des données, il est essentiel de cultiver non seulement les compétences techniques nécessaires pour gérer et analyser les données, mais aussi les compétences analytiques et juridiques nécessaires pour comprendre et exploiter le potentiel des données. De plus, pour garantir que les données sont utilisées de manière responsable et optimale, il est crucial que les employés, à tous niveaux organisationnels, mais également les citoyens soient formés.

Pour atteindre cet objectif, le Luxembourg vise à développer les compétences en matière de données et à créer une véritable culture des données, à tous les niveaux de la société. Cela implique la mise en œuvre d'approches adaptées en fonction des profils de compétences. Le Luxembourg a identifié trois profils clés :

- **Experts en données :** des développeurs de solutions de données dotés d'une connaissance technique approfondie et qui conçoivent des algorithmes, entraînent et affinent des modèles, construisent des pipelines de données et intègrent ces modèles dans des produits. Ce groupe comprend des *data engineers* ou des *data scientists* par exemple. Ils sont les principaux innovateurs dans le domaine des données. Il est crucial qu'ils aient accès à une infrastructure adéquate, à une formation technique spécialisée et à un soutien continu pour développer des solutions de pointe.

Accompagnés par un second groupe d'experts en données, notamment des juristes spécialisées en la matière, ces premiers voient leur travail encadrer par des normes pragmatiques et fédératrices de l'innovation en matière de données.
- **Praticiens en données :** ces professionnels comprennent les concepts autour des données et mettent en œuvre et maintiennent des systèmes de données dans leurs domaines, même s'ils ne construisent pas eux-mêmes les pipelines de données. Cette catégorie comprend les analystes commerciaux, les développeurs d'affaires, les chefs de projet, le support informatique, les experts juridiques, les *data stewards*, et plus encore. Pour eux, il est important d'avoir une formation spécifique au domaine, une sensibilisation et des opportunités d'échange.

- **Citoyens** : tous les citoyens qui utilisent des applications et des solutions de données préconstruites (par exemple, des outils d'aide à la décision, des *chatbots*, des analyses prédictives) pour améliorer leur quotidien, ainsi que tous les citoyens qui sont impactés par des décisions, politiques, produits ou services axés sur des données. Il est important qu'ils sachent comment ces applications et solutions utilisent les données, personnelles et non personnelles, pour pouvoir maximiser les avantages qu'ils peuvent en tirer et garantir une utilisation responsable des données. Cela inclut une formation de base sur les fonctionnalités des données, les meilleures pratiques pour l'utilisation des outils de données et une sensibilisation aux implications juridiques et de sécurité des données.

Pour répondre à ces profils, le Luxembourg prévoit des actions dans différents domaines, notamment **l'attraction et la rétention des talents, l'éducation, la formation professionnelle et la sensibilisation**. Ces efforts seront menés en collaboration avec les universités, les écoles, les institutions de recherche, les prestataires de formations. En se concentrant sur ces domaines et en tirant parti des partenariats, le Luxembourg vise à construire un écosystème de données robuste qui soutient une croissance et un développement durables.

Le plein potentiel des données se manifeste seulement si l'on parvient à créer une réelle culture des données au sein de la société luxembourgeoise. La volonté et la possibilité d'utiliser, de partager des données, d'apprendre et ainsi de remettre en question ses propres vues, idées et procédures est notamment véhiculé aux citoyens, aux agents du secteur public et aux entreprises à travers un partage de réussites, de pratiques avérées ou encore de défis relevés.

Cette sensibilisation, mais aussi l'emploi des outils nécessaires pour favoriser cette culture des données revient aux ministères et administrations, aux institutions de recherche et aux entreprises en sus d'efforts à mener de manière transversale et centralisée.

Cependant, il ne suffit pas de créer une culture générale des données ; il est également crucial de développer des talents experts en matière de données, tels que les analystes de données, les *data stewards*, des juristes spécialisés en la matière et autres spécialistes, qui manquent actuellement au Luxembourg. Pour cela, il est nécessaire de mettre en place des programmes de formation avancée et des initiatives de développement professionnel qui ciblent ces compétences spécialisées. L'Université, les centres de recherche et les entreprises doivent collaborer pour offrir des opportunités de formation continue, des stages et des programmes de mentorat qui permettent aux professionnels de se perfectionner et de rester à la pointe des avancées technologiques, comme celles énumérées dans les actions qui suivent.

En parallèle, il est essentiel de sensibiliser les citoyens, idéalement dès leur plus jeune âge à l'importance des données et de les encourager à poursuivre des carrières dans ce domaine. Cela peut être réalisé par le biais de programmes éducatifs adaptés, d'ateliers pratiques, de campagnes de sensibilisation et de partenariats avec les écoles pour intégrer les compétences en matière de données dans les programmes scolaires. En investissant dans l'éducation et la formation à tous les niveaux, le Luxembourg peut non seulement créer une culture des données, mais aussi développer une expertise de haut niveau qui soutiendra l'innovation et la compétitivité du pays à long terme.

En se concentrant sur ces deux aspects – la culture générale des données et le développement des talents experts – le Luxembourg pourra construire un écosystème de données robuste et dynamique, capable de répondre aux défis actuels et futurs et de soutenir une croissance et un développement durables.

› Action 6 : Instaurer une littératie des données

Une des missions principales de cette stratégie doit concerner l'inclusion numérique, le processus qui vise à rendre le numérique accessible à chaque individu et à lui transmettre les compétences, ici particulièrement une littératie en matière des données, qui seront le levier de son inclusion, sociale et économique. Le Luxembourg a l'ambition d'inclure tous les citoyens dans la transformation digitale de la société et de contrecarrer ainsi le clivage numérique qui risque de la diviser. Les données ne doivent pas être considérées comme une menace ou fardeau mais comme une opportunité pour tous. Ainsi, lors de l'élaboration du nouveau Plan national d'inclusion numérique, le volet des données aura un focus très précis afin de développer et d'offrir des formations ou événements pertinents aux citoyens du Luxembourg.

Renforcer la littératie des données dans la société civile

La culture des données joue un rôle important dans la participation civique. Pour participer à la société actuelle axée sur les données et les algorithmes, les citoyens luxembourgeois doivent bénéficier d'une compréhension plus approfondie des données, des technologies connexes et de leur impact. Acquérir les compétences nécessaires dès le jeune âge est crucial pour gérer et accéder ses propres données mais également les données d'autres sources multiples, par exemple, de la plateforme des données ouvertes ou des médias. Accéder aux données du secteur public, les parcourir et les évaluer de manière critique permettra aux résidents du pays de participer au processus d'élaboration des politiques dont les résultats les affectent souvent directement. De plus,

la compréhension publique des avantages des données et leur partage, par conséquent, la confiance et l'intérêt pour la collaboration et l'engagement devraient être élevés : pour y parvenir, les résultats de la recherche axée sur les données doivent être publics et accessibles. La population intéressée devrait avoir la possibilité de participer au traitement et aux décisions concernant l'utilisation secondaire des données publiques (y compris l'utilisation des données du secteur public pour former des systèmes d'IA) et de bénéficier des résultats de cette réutilisation.

Renforcer la littératie des données dans le secteur public

En plus des efforts pour le développement d'une culture des données, il est important de créer une culture de réutilisation des données publiques parmi les agents du secteur public pour démystifier le sujet des données, d'aborder de manière proactive les défis concernant la commercialisation des données, la sécurité, la confidentialité, l'anonymisation et la pseudonymisation des données sensibles, et d'établir des pratiques responsables de gestion des données. Le Luxembourg réalisera ceci par le biais de diverses campagnes de sensibilisation et événements, tels que le *Data Summit Luxembourg* annuel, soulignant le potentiel de création de valeur des données du secteur public, ainsi que des appels à défis et des *hackathons*.

Renforcer la littératie des données dans l'éducation

Le ministère de l'Éducation nationale, de l'Enfance et de la Jeunesse (MENJE) met en place des initiatives pour renforcer la littératie des données à tous les niveaux scolaires, afin de préparer les jeunes à un avenir numérique. Cela inclut des programmes éducatifs adaptés, des ateliers pratiques et des partenariats avec les écoles pour intégrer les compétences en matière de données dans les programmes scolaires.

› Action 7 : Créer un réseau d'agents du secteur public pour assurer une gouvernance verticale

L'organe central de gouvernance (gouvernance transversale) **doit pouvoir s'appuyer sur un réseau d'agents** (gouvernance verticale) qui connaissent les données du secteur public et qui sont experts dans leurs métiers, c'est-à-dire des praticiens en données. Il est nécessaire par conséquent de disposer pour chaque entité publique d'un ou de plusieurs agents responsables en matière de données (p. ex. *data steward*). Ces derniers doivent disposer de connaissances approfondies des données générées ou utilisées dans les processus métiers du ministère ou de l'administration respective et doivent en assurer la

confidentialité, la qualité et le potentiel d'utilisation au sein du secteur public.

Ces agents sont chargés de la mise en œuvre de la stratégie (p. ex : vérification que les standards sont bien appliqués dans les projets, maintenance de l'inventaire des données, etc.). Ils contribuent de manière active à la création et à l'entretien des connaissances, de la culture ainsi qu'à la révision périodique de la stratégie.

› Action 8 : Attirer et retenir des compétences en matière de données

Sur le plan des ressources humaines et des talents à recruter, **le Luxembourg doit devenir un employeur de choix pour les professionnels des données de toute spécialisation**, en leur proposant une culture et un paradigme favorable à la réalisation de leurs projets en matière de données et au développement de leurs carrières. Concrètement, l'attractivité du Luxembourg en tant qu'employeur en termes de données s'établit autour de la visibilité des projets de données, apportant une réelle plus-value à la société et repoussant les limites technologiques en proposant des idées novatrices. Par conséquent, le Luxembourg entend communiquer proactivement sur les progrès réalisés en matière de données en mettant en avant des projets innovants.

Le Luxembourg se dote des compétences nécessaires à la mise en œuvre des actions, comme les scientifiques ou les ingénieurs de données, contribuant à la réalisation de la vision susmentionnée. Une mesure prise concernera la création du *Deep Tech Lab*, le pôle d'attraction, de rétention et de développement des talents dans le domaine des technologies *Deep Tech* au Luxembourg. Il est donc indispensable que le Luxembourg cherche à cultiver et à fortifier au sein des secteurs public et privé tous les aspects du savoir touchant de près ou de loin aux données et à leur traitement. Les experts en données seront également d'une grande importance dans le cadre des compétences au niveau du développement de l'intelligence artificielle et des technologies quantiques au Luxembourg.

Développer des programmes de formation continue pour le secteur privé

Le Centre national de formation professionnelle continue (CNFPC) joue un rôle clé dans le développement des compétences en matière de données. Actuellement, le CNFPC propose un programme de *Data Analyst* qui s'adresse aux employés, indépendants et dirigeants, avec un focus prioritaire pour les professionnels non IT. En collaboration avec l'Agence pour le développement de l'emploi (ADEM), une version de ce programme est également disponible pour les demandeurs d'emploi, incluant des *soft skills*, améliorant ainsi leur employabilité.

Le CNFPC réfléchit également à un programme de formation pour les Data Scientists, qui devrait inclure des modules de *machine learning* (apprentissage supervisé et non supervisé) et de mise à niveau mathématique. Chaque formation contient un petit projet pratique pour mettre en application les apprentissages.

Le *Digital Learning Hub* (DLH), lancé en mai 2022, joue un rôle crucial dans la réduction de l'écart de compétences numériques au Luxembourg. Le DLH propose des cours spécialisés dans divers domaines de l'informatique, y compris les données. Ces cours sont accessibles à tous les citoyens adultes et visent à les aider à se reconvertir ou à améliorer leurs compétences pour répondre aux besoins du marché du travail.

Le LNDS développe également des formations spécifiques sur les sujets fondamentaux de l'utilisation responsable et sécurisé des données comme la protection des données, le cadre légal entourant le développement d'intelligence artificielle et la gouvernance des données.

Soutenir la formation universitaire initiale et continue, ainsi que la recherche

L'Université du Luxembourg envisage d'étoffer l'offre en formations initiales et continues en matière de transformation digitale et de gestion et d'analyse des données, avec pour objectif de soutenir l'*upskilling* et le *reskilling* au Luxembourg. Dans un premier temps, le *University of Luxembourg Competence Centre* (ULCC) réfléchira à la mise en place d'un certificat universitaire de formation continue en gestion des données ancré dans les recherches effectuées à l'Université dans le domaine. En cas de succès, cette formation continue pourrait déboucher sur l'organisation d'une formation initiale (bachelor et/ou master) en incluant une importante composante interdisciplinaire, vu les compétences diversifiées que doivent maîtriser les futurs spécialistes en gestion des données. Une telle formation viendrait s'ajouter au Master in Data Science existant.

L'Institut pour l'éthique numérique de l'Université de Luxembourg (ULIDE) encourage et soutient l'intégration des principes d'éthique, de transparence et de durabilité dans les cours liés à l'IA, afin de préparer les étudiants à la navigation responsable des implications sociétales de l'IA.

Ces actions coordonnées visent à créer un écosystème de données robuste et dynamique au Luxembourg, capable de répondre aux défis actuels et futurs et de soutenir une croissance et un développement durables.

Créer des formations pour les agents du secteur public

Afin d'encourager le développement d'une culture des données auprès de l'État et de favoriser le *reskilling* voire *upskilling* interne de l'État et la mise en œuvre de la *Digital Academy*, le ministère de la Digitalisation vise à soutenir l'Institut national d'administration publique (INAP) et de proposer des formations diverses dédiées aux agents de l'État.

Pour renforcer les administrations publiques, des initiatives telles que des communautés de pratique, des projets de réseautage et de mentorat pour développer les compétences des employés du secteur public seront mises en œuvre pour s'assurer que l'amélioration des compétences numériques et des données est considérée comme une priorité.

Pour soutenir efficacement l'innovation au sein de l'Administration publique luxembourgeoise, des programmes ciblés sont essentiels pour doter les agents des connaissances et compétences liées aux données et à l'IA. En s'appuyant sur les initiatives existantes des programmes de formation et de développement de l'INAP, le gouvernement priorisera des parcours d'apprentissage spécifiques axés sur l'IA, différenciés selon le rôle et le niveau de responsabilité.

Ces programmes pourraient inclure :

- une formation sur les données, les sources sur lesquelles reposent les systèmes d'intelligence artificielle : littératie des données, valorisation des données, science des données ;
- une formation spécialisée en IA pour fournir des connaissances fondamentales et avancées sur les applications de l'IA dans le service public ; ou encore
- des modules d'IA dans la formation au leadership, destinés aux cadres intermédiaires et supérieurs, pour leur permettre de gérer efficacement les équipes, de prendre des décisions éclairées et d'avoir une vision stratégique au sein d'une administration publique où la numérisation et l'IA sont de plus en plus présentes.

Cet effort complète la stratégie numérique plus large du Luxembourg et renforcera la capacité du gouvernement à diriger et à mettre en œuvre des innovations basées sur l'IA dans tous les secteurs, favorisant ainsi des services plus efficaces, transparents et centrés sur les citoyens.

Un service de formation à la culture des données a été spécialement conçu pour les employés des services publics. Conformément à la recommandation de l'OCDE relative à la création de communautés de pratique qui favorise une approche ascendante pour partager les bonnes pratiques et identifier les défis communs, entre autres, le LNDS a créé, maintient et développe sa communauté nationale de pratique en gestion des données.

De nouvelles communautés de pratique pourront inclure celles dédiées aux défis et opportunités de l'utilisation de l'IA (y compris l'IA générative) dans le secteur public, et devraient offrir un espace de dialogue non seulement au sein du secteur public, mais aussi entre les représentants du monde académique, de la société civile et du secteur privé.

3. Infrastructures

Ambition : Développer des infrastructures de pointe

Pour réaliser la vision de la présente stratégie des données, il est important de **développer des infrastructures de pointe qui permettent de travailler avec des données à petite et à grande échelle dans tous les secteurs**. Le développement d'infrastructures s'articule autour de deux axes majeurs.

Le **premier axe** vise à **établir un environnement numérique sûr, sécurisé et résilient**. Cet objectif requiert la création de plateformes fiables garantissant l'intégrité de la collecte, du stockage, du transfert et de l'utilisation des données. Il s'accompagne de la mise en œuvre de cadres de cybersécurité robustes pour protéger les systèmes et les utilisateurs.

Le **second axe** met l'accent sur la **performance et la durabilité des infrastructures**. Cette approche implique un renforcement significatif d'infrastructures comme le *cloud*, essentiel pour soutenir les acteurs traitant un grand volume de données. L'extension de la connectivité haut débit à travers le pays constitue également une priorité majeure pour garantir un accès équitable aux services numériques. En parallèle, le développement des capacités de calcul de pointe permettra de répondre aux besoins des technologies émergentes. La stratégie prévoit aussi la création de centres de données conjuguant sécurité optimale et respect de normes environnementales élevées pour assurer un avenir durable.

› Action 9 : Développer les infrastructures informatiques nécessaires à la valorisation des données du secteur public

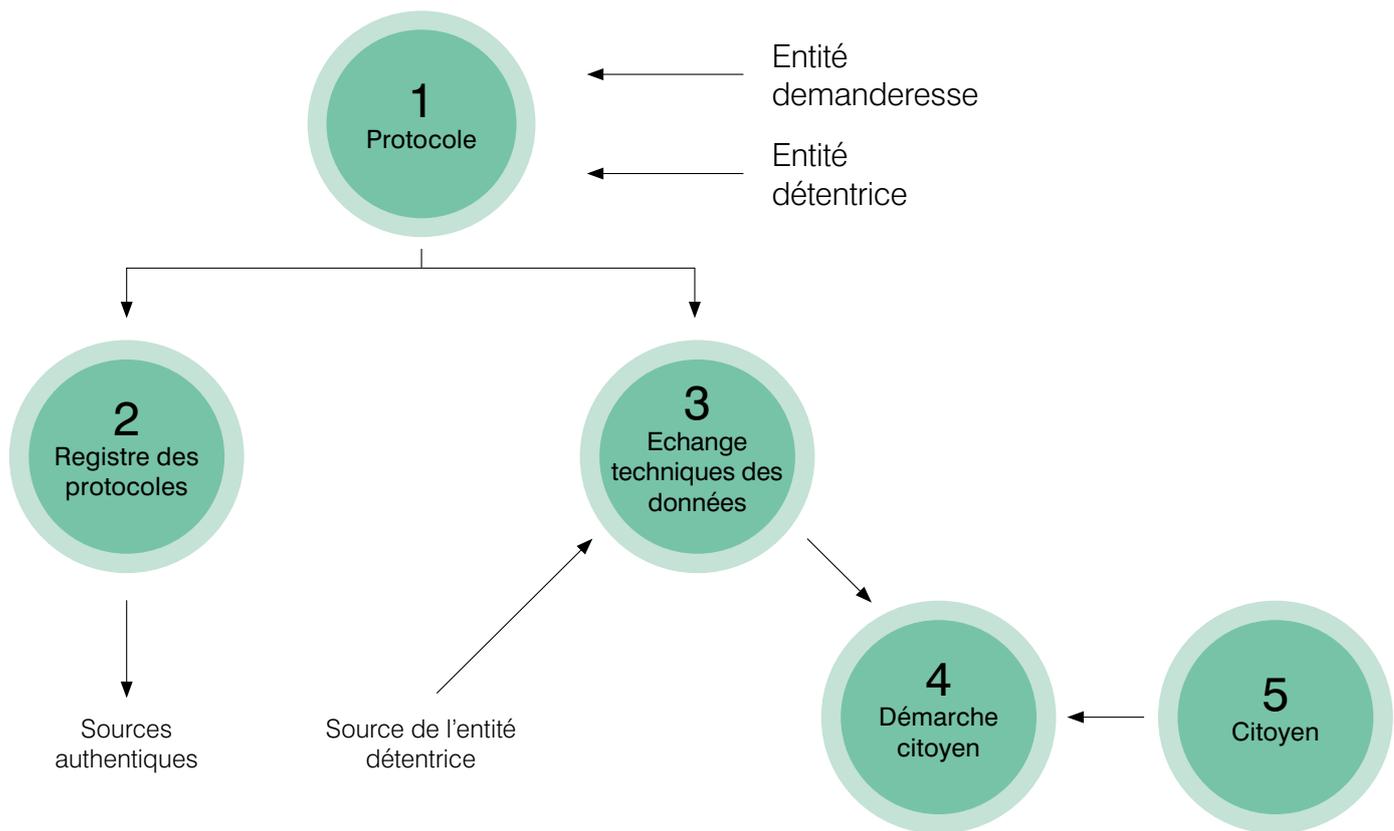
Pour **faciliter le flux de données en vue d'une optimisation de la valorisation des données**, l'État met en place des **infrastructures d'échange de données du secteur public**. D'une manière générale, il est utile de distinguer deux infrastructures différentes :

- Une infrastructure qui répond aux futures obligations du principe *Once Only*. Les données à caractère personnel concernées sont celles contenues dans des sources authentiques, identifiées, décrites et structurées de manière standardisée. Ces données sont obtenues par les entités publiques auprès d'autres entités publiques, idéalement via des interfaces techniques centralisées et standardisées. L'objectif est de réduire les barrières d'entrée pour la mise en œuvre et d'optimiser les processus liés au principe *Once Only*.
- Une infrastructure pour le traitement ultérieur de données par les entités publiques (soit par la même entité publique qui détient déjà les données, soit par une ou plusieurs autres entités publiques) et l'accès et la réutilisation de données (à caractère personnel ou non personnel) par des usagers du secteur public, y inclus les centres de recherche publics, ou du secteur privé.

Les deux infrastructures bénéficient de la mise en place d'un catalogue de données du secteur public, référencé plus haut dans cette stratégie.

Dans le cadre du *Once Only*, l'objectif de l'infrastructure est de ne plus collecter les données nécessaires à une demande ou une déclaration auprès des administrés si la donnée en question existe déjà au sein du secteur public. Les entités publiques sont alors tenues d'échanger ces données entre elles et de seulement recourir aux administrés si lesdites données n'existent pas encore au sein du secteur public. Dans ce cadre, chaque type d'échange de données est formalisé dans un protocole signé entre l'entité demanderesse et l'entité détentrice. L'Autorité des données reçoit et publie par la suite tous les protocoles *Once Only* et tient un registre des protocoles. Un échange technique des données entre les entités publiques, qui est centralisé et standardisé, est alors mis en place. Le ministère de la Digitalisation se sert du registre des protocoles *Once Only* pour identifier d'éventuelles sources authentiques. L'administré peut vérifier l'exactitude des données et, le cas échéant, entreprendre une rectification.

Dans le cadre des traitements ultérieurs et des accès et réutilisations de données, des solutions concrètes



Flux procédural relatif au principe Once Only

permettront aux parties demanderesses d'identifier des données pertinentes et d'introduire une demande d'accès aux données spécifique et standardisée. Les informations de cette demande d'accès serviront aux acteurs de la gouvernance des données d'évaluer à la fois les volets de protection des données et le volet de faisabilité technique, et, en cas d'acceptation de la demande, de procéder à des mécanismes préalables d'anonymisation, de pseudonymisation, d'agrégation, voire d'autres méthodes de contrôle de divulgation. Finalement, les données sont mises à disposition dans un environnement de traitement sécurisé pour servir uniquement autorisées sur base de la demande formulée par le réutilisateur de données.

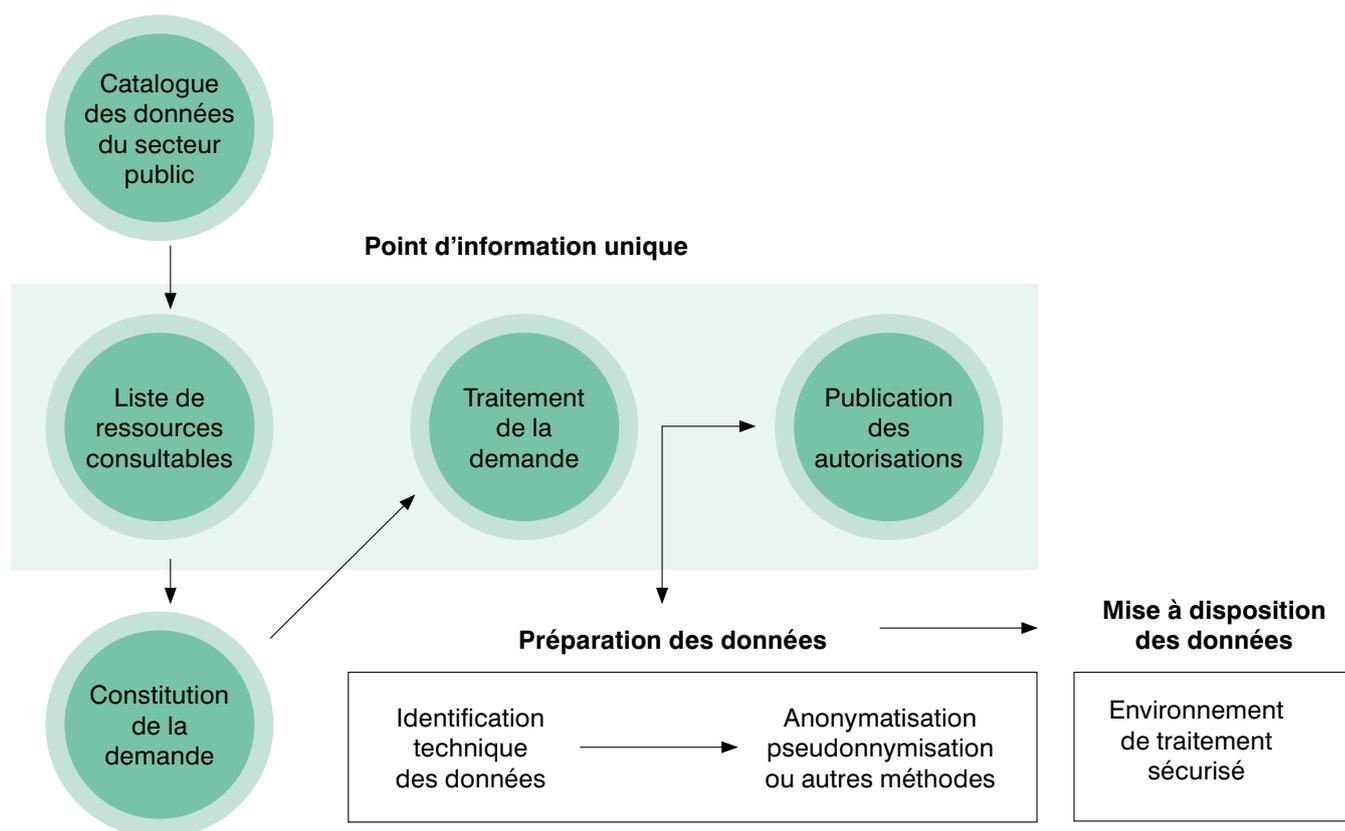
Ainsi, les données ne pourront pas être téléchargées et devront être analysées directement depuis l'environnement de traitement sécurisé : celui-ci devra donc fournir les outils nécessaires à l'analyse des données. Les codes informatiques permettant l'analyse des données ainsi que ceux donnant la procédure d'extraction et d'anonymisation des données pourront être archivés et rendus accessibles publiquement, afin de garantir la transparence des traitements et la reproductibilité. Un court résumé détaillant les méthodes et les résultats pourra également être fourni au gestionnaire de l'infrastructure supportant la réutilisation des données afin de constituer un catalogue de résultats.

> Action 10 : Encourager l'utilisation des infrastructures informatiques pour la valorisation des données du secteur privé

Le secteur privé doit pouvoir utiliser les données pour innover, créer de nouveaux produits et services, améliorer les produits et services existants et optimiser ses processus internes. Si, dans cette optique, le gouvernement met en place une infrastructure et des processus concrets fédérant la valorisation des données du secteur public, il est important que le partage et le traitement des données ainsi que les infrastructures nécessaires soient incitées également au niveau du secteur privé et de la recherche.

Le besoin d'utiliser des infrastructures numériques nécessaires à la valorisation des données dans le secteur privé est crucial pour plusieurs raisons.

- **L'élargissement du principe Once Only au secteur privé :** dans les limites du cadre légal, le secteur public pourra bénéficier des données authentiques provenant du secteur privé pour améliorer davantage ses démarches et procédures administratives. Sous les mêmes conditions, le secteur privé à son tour pourra également bénéficier des données authentiques du secteur public, facilitant ainsi les processus commerciaux et administratifs liés à leurs métiers respectifs.



Flux procédural relatif au traitement ultérieur ou à la réutilisation de données

- **Une prise de décision et élaboration de politiques avisées par le secteur public à l'aide de données du secteur privé** : un accès conditionné à des données du secteur privé, permettra de prendre des décisions plus éclairées et de développer des politiques publiques avisées, dans le respect de la législation en vigueur et avec la coopération du secteur privé.
- **Le rapprochement des citoyens avec leur propres données** : cette infrastructure permettra l'intégration de nouveaux produits et services, offrant aux citoyens un accès amélioré et une meilleure compréhension de leurs données personnelles. Cela renforcera leur contrôle, la transparence et la confiance.
- **L'innovation et augmentation de la compétitivité de l'économie nationale** : l'utilisation des données publiques par le secteur privé et la recherche, et l'échange de données entre entreprises privées stimulera l'innovation et accroîtra la compétitivité de l'économie nationale. Dans ces réflexions, il ne faut toutefois pas sacrifier la sécurité et la protection des données. Dans cet esprit, un environnement de traitement sécurisé pour des traitements de données entre acteurs nationaux et internationaux continuera à garantir la confidentialité et la sécurité des informations.
- **L'attraction d'innovateurs de données et la promotion du Luxembourg en tant que pôle d'excellence en matière de données** : cette infrastructure devra fédérer toute innovation et création de valeur ajoutée en matière de données. Elle devra faciliter les échanges dans un objectif de faire du Luxembourg un destination attrayante pour des acteurs et talents innovateurs dans le domaine des données et le placer au centre de tous les échanges et considération européennes en matière de données.

> Action 11 : Assurer une offre adéquate en termes de stockage et de calcul

Le Luxembourg propose d'étendre considérablement les services *cloud*, les centres de données et la puissance de calcul pour créer une infrastructure évolutive. Cette stratégie vise à **développer des solutions *cloud* souveraines et hybrides pour les écosystèmes de données nationaux et européens, tout en renforçant le rôle du pays comme hub numérique** grâce à une disponibilité, une sécurité et une durabilité accrues des centres de données. En consolidant les capacités de calcul nationales, le Luxembourg soutiendra la recherche, l'innovation et l'IA, garantissant ainsi sa compétitivité dans les

Le cloud computing supprime les barrières souvent liées au partage de données dans un monde siloté en créant des espaces inclusifs permettant une collaboration efficace sur les données.

secteurs à forte intensité de données, tout en renforçant la fiabilité, la souveraineté et la cybersécurité de l'infrastructure de données en conformité avec les cadres réglementaires nationaux et européens.

Le *cloud computing* supprime les barrières souvent liées au partage de données dans un monde siloté en créant des espaces inclusifs permettant une collaboration efficace sur les données. C'est dans de tels environnements de confiance partagés et sécurisés que les utilisateurs de données peuvent accéder à des données provenant de sources authentiques pour réaliser un traitement plus efficace et de qualité.

Au niveau de la mise à disposition de solutions adéquates relatives aux défis posés par l'écosystème

des données, le *cloud* est la solution à retenir car il permet des temps de mise à disposition des ressources réduits ainsi qu'une agilité accrue. Ainsi, les projets et les applications nécessaires pour la mise en œuvre de l'écosystème des données évoluent plus rapidement du stade de l'idée initiale à celui de la solution finale tout en restant adaptable aux besoins évolutifs de l'écosystème.

L'adaptabilité, ou flexibilité, susmentionnée est surtout importante une fois que la solution est déployée. La scalabilité d'un environnement *cloud* est inégalée et permet des ajustements rapides à la taille et en tenant compte des spécificités de chaque projet. Ainsi, le *cloud* soutient la croissance d'un projet grâce à une utilisation optimisée des ressources et du temps disponibles.

L'utilisation de services *cloud* permet aux petites et moyennes entreprises de réduire les coûts liés aux licences ainsi qu'aux ressources. Ces entreprises peuvent également profiter des compétences des fournisseurs *cloud* en termes de disponibilité, maintenance, mises à jours, backups et cybersécurité.

Comme mentionné dans l'action sur les infrastructures informatiques nécessaires à l'échange de données, il sera aussi nécessaire de permettre l'utilisation d'outils d'analyse de données de pointe depuis l'environnement sécurisé permettant l'accès et la réutilisation de données personnelles dans un contexte de recherche scientifique. Une interconnexion avec les supercalculateurs Meluxina, MeluXina-AI et MeluxinaQ sera possible.

4. Éventail de services

Ambition : Valoriser les données dans un environnement de confiance

Pour stimuler la valorisation des données dans un environnement de confiance, **le Luxembourg veille à ce que les données soient trouvables, accessibles, interopérables et réutilisables, et qu'elles satisfassent le plus haut niveau de qualité** afin de conduire à une optimisation des services publics, au développement de décisions et de politiques avisées, à une stimulation de l'innovation, une augmentation de la compétitivité de l'économie nationale et au développement et à l'attraction des talents nécessaires.

➤ **Action 12 :** Soutien à la découverte de données et services d'intermédiation

Des **services de découverte et d'intermédiation de données seront développés** et proposés pour assister les utilisateurs potentiels dans l'identification de leurs besoins en données et facilitera la mise en relation entre utilisateurs et fournisseurs de données selon les exigences identifiées. Le volet « découverte de données » comprendra la création et la maintenance d'une base de connaissances regroupant les informations des catalogues existants, des registres et autres sources de données provenant du secteur public, privé aussi bien que d'instances internationales.

Le service d'intermédiation soutiendra l'établissement de contacts entre utilisateurs et fournisseurs potentiels et facilitera les discussions, l'adéquation des besoins et les conditions de réutilisation. Pour les détenteurs

de données, ces services pourront également servir de catalyseurs d'événements d'innovation tels que des *hackathons* de données, invitant ainsi des innovateurs à résoudre des problèmes que les détenteurs ne savent pas comment résoudre à ce stade ou qui dépassent le cadre de leurs activités principales.

L'objectif de ces services est de **réduire considérablement le temps de recherche** et d'**abaisser les obstacles à l'identification des jeux de données adaptés** aux projets innovants qui en ont besoin.

› Action 13 : Constituer des catalogues de données et de produits de données

Le **catalogue des données du secteur public accessible à tous les intéressés** doit permettre de rechercher, par voie de métadonnées, les **données existantes du secteur public, y compris les données ouvertes**, et de **demandeur l'accès aux données au lieu de passer par une nouvelle phase de collecte** contraire aux objectifs de la présente stratégie, aux critères de qualité des données et au principe du *Once Only*. Afin de promouvoir davantage l'utilisation des données du secteur public existantes, une partie des données de ce catalogue, notamment celles touchées par le règlement sur la gouvernance des données, est accessible aux acteurs de la recherche et du secteur privé qui peuvent en demander une réutilisation dans un cadre spécifique et défini.

Ce catalogue des données du secteur public est en cours d'élaboration sous la coordination du ministère de la Digitalisation. Il va de soi que le partage de données s'effectue dans le respect absolu des principes de sécurité, des droits fondamentaux et de la protection des données évoqués précédemment.

Le partage ne doit cependant pas se limiter aux données brutes, mais également mettre à disposition tout produit de données créé au sein du secteur public, par exemple par un registre de produits ou un registre d'algorithmes ou de codes informatiques. De plus, toute réutilisation des données pour les besoins de la recherche scientifique devra aussi à minima déboucher sur une description des méthodes et des résultats obtenus (même négatifs) et, au mieux, à un article dans une publication scientifique revue par les pairs. Ces descriptions ou articles, devront aussi être référencés dans ce catalogue de données comme des produits de données. Il sera aussi fortement encouragé de publier d'autres produits tels que des codes informatiques dans des canaux de distribution ou dépôts officiels, afin de mettre en avant tous les éléments de la chaîne de valeur.

Un catalogue de données du secteur privé sera également élaboré et les acteurs du secteur privé sont encouragés à déclarer leurs données dans ce catalogue.

Finalement, plusieurs indicateurs seront établis afin de suivre le nombre de projets faisant usage des données et produits de données catalogués.

› Action 14 : Identifier et responsabiliser les détenteurs de données pour en assurer la fiabilité

La fiabilité des données du secteur public et privé est une condition de base nécessaire à la réussite des objectifs de la présente stratégie. Alors que chaque ministère et administration est responsable du maintien de la qualité de ses propres données, ces dernières doivent obligatoirement répondre à des standards de qualité définis de manière transversale pour l'entièreté du secteur public luxembourgeois et également aux exigences européennes. Bien que la définition des standards transversaux doive avoir lieu de manière centralisée, elle ne se fait pas sans les retours d'expérience des ministères et administrations qui gèrent déjà des données d'une qualité conforme aux exigences esquissées dans ce document.

› Action 15 : Support pour demandes d'accès aux données

La demande d'accès à des données sensibles contrôlées peut être un processus compliqué et nécessitant beaucoup de ressources, ce qui constitue un obstacle à la réutilisation des données. Le LNDS peut servir comme point d'entrée pour une telle demande, que les données d'intérêt soient répertoriées dans le catalogue national des données ou non. **Toute organisation intéressée par la réutilisation conditionnée des données du secteur public peut recourir au support du LNDS** pour discuter de ses besoins en matière de données et obtenir un soutien pour le processus et la formulation concrète de la demande.

› Action 16 : Développer des systèmes de gestion des identifiants et pseudonymes

Pour améliorer la confiance dans le partage des données, tout en augmentant leur utilité, il est nécessaire de **mettre en place un système central qui combine la correspondance des identifiants et la pseudonymisation**. La liaison des informations provenant de différentes sources permet de créer un ensemble de données enrichi, mais cela n'est possible que si la procédure de correspondance des identifiants est utilisée pour lier les enregistrements relatifs à la même entité dans différents ensembles de données. En même temps, la pseudonymisation remplace les identifiants (par exemple, le numéro de sécurité sociale ou le nom) par des pseudonymes (nouveaux identifiants qui masquent l'identité des

individus), ce qui réduit le risque d'identification directe de l'individu au sein d'un ensemble de données. Ces deux techniques doivent être considérées comme complémentaires, car il est important de s'assurer que tous les enregistrements pour le même individu ou entité sont liés sous le même pseudonyme.

Un tel service national de correspondance des identifiants et de gestion des pseudonymes (IPMS) est en place aujourd'hui et sur cette plateforme, toutes les données pseudonymisées associées au même sujet de données peuvent être liées, même si les ensembles de données sont détenus et pseudonymisés par différents responsables du traitement. Ce flux de données est crucial pour des secteurs tels que la recherche en santé, où les données des patients (données à caractère personnel à désidentifier) proviennent de plusieurs institutions médicales ou autres (par exemple, le projet Clinnova) ou des services de soins sociaux. En effet, la pseudonymisation constitue souvent une mesure de protection efficace pour se conformer à la législation sur la protection des données.

› Action 17 : Créer et développer des systèmes de gestion d'anonymisation

L'anonymisation des données est essentielle pour protéger la vie privée tout en permettant l'utilisation et le partage et l'analyse des données. **En développant des systèmes de gestion d'anonymisation robustes et offrant des services d'anonymisation, les données personnelles sont transformées de manière qu'elles ne puissent plus être associées à des individus spécifiques et garantissent ainsi la confidentialité.** Contrairement à la pseudonymisation, qui remplace les identifiants directs par des pseudonymes, mais permet encore une réidentification potentielle, l'anonymisation supprime ou modifie les informations de manière irréversible, garantissant ainsi un niveau de confidentialité plus élevé. De plus, l'anonymisation facilite la collaboration entre les différentes parties prenantes, telles que les institutions de recherche, les entreprises et les organismes gouvernementaux, en leur permettant d'accéder à des données précieuses sans compromettre la confidentialité des personnes concernées. Ces réflexions sont également étendues à des données protégées non-personnelles, telles que des données relatives à la confidentialité commerciale, la protection des droits de propriété intellectuelle, le secret statistique et la sécurité nationale.

› Action 18 : Faciliter la génération de données synthétiques

Les données synthétiques sont des données artificielles générées à partir d'un modèle entraîné sur des données originales qui reproduisent leurs caractéristiques et leur structure initiales. La puissance des données synthétiques réside dans le fait que **les statistiques globales et les interconnexions entre les**

données peuvent être préservées, tout en réduisant le risque d'exposition à la confidentialité et le fardeau de la conformité légale qui serait en place pour le partage et le traitement des données personnelles ou privées réelles.

Ces dernières années, des initiatives gouvernementales et de l'écosystème des données ont été lancées pour encourager l'expérimentation et l'analyse des données synthétiques. Par exemple, une fabrique de données synthétiques a été mise en place pour générer des données de la population à partir de jeux de données disponibles publiquement. D'autres projets explorent également la manière de croiser des données synthétiques et d'évaluer leur utilité. Les résultats obtenus des divers projets sont prometteurs et ouvrent de nouvelles perspectives d'utilisation des données synthétiques.

Le Luxembourg encourage et soutient la création et l'adoption de telles initiatives supplémentaires dans des domaines d'importance nationale tels que la santé, la finance, la cybersécurité, l'espace, la mobilité et l'énergie.

› Action 19 : Développer des services d'extraction, d'enrichissement et de fusion de données

Pour utiliser les données à leur plein potentiel et les rendre plus précieuses pour la prise de décision, il est souvent utile de fusionner des données provenant de plusieurs sources. Cela est particulièrement important dans le secteur public où les informations peuvent être dispersées entre plusieurs administrations, entraînant souvent des silos de données avec des informations combinées inaccessibles pour l'analyse et l'élaboration de politiques. **L'intégration des données en une vue unifiée est donc une étape critique.** Pour garantir la protection des données, ce processus doit être conforme aux principes de minimisation des données stipulés par le RGPD. En même temps, si un jeu de données n'est pas complet ou est obsolète, il n'est pas utile et doit être enrichi – en d'autres termes, amélioré en complétant les informations existantes par des informations supplémentaires pour améliorer la qualité des données ou créer une image plus complète et plus détaillée. **Le Luxembourg propose des services d'extraction, d'enrichissement et de fusion des données** pour aider les organisations à extraire des données à partir de sources de données identifiées, à les combiner en un seul ensemble de données, en cartographiant les enregistrements, et à les enrichir selon les besoins.

➤ Action 20 : Développer des services pour la qualité et la curation de données

La réutilisation efficace des données dépend grandement de la qualité des données. Les données bien structurées, cohérentes et bien documentées sont faciles à réutiliser et à combiner avec d'autres données. Malheureusement, de nombreuses organisations ont du mal à collecter des données de manière structurée et cohérente, ce qui entraîne des ensembles de données avec de grandes quantités d'informations non structurées et des valeurs manquantes ou incohérentes, ce qui en entrave l'analyse, la combinaison et la réutilisation.

Le Luxembourg propose des **services de qualité et de curation des données pour aider les organisations à améliorer la qualité de leurs données** en transformant rétroactivement les ensembles de données existants ainsi qu'en rationalisant les processus de collecte de données primaires. Des approches telles que la standardisation des données, la mise en œuvre de vocabulaires contrôlés et l'adoption de standards favorisant l'interopérabilité sont utilisées pour améliorer la qualité et organiser les données.

➤ Action 21 : Soutien pour la gestion et l'organisation des données

Les organisations qui s'appuient sur les données pour leurs activités nécessitent une gestion efficace des données afin d'en maximiser l'utilité. Des ressources internes limitées et une tendance à s'appuyer sur des solutions standardisées souvent inadaptées aux besoins spécifiques entravent une gestion efficace des données.

Le Luxembourg propose des **services de soutien méthodologique structuré pour la gestion et l'administration des données.** Ces services sont conçus pour aider les organisations du Luxembourg à **développer leurs capacités en matière de gestion et d'administration des données.** Les organisations peuvent bénéficier de solutions personnalisées tout au long du cycle de vie des données. Ces solutions comprennent le développement de stratégies, de processus et de politiques, des formations et ateliers, ainsi que la personnalisation d'outils.

➤ Action 22 : Service Expert ELSI pour la gouvernance des données

Le cadre réglementaire régissant la réutilisation des données publiques doit protéger les droits et libertés des personnes concernées tout en introduisant des restrictions uniquement lorsque cela est vraiment nécessaire et proportionné aux objectifs de réutilisation poursuivis. Afin de répondre à ce besoin et de naviguer

dans cette complexité, le LNDS **propose des services de gouvernance des données ELSI** (implications éthiques, juridiques et sociales) à ses partenaires gouvernementaux pour les soutenir dans l'élaboration de nouvelles législations.

Ce **service est étendu au secteur privé**, car les entreprises ont besoin de soutien lors de l'élaboration de politiques et de procédures pour garantir une collecte, un stockage, une utilisation, un archivage, une suppression et un partage des données responsables. Des orientations seront créées et partagées pour aider les organisations à se conformer au RGPD, y compris les exigences de « protection des données dès la conception et par défaut », l'établissement de garanties de protection des données, ainsi que le traitement d'autres préoccupations ELSI telles que les aspects éthiques et juridiques de la collecte et du partage des données.

Le besoin d'un outil d'évaluation de l'impact des données sera évalué et un tel outil pourrait être développé pour aider les organisations à évaluer et à réduire les risques de confidentialité associés à leurs projets de données. Cela deviendra particulièrement pertinent lorsque les données seront liées à partir de multiples sources pour obtenir de nouvelles perspectives.

➤ Action 23 : Développer des guides de bonnes pratiques et des indicateurs clé de qualité des données

Pour assurer un haut niveau de qualité des données, il convient d'être transparent sur le cycle de vie des données et plus particulièrement sur l'obsolescence de celles-ci afin d'éviter que des utilisateurs potentiels n'utilisent des données obsolètes pour prendre des décisions.

Le fait de **minimiser le nombre d'instances des données par le biais d'une meilleure transparence des données disponibles** (catalogue de données), permet d'**améliorer la qualité des données en évitant des sources de données multiples** qui contiendraient les mêmes données avec des niveaux de qualité différents.

La qualité des données est directement affectée par les pratiques de collecte. Pour atteindre une qualité de données optimale dès la phase de collecte, définir la gouvernance de la qualité, y compris les rôles et responsabilités, est l'étape la plus cruciale. L'équipe mettant en œuvre la gouvernance de la qualité doit être équipée **des bons outils et méthodes pour la collecte des données et le suivi de la qualité** par la suite. De plus, le personnel chargé de la collecte des données doit être suffisamment formé à la culture des données, à la qualité des données et aux principes FAIR ainsi qu'au domaine spécifique (par exemple, les soins de

santé) pour garantir que les données collectées soient aussi précises, complètes et cohérentes que possible. Rendre les données FAIR dès le départ permet de les trouver, d'y accéder, de les comprendre et de les réutiliser facilement.

Dans l'effort de catalogage, toute donnée créée se voit par conséquent associer à des métadonnées (p. ex : base légale, description, date de création, distribution) afin que les consommateurs de données puissent juger de la pertinence des données dans le cadre de leur analyse. Il convient donc de rationaliser le processus de création et de récolte d'une donnée afin de bénéficier de cette rigueur à tous les niveaux du processus de traitement de la donnée.

L'usage d'indicateurs de qualité des données (KPI) permet de mesurer la qualité des données disponibles et aussi de mener périodiquement des audits.

La valeur d'une donnée peut fluctuer en fonction de la situation du pays, de la société et des développements futurs. Un **indicateur d'impact d'une donnée à un moment précis** (*data impact score*) permet de focaliser les forces et les effectifs du secteur public, en cas de besoin, sur un jeu de données à haute valeur momentanée pour en obtenir tous ses bénéfices dans la résolution de défis associés à cette situation ou ses développements futurs.

Pour surveiller et améliorer continuellement la gouvernance des données, il est essentiel d'établir des indicateurs pour ses domaines clés : données, ressources humaines, processus et technologie. Il conviendra de mesurer les taux d'exhaustivité et de précision, les indicateurs relatifs aux catalogues de données nationaux (comme le nombre de jeux de données et leurs taux d'engagement), les métriques d'accès aux données (par exemple, le temps d'autorisation), les indicateurs de conformité, d'interopérabilité, d'efficacité des services et de diversité, ainsi que les indicateurs de performance relatifs au partage des connaissances et au développement des compétences.

Pour les données ouvertes, le pourcentage de jeux de données détenus par le secteur public et rendus accessibles au public constitue un bon indicateur à mesurer. Pour les données protégées, il est possible de suivre l'évolution du nombre de jeux de données disponibles dans les catalogues, le volume des demandes d'accès et le taux d'autorisations.

Le Luxembourg adopte une approche systémique intégrant des métriques quantitatives et des considérations qualitatives. La maturité de la gouvernance des données peut être évaluée en utilisant les référentiels existants : le niveau de littératie et de

sensibilisation aux données peut être mesuré par des enquêtes et des ateliers ; la sécurité et la confidentialité des données peuvent être analysées au travers d'audits ; enfin, la satisfaction des utilisateurs (par exemple, les utilisateurs du catalogue de données ou les parties prenantes des projets de données) devrait être évaluée par des entretiens et des questionnaires.

L'ensemble de ces indicateurs permettra de mettre en lumière les points forts des efforts de gouvernance des données du pays et d'identifier les domaines prioritaires d'amélioration.

› Action 24 : Services de conseil au sujet des données

Dans le cadre de sa transformation numérique et de sa vision stratégique d'excellence technologique, le Luxembourg développe un dispositif national innovant de services de conseil en projets de données. Cette initiative vise à **créer un écosystème de support complet et dynamique qui accompagnera tous les secteurs économiques et institutionnels du pays dans leur trajectoire de valorisation des données**. Le dispositif proposera une palette de services intégrés couvrant l'intégralité du parcours données, depuis leur collecte jusqu'à leur exploitation, en garantissant des principes fondamentaux de confiance, de sécurité et de gouvernance. Les **services seront conçus pour être modulaires, adaptables aux spécificités de chaque secteur**, qu'il s'agisse des domaines financiers, technologiques, de la recherche, de la santé ou des services publics. L'objectif est de **positionner le Luxembourg comme un lieu d'excellence dans la gestion et la valorisation responsable des données**, en offrant aux acteurs économiques et institutionnels un accompagnement de haute qualité tout au long de leur transformation numérique.

› Action 25 : Mettre en place un cadre et des solutions nationaux pour le droit au bénéfice des données

Pour fédérer les possibilités résultant du rapprochement des citoyens avec leurs propres données à la suite de la rentrée en vigueur du règlement sur les données⁶, le gouvernement développe un cadre réglementaire et des solutions visant à **garantir que chaque citoyen puisse bénéficier des données qui le concernent**⁷. Des outils simples d'analyse et de valorisation seront intégrés pour aider les citoyens à comprendre la valeur potentielle de leurs données, à les exploiter, par exemple via des opportunités de participation à des projets innovants.

⁶ Règlement (UE) 2023/2854 concernant des règles harmonisées portant sur l'équité de l'accès aux données et de l'utilisation des données et modifiant le règlement (UE) 2017/2394 et la directive (UE) 2020/1828 (règlement sur les données)

⁷ A UK-wide public dialogue exploring what the public perceive as 'public good' use of data for research and statistics – Office for Statistics Regulation

Pour assurer la mise en œuvre efficace de cette action, une collaboration étroite avec les ministères, les experts en protection des données, les représentants de la société civile et des secteurs privé et de la recherche est instaurée. Ce cadre répond aux normes européennes en matière de vie privée et s'appuie sur des standards de transparence et de sécurité définis au niveau national.

5. Recherche, développement et innovation

Ambition : Stimuler la recherche et promouvoir l'innovation sur base de données de haute qualité

Le Luxembourg aspire à **créer un écosystème de recherche dynamique fondé sur l'excellence des données** en établissant une infrastructure nationale robuste qui garantit la reproductibilité et la réutilisation des données de recherche. Cette ambition permet au Grand-Duché de garantir sa souveraineté numérique en stockant localement les données générées par ses chercheurs et instaurant un cadre incitatif pour leur conservation sur le territoire luxembourgeois. Parallèlement, le pays s'engage à **développer des espaces de données qui favorisent le partage et la collaboration entre les différents acteurs de l'écosystème**, tout en établissant des mécanismes formels de reconnaissance et de valorisation pour encourager les chercheurs à partager leurs données selon les principes FAIR, considérant ces contributions comme des produits scientifiques à part entière méritant d'être cités et récompensés dans l'évaluation des carrières scientifiques.

› **Action 26 :** Promouvoir une excellence des données du secteur de la recherche

L'écosystème national de recherche du Luxembourg continue de générer de grandes quantités de données, financées par des fonds publics, qui constituent un atout ayant le potentiel de stimuler l'innovation, la croissance économique et le progrès sociétal. Pour ces motifs, le Luxembourg devrait s'engager à **assurer la souveraineté, la préservation et le partage des données de recherche et des informations générées par la recherche scientifique**.

Le Luxembourg vise à devenir un centre d'excellence en matière de données de recherche, en adoptant et en promouvant les principes et les meilleures pratiques des données FAIR et de la gestion des données de recherche (RDM) tout au long du cycle de vie de la recherche. Pour bénéficier à l'économie et à la société luxembourgeoise, les données de recherche luxembourgeoises devraient être trouvables, accessibles et réutilisables.

En matière de pérennité des données de recherche, le Luxembourg vise des solutions favorisant la souveraineté des données de recherche luxembourgeoises, la reproductibilité des résultats de recherche à long terme, ainsi que leur réutilisation dans des recherches ultérieures. Ces solutions doivent élargir les options des chercheurs en matière de pérennité de leurs données et de leurs résultats de recherche, et permettre de respecter les politiques des institutions de recherche et des fournisseurs de fonds.

Dans le prolongement de la présente stratégie, l'implémentation d'un cadre favorisant le partage et le financement de bonnes pratiques de gestion des données de recherche devrait être envisagé afin de soutenir le partage des données de recherche et leur réutilisation et afin de favoriser des mesures pour rendre les données de recherche financées par des fonds publics accessibles dans le respect du principe FAIR.

› **Action 27 :** Établir une souveraineté nationale des données de recherche luxembourgeoises

Afin d'assurer la souveraineté nationale des données de recherche luxembourgeoises, donc d'assurer que le Luxembourg peut collecter, stocker et utiliser les données de recherche générées à l'intérieur de ses propres frontières, il est essentiel de **développer une infrastructure nationale robuste qui permet la conservation sécurisée des données de recherche**. Parallèlement, des connexions avec les

infrastructures de données de recherche européennes et internationales seront établies afin de favoriser le développement des compétences et des capacités nationales, notamment avec RDA, EOSC, OpenAIRE, les infrastructures ERIC et des infrastructures spécifiques à certaines disciplines comme ELIXIR et EATRIS.

Pour renforcer cette souveraineté, il convient d'assurer que les données produites et conservées localement soient découvrables à l'échelle internationale et puissent, le cas échéant, être accédées et réutilisées dans le respect du cadre réglementaire applicable. Des services de conseil ou de co-développement de solutions seront proposés. L'établissement d'indicateurs et de tableaux de bord nationaux et institutionnels sera soutenu pour suivre l'activité et les résultats en matière de données de recherche au fil du temps et dans toutes les disciplines. Enfin, une évaluation du paysage national des données de recherche sera réalisée et un cadre pour les données de recherche sera établie.

› Action 28 : Créer des espaces de données stratégiques

Le Luxembourg encourage la **création et l'utilisation d'espaces de données** entre acteurs d'un même secteur ou de secteurs différents, qui se regroupent pour **favoriser le partage de données au sein de cet écosystème et créer ainsi une réelle valeur ajoutée.**

Un espace de données offre une structure claire à cet effet, permettant aux participants de partager, d'échanger et de collaborer sur les données, avec une efficacité accrue et dans le respect des normes en vigueur.

En partageant activement ses processus de gouvernance, et les standards sémantiques et techniques utilisés pour sa participation dans des espace de données européens, le gouvernement luxembourgeois contribue à la fédération d'espaces de données et crée un grand potentiel d'interopérabilité entre les espaces européens communs de données et les espace intra- et intersectoriels à l'initiative des acteurs de l'écosystème luxembourgeois.

Un exemple concret pourrait être un espace de données qui gouverne les données linguistiques pour promouvoir le luxembourgeois comme langue nationale. À cette fin, le gouvernement a mis en place une stratégie visant à développer et standardiser la langue, tout en encourageant son usage quotidien. Les données linguistiques générées par le secteur public (textuelles, audio, audiovisuelles) représentent un

atout précieux pour améliorer les services publics et un élément important pour la mise en œuvre des stratégies de données et d'IA. Le *Zenter fir d'Lëtzebuurger Sprooch* développe des outils linguistiques publiquement accessibles, comme *D'Sproochmaschin*, qui permet entre autres la reconnaissance vocale automatique, la conversion texte-parole et la génération de contenu audio en luxembourgeois.

Cependant, le luxembourgeois reste une langue à faibles ressources, avec peu de données de qualité disponibles pour l'entraînement de modèles linguistiques⁸. L'espace européen commun de données linguistiques aidera à résoudre ce problème, mais nécessitera de temps pour prendre de l'ampleur. Le gouvernement devrait donc investir dans diverses initiatives, telles que la numérisation des documents existants en luxembourgeois, le développement de plateformes luxembourgeoises en ligne, l'encouragement de la collaboration entre chercheurs et communautés technologiques linguistiques et la poursuite du développement des technologies et outils linguistiques, notamment par l'adoption d'outils de traduction automatique.

› Action 29 : Encourager et récompenser le partage de données dans le secteur de la recherche

Le Luxembourg veut prioriser la reconnaissance des contributions de données comme des produits scientifiques à part entière. Ce cadre établira **des mécanismes formels de citation pour les jeux de données de recherche luxembourgeoise**, garantissant que les chercheurs reçoivent le crédit approprié pour leur travail. Les organismes de recherche seront encouragés à intégrer les pratiques de gestion des données dans leurs critères d'évaluation pour l'avancement de carrière et les décisions de financement, en mettant l'accent sur la valorisation des principes de *Open Science*. Cette stratégie encourage le développement des normes d'évaluation cohérentes qui reconnaissent les chercheurs ayant intégré le partage systématique des données dans leurs méthodes scientifiques. Pour encourager davantage l'excellence, des initiatives comme des prix nationaux de recherche sur les données^{9, 10} pourraient récompenser les contributions exceptionnelles à l'écosystème des données et promouvoir les meilleures pratiques dans l'ensemble de la communauté scientifique.

⁸ European Language Equality – Report on Luxembourgish Language

⁹ The Dutch Data Prize - Researchdata

¹⁰ Ouvrir la Science - The Open Science Research Data Awards

Collaboration à l'international

Ambition : Développer et promouvoir le Luxembourg comme pôle d'excellence autour des données

Le Luxembourg a pour objectif de **servir comme nœud central pour l'échange international de données** et de **pôle d'excellence de l'innovation et de la création de valeur axés sur les données**. Si au niveau international, vue sa taille, il n'est souvent pas en mesure de rivaliser en termes de volume de données, il mise sur son expertise dans le domaine ainsi que sur sa **gouvernance de données centrale et efficace** pour **faciliter et accélérer l'accès aux données** et de ce fait, leur **valorisation dans un environnement de confiance**. En pratique, le Luxembourg vise à offrir un accès conditionné aux données nationales et internationales en facilitant l'interconnexion entre acteurs de différents pays, tout en se forgeant une solide réputation en matière de sécurité et de protection des données. Il préconise pour cela, le juste équilibre entre l'ouverture et la sécurité des données. Aux solutions techniques en vue de la réalisation de cette ambition, le Luxembourg développe des instruments juridiques pour simplifier le traitement des données à un niveau international. Ici, sa petite taille constitue un réel atout, permettant au Luxembourg de créer rapidement un nouveau cadre légal, ce qui est avantageux en l'absence de législation internationale. Les institutions internationales hébergées au Luxembourg peuvent ainsi fonctionner sous des lois nationales, tout en facilitant la coopération internationale. À cette fin, les conditions d'accès et réutilisation seront alignées aux procédures et désignations effectués dans le cadre de la réglementation sur la valorisation des données, notamment du règlement (UE) 2022/868 sur la gouvernance européenne des données.

Par ailleurs, son expertise dans le domaine des données se manifeste également par sa participation active aux initiatives de l'Union européenne, le développement de partenariats bilatéraux et multilatéraux, sa contribution à l'élaboration de normes internationales, ainsi que le partage des meilleures pratiques avec des pays partenaires.

L'ambition d'être un précurseur en matière de données à l'international se reflète aussi dans la stratégie du LNDS qui contribue activement à un nombre croissant de projets et d'initiatives internationaux, tels que l'*International Data Space Association*, *FIWARE*, *Big Data Value Association*, *DataLeaders*, *EIT Health* et *MyData Global*. Le Luxembourg joue également un rôle clé dans l'initiative Gaia-X, qui vise à développer une infrastructure de données européenne fédérée

et sécurisée. LNDS, le hub national officiel de Gaia-X au Luxembourg, contribue à cet objectif en favorisant la transparence, la contrôlabilité, la portabilité et l'interopérabilité des données et des services. Il soutient toutes les organisations basées au Luxembourg - startups, secteur public et centres de recherche - dans leur exploration de l'utilisation ou de la création d'un véritable service *cloud* souverain basé sur les valeurs européennes.

Un autre exemple des efforts de flux de données internationaux auxquels le Luxembourg participe activement est Clinnova, un projet international de médecine de précision lancé en 2023 par le Luxembourg, la France, l'Allemagne et la Suisse. Visant à soutenir la prise de décision thérapeutique grâce à la fédération, la standardisation et l'interopérabilité des données, l'échange transfrontalier de données accélérera la recherche translationnelle sur les causes des maladies, ce qui peut avoir un impact sur les soins aux patients. Dans le secteur de la santé, le Luxembourg est à la pointe de la recherche génomique, fournissant des données et des ressources aux scientifiques du monde entier grâce à sa participation au réseau ELIXIR (représenté par le LNDS) et le *Luxembourg Centre for Systems Biomedicine* (LCSB).

De plus, en tant que pays dont l'une des langues nationales est peu utilisée, le Luxembourg s'est depuis longtemps engagé à faire progresser des technologies linguistiques fiables, inclusives et conformes tout en préservant la diversité linguistique et la richesse culturelle de l'Europe, en mettant un accent particulier sur les données linguistiques en luxembourgeois et dans d'autres langues européennes. En décembre 2024, le Luxembourg, en tant que membre de l'*Alliance for Language Technologies* (ALT-EDIC), un consortium européen d'infrastructures numériques, représenté par le *Luxembourg Institute of Science and Technology* (LIST) (en collaboration avec l'Université du Luxembourg et 70 partenaires d'ALT-EDIC et avec le soutien du ministère d'État - Service des médias, de la connectivité et de la politique numérique et du ministère de la Culture) a été récompensé par le prestigieux projet LLMs4EU financé par le programme *Digital Europe*. Ce projet, qui débutera en 2025, vise à développer des LLM spécialisés adaptés aux besoins spécifiques de différents domaines, y compris le secteur public et les entreprises européennes, et à positionner le Luxembourg comme un hub de technologies linguistiques et de recherche et innovation en IA fiables et centrées sur l'humain.

Finalement, le Luxembourg héberge deux e-ambassades (Estonie et Monaco), chargées de protéger les données sensibles de ces pays, ce qui témoigne de son engagement en matière de

cybersécurité, de souveraineté numérique et de résilience ainsi que de sa vision stratégique dans le développement de collaborations internationales. Le Luxembourg est ouvert à travailler avec le nouveau concept d' « ambassades de données » et est à la pointe pour garantir un avenir numérique continu.

➤ Action 30 : Mettre en œuvre le règlement établissant des mesures destinées à assurer un niveau élevé d'interopérabilité du secteur public dans l'ensemble de l'Union

Le règlement (UE) 2024/903 établissant des mesures destinées à assurer un niveau élevé d'interopérabilité du secteur public dans l'ensemble de l'Union européenne¹¹ signifie un grand pas vers la satisfaction des attentes des citoyens et des entreprises en matière de **service publics simples, efficaces et transfrontières**. Par sa mise en œuvre, le Luxembourg a élargi les bases créées par le Cadre d'interopérabilité européen (EIF) ainsi que le Cadre d'interopérabilité national (NIF) pour une meilleure coopération entre les administrations des différents États membres, ainsi que sur les plans nationaux respectifs.

La stratégie nationale des données vise à **intégrer pleinement les principes d'interopérabilité** pour garantir des échanges de données fluides et une coopération efficace à l'échelle nationale et transfrontalière. L'objectif est de créer un cadre commun favorisant la réutilisation des données et des services, tout en soutenant l'innovation et la coopération entre secteurs.

Cette mise en œuvre repose sur une approche structurée autour des quatre niveaux d'interopérabilité du NIF : organisationnel, juridique, technique et sémantique. Elle prend forme dans les catalogues de produits interopérables, les plans d'actions d'interopérabilité, ou encore en cas de projets informatiques transfrontaliers, l'évaluation d'interopérabilité obligatoire, et, s'appuie sur la gouvernance européenne et nationale en matière d'interopérabilité, tel que le comité « Europe interopérable » (*Interoperable Europe Board*) ainsi que les comités nationaux et sectoriels d'interopérabilité du Luxembourg. Ensemble, les acteurs de cette gouvernance de l'interopérabilité garantissent une coordination efficace et une mobilisation collective des expertises, assurant ainsi une mise en œuvre cohérente et durable des principes et exigences de l'interopérabilité au niveau national et international.

Dans le cadre du nœud ELIXIR du Luxembourg, le LNDS a co-développé et exploite désormais, avec d'autres nœuds, le *FAIR Cookbook* pour les chercheurs en sciences de la vie et s'engage à améliorer l'interopérabilité des données à travers l'UE. Depuis 2021, ELIXIR Luxembourg a co-développé deux ressources clés dans le domaine de la gestion des données des sciences de la vie : RDMKit et *FAIR Cookbook*. Le Luxembourg contribue activement à la communauté *ELIXIR Research Data Management* ainsi qu'à l'*ELIXIR Interoperability Platform* pour le développement de bonnes pratiques de gestion des données et de lignes directrices contribuant à l'interopérabilité des données des sciences de la vie.

Le Luxembourg, représenté par le LNDS, est l'un des 16 membres du forum des fournisseurs EOSC-ENTRUST visant à créer un réseau européen d'environnements de recherche de confiance pour les données sensibles et à promouvoir l'interopérabilité européenne par le développement conjoint d'un modèle commun pour l'accès et l'analyse des données fédérées. Le projet a débuté en 2024 et se poursuivra jusqu'en 2027. Le Luxembourg, en tant que membre de ce groupe de travail, contribuera à l'interopérabilité des services dans les environnements de recherche de confiance et participera au co-développement de services modulaires et de processus communs.

Le pays contribue à diverses initiatives internationales promouvant l'interopérabilité des données – par exemple, eSanté, l'agence nationale luxembourgeoise pour l'échange et le partage des données médicales, s'engage à faciliter l'échange de données cliniques tant au niveau national qu'international. Pour atteindre cet objectif, l'agence participe activement aux discussions européennes sur la normalisation et est membre de SNOMED International. De plus, le Luxembourg a été à l'avant-garde de la mise en œuvre de l'utilisation transfrontalière des résumés de patients électroniques grâce à sa participation à des projets européens tels que Trillium Bridge et l'infrastructure de services numériques de santé.

En janvier 2025, le Luxembourg a uni ses forces avec six États membres de l'UE dans la nouvelle initiative de la CE - INVEST (*INTERoperability Vision in Europe - Strategy Timeplan*). Ce projet vise à aider les États membres à mettre en œuvre l'*Interoperable Europe Act* et, par conséquent, à offrir de meilleurs services publics numériques transfrontaliers.

Ces exemples montrent l'engagement et le leadership du Luxembourg dans la contribution à une meilleure collaboration transfrontalière et à la gouvernance numérique. Le Luxembourg continuera à soutenir l'adhésion à de telles initiatives.

¹¹ Règlement (UE) 2024/903 établissant des mesures destinées à assurer un niveau élevé d'interopérabilité du secteur public dans l'ensemble de l'Union (règlement pour une Europe interopérable)

➤ Action 31 : Contribuer au portail numérique unique européen

Pour rendre le marché unique de l'Union européenne une réalité pour les citoyens et les entreprises, le Luxembourg contribue activement à la mise en œuvre du portail numérique unique européen (*Single Digital Gateway*)¹² et, dans le contexte des données, plus précisément au *Once Only Technical System*. Cette solution technologique interopérable facilite, dans le cadre de démarches administratives transfrontières, le flux d'informations ou de données entre administrations concernées sur demande explicite de la personne physique ou morale concernée.

Pour répondre aux exigences du règlement, le Luxembourg proposera des adaptations du guichet unique digital MyGuichet.lu à travers lequel citoyens et entreprises pourront, dans le cadre de démarches administratives digitales transfrontalières, récupérer leurs propres données et les transmettre dans une démarche administrative à un autre État membre de l'Union européenne via le *Once Only Technical System*. Parallèlement, la plateforme MyGuichet.lu évoluera dans ses capacités pour accueillir dans les démarches administratives digitales, des pièces jointes, informations ou données d'autres États membres.

Le *Once Only Technical System* ainsi que tous ses travaux connexes signifient donc une **implémentation tangible du principe Once Only national et transfrontalier** pour tout citoyen et entreprise.

➤ Action 32 : Mettre à disposition un portefeuille d'identité numérique

Le Luxembourg participe activement au développement du portefeuille européen d'identité numérique (EUDIW - *EUropean Digital Identity Wallet*), conformément au règlement (UE) 2024/1183 modifiant le règlement (UE) 910/2014 en ce qui concerne l'établissement du cadre européen relatif à une identité numérique (eIDAS2.0)¹³.

Pour la fin de l'année 2026, chaque État Membre de l'Union européenne doit proposer au moins une solution de portefeuille européen. Celles-ci doivent toutes satisfaire aux exigences formulées dans le règlement eIDAS2, qui ont été rédigées notamment dans le but d'**atteindre l'interopérabilité** entre ces solutions. Le Luxembourg est parti pour sa solution d'une base de code fournie par la Commission Européenne, et investit des ressources pour travailler à la configuration de cette base de code afin que le produit final réponde au besoin national.

Pour le futur utilisateur d'un EUDIW, sa **vie quotidienne s'en trouvera simplifiée** : il pourra stocker dans cette application mobile des attestations vérifiables, et les présenter (intégralement ou partiellement) à toute entité qui aurait besoin d'en prendre connaissance. **L'utilisateur gardera le contrôle sur ses données**, et avec la garantie que ses transactions ne puissent ni être tracées ni être reliées entre elles. Les portefeuilles européens d'identité numérique lui permettront aussi de signer des documents, au moyen d'une signature électronique qualifiée et gratuite par défaut, déclenchée depuis l'application mobile.

Enfin, il convient de noter que le Luxembourg participe au projet-pilote européen POTENTIAL (*PilOTs for EuropeAN digiTal Identity wALlet*, 2023-2025). Ce projet vise à créer les bases de tests des premiers prototypes des différents portefeuilles, en se focalisant sur des cas d'usage. Le Luxembourg s'implique dans 4 de ces cas d'usage, à savoir les services numériques étatiques, l'ouverture d'un compte en banque, le permis de conduire numérique et enfin la signature électronique qualifiée. Au Luxembourg comme ailleurs, les enseignements de ce projet-pilote sont précieux pour le développement des divers produits finaux.

➤ Action 33 : Rejoindre et héberger des espaces européens communs de données

L'engagement du Luxembourg à créer et à contribuer aux espaces européens communs de données a été récemment démontré par le lancement de Dataspace4Health, un projet collaboratif impliquant des acteurs clés du secteur de la santé au Luxembourg, visant à créer un espace de données de santé sécurisé et interopérable conforme aux normes Gaia-X. En génomique, le Luxembourg est signataire de l'initiative européenne *1+Million Genomes* (1+MG), qui vise à rendre la médecine personnalisée possible en fournissant un accès sécurisé et transfrontalier à des données génomiques de haute qualité et à leur intégration avec des données de santé connexes. Le Luxembourg est un **membre central du projet European Genomic Data Infrastructure** qui œuvre à déployer une infrastructure de partage de données sécurisée pour l'initiative 1+MG et à établir un organisme de gouvernance des données durable et évolutif pour les données génomiques en Europe en utilisant des outils tels que le Consortium européen pour les infrastructures numériques (EDIC) ou d'autres cadres appropriés. Le Luxembourg est pressenti pour héberger le futur Genome EDIC qui sera une nouvelle entité qui opérationnalisera l'infrastructure de

¹² Règlement (UE) 2018/1724 établissant un portail numérique unique pour donner accès à des informations, à des procédures et à des services d'assistance et de résolution de problèmes, et modifiant le règlement (UE) 1024/2012

¹³ Règlement (UE) 2024/1183 modifiant le règlement (UE) 910/2014 en ce qui concerne l'établissement du cadre européen relatif à une identité numérique

Le Luxembourg vise à devenir un pôle d'excellence européen des données en misant sur une gouvernance efficace, des infrastructures de confiance et une forte implication dans les initiatives européennes.

données génomiques européenne et qui concrétisera la vision définie par l'initiative 1+MG. Héberger cette infrastructure de pointe positionnera le Luxembourg comme précurseur dans le secteur numérique.

Le Luxembourg considère les données de cybersécurité non seulement comme une question de sécurité nationale et de défense, de protection des infrastructures critiques et des données de ses citoyens mais aussi comme un facteur de succès démocratique et économique. Ainsi, l'équipe nationale de réponse aux incidents de sécurité informatique (CSIRT) détient des données importantes sur les menaces et se prépare maintenant à les publier dans un espace de données de cybersécurité ouvert et pionnier. Cet espace de données sera accessible à ceux ayant des intérêts légitimes, en particulier les PME et les start-ups, pour favoriser le développement de solutions de cybersécurité basées sur l'IA. Le Luxembourg exploite déjà le projet MISP, reconnu internationalement, une plateforme open-source pour le partage de données sur les menaces, ce qui démontre que les entreprises luxembourgeoises sont prêtes à contribuer à un projet collaboratif pour le bien commun. De plus, cet espace de données jouera un rôle crucial dans la promotion des collaborations transfrontalières, soutenues par les programmes de RDI du Luxembourg, car le développement de solutions de sécurité basées sur l'IA peut bénéficier non seulement au Luxembourg mais à l'ensemble de l'écosystème européen de cybersécurité.

Enfin, pour agir en tant que passerelle nationale vers la richesse des données dans l'espace européen de la recherche, des organisations nationales, telles que le LNDS, ont commencé le processus pour devenir un nœud de la Fédération EOSC.

Partie 3.

Projets phares

Administration publique : Modèle linguistique juridique large du Luxembourg (4LM)

Le projet 4LM vise à développer un grand modèle de langage (LLM) spécialisé dans les textes juridiques luxembourgeois. Un LLM spécifique à un domaine améliorera l'efficacité juridique et réglementaire, au profit des institutions gouvernementales, des professionnels du droit, du système judiciaire et des entreprises. Le public aura également accès à des outils de l'IA, tels que des chatbots et la traduction automatique, améliorant ainsi l'accès à l'information juridique. Les entreprises bénéficieront d'outils basés sur l'IA qui les aideront à se conformer à un corpus de plus en plus complexe de contraintes légales et réglementaires, augmentant ainsi leur productivité grâce à une automatisation des processus de conformité pilotée par l'IA.

Ce projet s'aligne sur les objectifs de transformation numérique du Luxembourg, renforçant sa position dans la gouvernance et l'innovation juridique pilotées par l'IA.

Le contexte du projet 4LM se concentre sur le développement et le déploiement d'un modèle de langage (LLM) spécifiquement adapté aux processus législatifs, juridiques et réglementaires au Luxembourg. Ce projet se situe à l'intersection de l'innovation en matière de l'IA, de la transformation numérique et de la modernisation de l'administration publique. Il s'aligne avec les stratégies nationales et européennes visant à améliorer la gouvernance numérique tout en répondant aux défis sociétaux, économiques et sécuritaires critiques.

Voici une répartition détaillée du contexte :

Pour le grand public :

- Améliorer la compréhension, l'accessibilité et l'inclusivité de la législation.
- Rendre les textes législatifs actuellement en vigueur disponibles dans le plus grand nombre de langues possible pour répondre aux besoins d'un public multiculturel et multilingue.
- Produire des résumés « compréhensibles » pour les citoyens (Einfach Sprooch).

Pour l'administration gouvernementale et les professionnels du droit :

- Identifier les besoins législatifs et les cas d'utilisation du LLM, en particulier pour la rédaction et la conformité aux lois européennes.
- Former un LLM luxembourgeois pour une interprétation précise des textes législatifs.
- Assurer l'interopérabilité avec les plateformes numériques gouvernementales pour améliorer la coopération.

Pour les entreprises :

Les entreprises cherchent de plus en plus à naviguer dans les exigences réglementaires croissantes aux niveaux national et européen. Assurer la conformité peut être complexe, en particulier pour les PME, et peut affecter la productivité. Le projet 4LM vise à fournir une solution en développant des outils spécialisés pilotés par l'IA, conçus pour rationaliser et automatiser les processus de conformité, aidant ainsi les entreprises à remplir leurs obligations de manière plus efficace et efficiente.

Finance : Le Centre d'expérience IA au sein du LHoFT

Le Luxembourg est un centre financier européen de premier plan, avec des priorités stratégiques axées sur la transformation numérique, l'innovation et la durabilité. Cependant, l'adoption de technologies avancées telles que l'IA reste naissante dans de nombreuses institutions. Le Centre d'expérience IA répond à cela en abaissant les barrières à l'expérimentation et à l'adoption, aidant les institutions financières à comprendre et à intégrer l'IA dans des conditions sécurisées et souveraines.

Le LHoFT joue un rôle clé dans l'écosystème des services financiers du Luxembourg en catalysant l'adoption précoce des technologies de pointe. Le Centre d'expérience IA, une expérience physique au sein des bureaux en expansion du LHoFT au cœur de la ville de Luxembourg, activera l'engagement du secteur financier envers l'IA. Il vise à soutenir la compétitivité future du secteur et à consolider le Luxembourg en tant que hub de premier plan pour l'innovation en finance numérique.

LuxProvide apporte son superordinateur MeluXina et son expertise en calcul haute performance, essentiels pour gérer des ensembles de données étendus et exécuter des modèles de l'IA sophistiqués. La Fondation LHoFT apporte son vaste réseau au sein de l'écosystème FinTech et sa compréhension des réglementations financières et des dynamiques de marché. Cette combinaison unique garantit que le Centre d'expérience IA sera à la fois technologiquement avancé et parfaitement adapté aux défis, besoins et opportunités spécifiques du secteur financier.

Les objectifs du Centre d'expérience IA :

- **Manifester le potentiel de l'IA dans la finance.** Montrer comment l'IA peut être utilisée pour améliorer les services financiers en améliorant les processus de prise de décision, en augmentant l'efficacité opérationnelle et en fournissant des solutions de gestion des risques supérieures.
- **Faciliter l'innovation et l'adoption de la technologie.** Accélérer l'adoption des technologies de l'IA dans le secteur financier luxembourgeois en offrant des expériences pratiques, des démonstrations et des histoires de réussite.
- **Renforcer la collaboration entre la technologie et la finance.** Encourager et renforcer la collaboration entre les fournisseurs de technologies, les institutions financières et les organismes de réglementation en créant un environnement qui encourage le dialogue et le partenariat.
- **Éduquer et former les professionnels du secteur.** Développer et proposer des programmes éducatifs et des ateliers qui forment les professionnels du secteur financier aux dernières technologies de l'IA et à leurs applications.

Ce projet phare est conçu pour évoluer en étroite collaboration avec le programme AI Factory du gouvernement, agissant à la fois comme un mécanisme d'admission et une interface d'engagement du marché pour les solutions de l'IA issues du pipeline national d'innovation. En exposant les institutions financières à des applications réelles de l'IA et en facilitant l'expérimentation, le Centre aidera à identifier des cas d'utilisation viables et évolutifs qui pourront être davantage industrialisés dans le cadre de l'AI Factory. Inversement, il mettra en valeur les résultats de l'AI Factory, créant un démonstrateur public des capacités d'innovation en IA du Luxembourg.

Médecine de précision : L'IA prête pour la médecine de précision

Le Luxembourg fera progresser sa stratégie de santé numérique en intégrant l'IA et les données de santé pour soutenir la médecine de précision. Il s'agira de passer d'un modèle réactif à un système proactif qui exploite les données génomiques et cliniques. Cette nouvelle approche reposera sur une boucle continue de recherche, de déploiement et de perfectionnement, axée sur l'intégration des données cliniques, une infrastructure robuste, du personnel qualifié, la conformité légale et l'engagement des citoyens. S'appuyant sur 15 années d'investissements significatifs dans la recherche biomédicale, essais cliniques et initiatives de données de santé à grande échelle, le Luxembourg donnera la priorité à ces domaines pour améliorer l'interopérabilité et soutenir la prise de décision fondée sur des preuves.

Ce projet sera un catalyseur de cette évolution en développant l'infrastructure nécessaire et des outils basés sur l'IA pour personnaliser les traitements. Il s'appuiera sur plusieurs initiatives clés telles que le projet 1+Million Genomes/Genome EDIC, l'Espace européen des données de santé (EHDS) et des actions pour éliminer les décès évitables dus au cancer et dus aux maladies neurodégénératives. De plus, il tirera parti de l'expertise nationale actuelle en analyse multimodale basée sur l'IA pour personnaliser les traitements pour des conditions telles que la sclérose en plaques, la polyarthrite rhumatoïde, le cancer et les maladies neurodégénératives, incarnant la philosophie du «bon médicament pour le bon patient». Étendre ces efforts au-delà de la recherche nécessitera de relever des défis en matière de gouvernance des données, d'interopérabilité, de voies d'accès au marché et d'engagement public. Le projet visera à minimiser les décès évitables pour les cas de cancer et de maladies neurodégénératives grâce à la prévention, à la détection précoce et les thérapies personnalisées. La médecine de précision nécessitera des quantités de données considérables, et le Luxembourg bénéficiera grandement de sa participation aux efforts paneuropéens.

L'initiative 1+Million Genomes, soutenue par des projets de l'UE, cherchera à créer un espace de données formel pour la collecte, la curation et le partage des données génomiques à travers l'Europe. Cela permettra de nouvelles recherches et des soins de santé personnalisés basés sur le génome. En 2025, une nouvelle entité juridique, le Genome EDIC, prendra en charge les opérations principales de l'initiative 1+MG, et le Luxembourg sera bien positionné pour en être l'hôte.

Le projet phare de l'IA en santé sera construit sur une stratégie intégrale de données de santé et un cadre de maturité en IA qui couvrent l'ensemble du parcours du patient, avec une amélioration continue de l'IA grâce aux retours cliniques. L'infrastructure numérique avancée du Luxembourg, y compris le superordinateur Meluxina et le futur ordinateur quantique MeluxinaQ, soutiendra la recherche en IA dans des domaines tels que la génomique, le cancer, les maladies neurodégénératives et la découverte de médicaments. De plus, l'AI Factory accélérera le développement, améliorant ainsi le rythme de l'innovation.

Cette approche apportera un avantage clair pour les patients :

- **Elle améliorera les résultats pour les patients et soutiendra les prestataires de soins de santé en rationalisant la prise de décision et les flux de travail, assisté par des outils tels que des scribes IA pour la saisie de données standardisée.**

Néanmoins, des défis en matière de gouvernance des données, d'interopérabilité, de voies d'accès au marché et d'engagement du public devront être résolus pour étendre ces efforts de manière efficace. Le règlement EHDS favorisera l'échange de données de santé électroniques à travers l'Europe, en alignement avec les objectifs pan-européens du Luxembourg. Grâce à ces investissements stratégiques, le Luxembourg visera à se positionner en tant que leader dans l'innovation en santé alimentée par l'IA.

Marché du travail : Perspectives sur les compétences alimentées par l'IA

Le Luxembourg fait face à des défis spécifiques dans l'exploitation des données sur les compétences en raison de son marché du travail diversifié, multilingue et très dynamique. La stratégie des compétences de l'OCDE¹⁴ a mis en évidence des lacunes cruciales dans la qualité des données sur les compétences existantes au Luxembourg, notamment des données incomplètes (par exemple, limitées aux résidents luxembourgeois), des données incorrectes (par exemple, des enquêtes périodiques, espacées de plusieurs années), des données obsolètes (par exemple, des enquêtes menées seulement tous les quelques années), des détails insuffisants (par exemple, des données sur les catégories de professions et non sur les compétences détaillées), et un manque d'interopérabilité (différentes classifications utilisées entre les administrations).

Ces défis signifient qu'il est actuellement impossible de dire combien de personnes travaillent dans une profession donnée au Luxembourg, sans même évoquer les compétences manquantes ou la prévision des tendances futures. Cependant, ces défis présentent des opportunités significatives pour l'innovation en tirant parti des technologies de l'IA.

ADEM cherche à utiliser l'IA pour améliorer notre compréhension des besoins et des pénuries de compétences au Luxembourg.

Ces informations peuvent être utilisées pour :

- Orienter les citoyens (y compris les jeunes) vers des professions à fort potentiel.
- Orienter les citoyens (y compris les jeunes) vers des cours afin d'acquérir les compétences nécessaires sur le marché du travail.
- Montrer les opportunités de *upskilling* et de *reskilling* entre différentes professions.
- Aider les employeurs dans leurs efforts de recrutement.
- Évaluer la pertinence de l'offre d'éducation/formation au Luxembourg et identifier les offres manquantes.
- Fournir des incitations financières (par exemple, des bons de formation) axées sur les compétences en forte demande ou en pénurie.
- Concentrer les efforts d'attraction des talents sur les régions et les profils pouvant répondre aux pénuries de compétences nationales.
- Comparer les données détaillées sur les compétences avec celles de la Grande Région ou d'autres pays pour identifier les opportunités de collaboration.

Cette initiative s'aligne sur les objectifs stratégiques du Luxembourg visant à favoriser une main-d'œuvre prête pour l'avenir, à répondre aux pénuries de compétences et à soutenir l'élaboration de politiques fondées sur des preuves. En tirant parti des technologies de l'IA, le projet vise à créer un écosystème de données sur les compétences complet et dynamique, au profit des individus, des employeurs et des décideurs politiques, contribuant ainsi à la croissance économique et à la cohésion sociale.

¹⁴ Gouvernement Luxembourgeois, OECD Skills Strategy: des recommandations pour renforcer les compétences au Luxembourg, 02/2023

Éducation : Chatbot IA souverain pour soutenir les programmes éducatifs

La vision stratégique pour l'adoption de l'IA promeut l'utilisation responsable, une gouvernance robuste des données et des garanties solides en matière de confidentialité. Dans l'éducation, plusieurs programmes existent pour divers parcours, niveaux scolaires et contextes linguistiques, ce qui crée une complexité pour les enseignants, les décideurs politiques, et autres parties prenantes. Les dépôts numériques sont souvent statiques et fragmentés, rendant l'obtention d'une vue d'ensemble du paysage curriculaire difficile.

En construisant une base de données dynamique, hébergée localement, et en la couplant avec des outils alimentés par l'IA, ce projet phare s'inscrit dans la stratégie nationale de l'IA du Luxembourg et ses objectifs de souveraineté des données. La solution non seulement facilite l'exploration et la planification des programmes, mais également d'adopter des approches pédagogiques axées sur l'apprenant et préparées pour l'avenir. En fin de compte, elle garantit une innovation en harmonie avec la préservation des valeurs fondamentales, telles que la confidentialité, l'autonomie et l'accès aux opportunités éducatives.

Ceci vise à révolutionner la manière dont les enseignants, les administrateurs, les décideurs politiques et les étudiants interagissent avec les programmes éducatifs en créant une plateforme locale de l'IA. L'objectif principal est de construire une base de données multidimensionnelle contenant tous les programmes du système scolaire, entièrement interconnectée et continuellement mise à jour, puis d'y ajouter des capacités de recherche intelligente et un *chatbot* alimenté par un grand modèle de langage (LLM).

Les ambitions clés incluent :

- **Gestion souveraine des données** : Héberger toute la solution sur des serveurs basés au Luxembourg pour garantir la protection des données, la confidentialité et la conformité aux réglementations nationales et européennes.
- **Répertoire dynamique des programmes** : Développer une base de données curriculaire robuste et multidimensionnelle permettant des mises à jour faciles, des interconnexions profondes et des insights granulaires sur les parcours éducatifs.
- **Enseignants et décideurs politiques autonomes** : Fournir des « widgets » modulaires et des fonctionnalités de recherche, permettant aux utilisateurs de découvrir des liens inter-curriculaires, d'identifier des sujets transversaux et d'informer les décisions politiques.
- **Enseignement et apprentissage améliorés par l'IA** : Exploiter la technologie LLM pour générer des plans de leçon personnalisés, des stratégies de différenciation pour les classes à capacités mixtes, des plans de soutien aux étudiants, et plus encore.
- **Renforcement des capacités évolutives** : Offrir des formations et un développement professionnel continu (CPD) aux enseignants, afin qu'ils puissent utiliser la nouvelle plateforme de manière efficace et responsable, favorisant une culture de la littératie en IA dans le paysage éducatif.

À travers ce projet, le Luxembourg se positionne à l'avant-garde de l'innovation éducative, démontrant comment des solutions d'IA souveraines et éthiquement gouvernées peuvent transformer la gestion des programmes et les pratiques en classe, tout en respectant la protection des données et les valeurs centrées sur l'humain.

Mobilité : Mouvement IA 1.0

Ce projet propose une approche innovante pour mieux comprendre les besoins de mobilité au Grand-duché. Son objectif est de permettre aux décideurs politiques de cibler de manière encore plus efficace les investissements publics en la matière. En appliquant l'IA à des sources de données fragmentées, AI Move 1.0 permettra d'améliorer la qualité des données, d'en accélérer le traitement et d'en faciliter l'interprétation. Le résultat sera une meilleure disponibilité des données dans le domaine de la mobilité, avec la certitude que ces données sont adaptées à l'objectif, c'est-à-dire qu'elles fournissent les informations nécessaires aux décideurs politiques.

Cette initiative répond au besoin réel de renforcer l'Observatoire digital de la Mobilité (OdM), objectif explicite de l'accord de coalition 2023-2028. Les bénéfices pour la politique de mobilité du gouvernement sont démultipliés si ce renforcement est accompagné par de l'IA. En l'occurrence, le champ d'application d'AI Move 1.0 concerne un huitième du budget de l'État (13 % du budget 2023 alloué au ministère de la Mobilité et des Travaux publics) et plus largement les investissements dans la mobilité des entreprises et des ménages.

Grâce à une meilleure disponibilité des données de haute qualité sur la mobilité, AI Move 1.0 débloque les avantages suivants :

- **Social** : Les méthodes de l'IA permettent d'approfondir l'analyse des données de mobilité existantes et à créer, conduisant à une compréhension plus profonde des besoins de mobilité des personnes. Une meilleure connaissance des besoins à satisfaire permet de cibler encore plus efficacement les investissements et d'améliorer davantage l'accès à la mobilité.

- **Économique** : Il existe déjà une forte demande pour des données de mobilité de haute qualité. AI Move 1.0 élargira ce champ et renforcera la communauté des producteurs et consommateurs de données de mobilité au Luxembourg. Cela créera un terreau propice à l'innovation.
- **Environnemental** : L'accélération de l'atteinte des objectifs de répartition modale en faveur de moyens de transport moins polluants peut entraîner des bénéfices environnementaux secondaires.
- **Collaboration et synergies** : AI Move 1.0 s'aligne avec les initiatives européennes des « systèmes de transport intelligents » et de l'espace de données de mobilité, favorisant la coopération transfrontalière. Un exemple de cette collaboration en cours est le projet **LuxMobil** d'OdM, réalisé en étroite coordination avec nos voisins français, belges et allemands, afin de produire une vision internationale unique de la mobilité transfrontalière.

Dans cet écosystème, AI Move 1.0 met particulièrement l'accent sur les producteurs de données publiques. Ils constituent le pilier principal du paysage des données de mobilité au Luxembourg, car ils fournissent la majorité des services et infrastructures de mobilité. Ceci ne diminue pas les contributions et l'importance des autres acteurs de l'écosystème. AI Move 1.0 est conçu comme une étape initiale et fondamentale. Il reconnaît que même les analyses les plus sophistiquées nécessitent une base de données solide et fiable, et que les données publiques en constituent une grande partie. À mesure que cette base se forme, de nouvelles opportunités peuvent émerger. Les institutions de recherche et les entreprises privées pourraient diriger le développement d'analyses avancées ou contribuer de nouveaux types de données, soit en soutien à la mission centrale de l'OdM, soit dans le cadre de leurs propres initiatives.

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 CCloud & 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 valeurs. 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.

Énergie : Améliorer la transition énergétique du Luxembourg par l'intégration de données en temps quasi-réel

Alors que le Luxembourg progresse dans la transition énergétique et passe à un système énergétique décentralisé et décarboné, sa gestion devient plus complexe à mesure que de nouvelles dynamiques apparaissent avec un nombre croissant de producteurs-consommateurs, de sources renouvelables, d'actifs électriques et de vecteurs énergétiques. Le projet vise à adresser les défis tels que les limitations du réseau, l'expansion des données, les prix volatils, la consommation fluctuante, les congestions et les vecteurs énergétiques multiples dans la prochaine phase de la transition énergétique, en appliquant un changement de paradigme dans la gestion du système énergétique du pays : l'opération en temps quasi-réel du futur système énergétique.

L'approche cible à positionner le Luxembourg comme vitrine d'un système énergétique efficace et numérisé. Un système énergétique abordable, durable et sécurisé sera garanti tout en débloquant la flexibilité nécessaire du système et l'adaptabilité du marché. La vision est d'améliorer le système énergétique du Luxembourg en exploitant les capacités de l'IA, le rendant plus robuste, sécurisé et durable, tout en garantissant une énergie abordable pour tous.

Pour atteindre cet objectif, les aspects suivants seront couverts :

- **Exploitation des données énergétiques en temps quasi-réel** : Collecter et utiliser la vaste quantité de données générées par diverses sources d'énergie (par exemple, électricité, gaz, chaleur et hydrogène) en temps quasi-réel pour créer un système de gestion de l'énergie hautement optimisé, économiquement viable et durable. Les interactions des flux de données existants seront cartographiées et de nouvelles seront créées tout en assurant l'harmonisation et la cybersécurité.

- **Exploitation de l'informatique avancée et de l'IA** : Développer des outils de l'IA qui permettent l'opération en temps quasi-réel du système énergétique. Par exemple, détection des pannes, maintenance prédictive des actifs, reconfiguration du réseau, surveillance des vecteurs énergétiques multiples, tarifs dynamiques explicites en temps réel, optimisation solaire et éolienne, véhicule au réseau. Établir un bac à sable de l'IA pour l'énergie pour permettre aux développeurs et aux chercheurs de tester les performances et le comportement des modèles d'IA, d'évaluer la fiabilité des différents algorithmes d'IA, d'identifier et de mitiger les risques et biais potentiels, et de tester la conformité réglementaire.
- **Développement de la communication bidirectionnelle et en temps quasi-réel** : Mise en place de canaux de communication bidirectionnels pour acquérir des données, surveiller et contrôler de manière optimale le système énergétique en temps quasi-réel.

L'impact attendu englobe une multitude d'aspects. Économiquement, l'intégration de la prise de décision basée sur l'IA vise à réduire les coûts opérationnels et à créer de nouvelles opportunités de marché. Environnementalement, l'opération en temps quasi-réel permettra de prendre des décisions énergétiques avec un équilibre entre l'abordabilité, la durabilité, la sécurité de l'approvisionnement et la résilience. En équilibrant l'offre et la demande et en optimisant la production, le stockage et la consommation d'énergie renouvelable, le projet actuel contribuera directement aux objectifs climatiques. Socialement, la participation active des citoyens est encouragée, permettant aux consommateurs de s'engager sur les marchés de l'énergie, d'ajuster leur consommation en fonction des prix dynamiques et de bénéficier des programmes de réponse à la demande. En conséquence, la littératie énergétique est améliorée.

Sciences du climat : Jumeau numérique régional du changement climatique

L'impact économique croissant du changement climatique souligne l'urgence de solutions innovantes pour la résilience. À mesure que les risques augmentent, le marché de l'analyse prédictive des risques devrait passer de 22 milliards de dollars en 2019 à 55 milliards de dollars d'ici 2027. Le **projet Regional Digital Twin Climate Change (RDTCC)** a pour ambition de répondre à ce besoin en fournissant des services climatiques avancés et des solutions de gestion des risques pour l'énergie, la finance, l'agriculture et les services publics. Le projet exploitera les données, l'IA, le HPC, le cloud souverain et l'interopérabilité des plateformes de l'UE pour développer un portefeuille complet de services climatiques.

Ses principaux objectifs sont les suivants :

- Améliorer la résilience au changement climatique pour les organismes gouvernementaux et les industries critiques,
- Faire progresser les algorithmes de l'IA pour les applications de prédiction et de gestion des risques,
- Établir le Luxembourg comme un leader mondial de la technologie des jumeaux numériques et des services climatiques.

L'initiative s'appuiera sur des contextes européens et nationaux favorables, en alignement avec Destination Earth (DestinE), une initiative européenne ambitieuse visant à développer une réplique numérique très précise de la Terre pour surveiller, simuler et prédire les changements climatiques et environnementaux. Elle tirera parti des activités initiées par la LSA et l'ESA, telles que le prototype de jumeau numérique des inondations au Luxembourg en 2024 et l'étude d'architecture et les cas d'utilisation du RDTCC en 2025. Cette approche stratégique pose les bases du développement industriel à partir de 2026.

En tirant parti de l'expertise et des avancées technologiques développées par le Space Hub de la Luxembourg AI Factory, le RDTCC appliquera l'IA et le HPC pour optimiser les évaluations régionales de l'impact climatique, permettant une analyse précise des risques et une prise de décision éclairée. Le système intègre des images satellites, des mesures locales in-situ, des cartes topographiques et des données régionales auxiliaires, les ingérant et les traitant automatiquement en utilisant MeluXina(-AI) et les capacités d'hébergement sur les solutions de cloud souverain du Luxembourg. Une caractéristique clé est son interopérabilité avec DestinE, qui fournit les scénarios climatiques mondiaux que le RDTCC affinera en modèles haute résolution et spécifiques à la région.

Le projet **améliora les services climatiques multisectoriels, en fournissant des modèles IA prédictifs et des simulations de scénarios**, adaptés aux secteurs de l'énergie, des services financiers et des infrastructures numériques, et soutiendra des jumeaux numériques spécifiques aux secteurs tels que ceux de l'énergie et des transports, garantissant un écosystème numérique cohérent et évolutif. De plus, des outils alimentés par l'IA, y compris des assistants virtuels et des fonctions de recherche avancées, permettront des analyses en temps réel et une récupération efficace des données, permettant aux entreprises et aux décideurs politiques d'anticiper et de réduire les risques.

Le consortium sera composé d'acteurs luxembourgeois clés dans l'IA, le Cloud et le HPC tels que les centres de recherche, les universitaires, les entreprises privées, les fabriques européennes de l'IA et d'autres agences nationales ayant une expertise ou besoins pertinents et confirmant leur intérêt à participer au projet.

Espace : Durabilité de l'espace

Les technologies et applications spatiales jouent un rôle crucial dans notre vie quotidienne, en permettant la navigation GPS, les prévisions météorologiques et les communications mondiales. En raison du nombre croissant de satellites lancés, l'espace devient encombré. Par conséquent, pour continuer à bénéficier des technologies spatiales, il est essentiel de garantir un espace durable. La position du Luxembourg dans le secteur spatial est bien établie avec de grands opérateurs bien établis, un écosystème étendu de startups et de PME ainsi qu'un cadre juridique pour les activités spatiales.

Le projet actuel abordera le problème complexe de la durabilité spatiale en différentes phases :

- **Space Situational Awareness (SSA) :** Améliorer la SSA avec des outils d'IA pour l'identification des objets, l'optimisation des manœuvres et la prévention de collisions. L'utilisation d'observations terrestres et de radars en combinaison avec des données spatiales est prévue. Le développement des capacités de gestion des données SSA, allant de la collecte, l'agrégation, la détection des erreurs, l'estimation des biais et à l'archivage, est encouragé. Des bases de données SSA hébergées sur une infrastructure cloud souveraine et d'un marché SSA seront explorés.
- **Santé des satellites :** Optimiser la maintenance des engins spatiaux. L'IA révolutionnera l'analyse de la santé des satellites grâce à l'apprentissage automatique, l'analyse prédictive et la détection d'anomalies. L'IA pourrait surveiller les données de télémétrie des satellites en temps réel et détecter des anomalies qui indiquent des dysfonctionnements de capteurs, des problèmes de communication, des écarts par rapport aux schémas ou une consommation d'énergie inattendue. L'IA pourrait potentiellement signaler la nécessité d'actions (maintenance prédictive) à partir de la télémétrie historique, de facteurs environnementaux tels que la météo spatiale ou de comportements anormaux précédents.

- **Autonomie à bord et services en orbite :** Renforcer la durabilité dans l'espace en permettant de (i) planifier des itinéraires efficaces et prendre des décisions en temps réel pour les missions spatiales ainsi que (ii) prolonger la durée de vie des engins spatiaux, réutiliser des modules et désorbiter des objets qui ne peuvent pas manœuvrer vers un cimetière spatial. L'IA jouera un rôle crucial dans les services en orbite en permettant des opérations autonomes et efficaces pour réparer, ravitailler, relocaliser et désorbiter des satellites. Cela implique la vision par ordinateur, l'informatique en périphérie et l'apprentissage automatique pour la reconnaissance d'objets en temps réel. Le contrôle robotique peut être utilisé pour exécuter des opérations dédiées qui ne peuvent pas dépendre de la latence requise par la supervision humaine.
- **Fabrication dans l'espace :** La pierre angulaire d'une future économie spatiale. Des avancées en impression 3D, assemblage dans l'espace, réutilisation des débris, informatique en périphérie dans l'espace sont prévues.

La réalisation du projet actuel, largement portée par les initiatives des entreprises privées, comprendra le lancement de trois appels à projets couvrant les trois premières phases de l'initiative « Sustainability in Space ». Ces appels devraient encourager des projets de R&D industrielle dans les domaines de « l'IA pour la SSA », « l'IA pour la santé des satellites » et « l'IA pour l'autonomie à bord, pour les services en orbite » grâce à des aides financières attractives.

Patrimoine culturel : Un cadre stratégique pour l'intégration de l'IA dans le secteur culturel luxembourgeois

Les institutions culturelles assurent un équilibre essentiel entre progrès technologique et valeurs humaines. Le projet phare *Patrimoine Intelligent* vise à positionner le secteur culturel luxembourgeois comme consommateur et acteur impliqué dans le développement de solutions d'IA, en développant le cadre politique adapté. L'IA ouvre des perspectives inédites : relier des collections disparates par le biais de métadonnées intelligentes, détecter des motifs dans des archives multilingues, ou rendre accessibles d'immenses ensembles de données historiques. Le projet entend réduire la fracture numérique entre les grandes institutions et les archives locales grâce à des outils d'IA évolutifs, une infrastructure technique partagée et des dispositifs de transfert de connaissances. Des volets consacrés à l'éthique, à la protection de la création, aux outils innovants, à l'inclusion et à l'engagement du public renforceront l'esprit critique et favoriseront la souveraineté numérique à l'échelle nationale. En exploitant les capacités de l'IA, nous démocratiserons l'accès au patrimoine multilingue du Luxembourg, renforcerons les liens entre citoyens et mémoire collective, et ferons du pays un leader de la gestion patrimoniale augmentée par l'IA, en lien avec la stratégie nationale en matière d'intelligence artificielle.

Contexte :

Depuis une enquête menée en 2018 par le ministère de la Culture, le secteur du patrimoine culturel luxembourgeois présente des niveaux variés de maturité numérique. Le projet LuxTIME a approfondi ce diagnostic en proposant un consortium décentralisé pour structurer les activités de recherche. Ce projet phare, reconnu pour sa pertinence stratégique, vise à relever les enjeux et saisir les opportunités liées à l'IA dans le domaine culturel.

Les objectifs du projet sont les suivants :

- **Renforcer les archives et les collections :** Accompagner les institutions culturelles dans une gestion qualitative et pérenne de leurs données, tout en renforçant leur interopérabilité. Dans une économie des données, il est important de reconnaître ces compétences et savoir-faire comme des atouts stratégiques essentiels.
- **Faciliter la recherche et le développement :** Améliorer les processus internes des institutions patrimoniales et proposer des services innovants centrés sur l'utilisateur. Les projets associés facilitent la recherche intelligente, l'enrichissement des métadonnées, les liens sémantiques et l'accès multilingue.
- **Mettre en place un cadre éthique :** Établir des cadres juridiques transparents pour garantir que l'innovation en IA respecte les droits des créateurs. Soutenir le secteur GLAM (Galleries, Bibliothèques, Archives et Musées) en établissant un cadre éthique propice à une innovation responsable et durable.
- **Sensibiliser et former le public :** Positionner l'État comme un catalyseur stratégique de l'innovation dans le secteur culturel. En créant des espaces d'expérimentation internes, prévoir des actions de sensibilisation et de formation ciblées pour les petites institutions GLAM.
- **Mettre en œuvre un modèle de gouvernance collaborative :** Instaurer un modèle de gouvernance flexible et adaptatif, capable d'évoluer avec les besoins des parties prenantes et le rythme soutenu des avancées en IA, tout en assurant une cohérence stratégique et en favorisant l'innovation.

Partie 4. Conclusion

Le **Luxembourg s'affirme comme un précurseur numérique en Europe**, avec une vision claire pour renforcer sa souveraineté numérique à l'horizon 2030. En intégrant la stratégie nationale des données à celles sur l'intelligence artificielle et les technologies quantiques, le Grand-Duché crée **un écosystème attractif, performant, souverain et sécurisé**, bénéficiant aux citoyens, aux chercheurs, ainsi qu'aux secteurs public et privé. Cette approche centrée sur l'humain vise à rapprocher les citoyens de leurs propres données, en leur donnant les moyens de les exploiter tout en renforçant leur protection.

La gouvernance centralisée des données joue un rôle fondamental dans cette transformation numérique en assurant la **cohérence des initiatives et en facilitant la réutilisation des données** du secteur public. Cette structure permettra à l'État de relever efficacement les défis sociétaux en s'appuyant sur des décisions éclairées par les données, tout en développant des **services publics plus simples, rapides et efficaces** pour les administrés.

En optimisant l'accès aux données, en investissant dans une infrastructure de pointe et en cultivant les talents nécessaires, le Luxembourg **stimule l'innovation et la création de valeur** dans l'économie nationale. Cette stratégie ambitieuse positionne le pays comme un **pôle d'excellence en matière de données** en Europe, une destination privilégiée pour les entreprises innovantes et un partenaire de choix pour les initiatives de données transfrontalières, contribuant ainsi à façonner l'avenir numérique de l'Europe.





Éditeur

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

Auteur

Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg

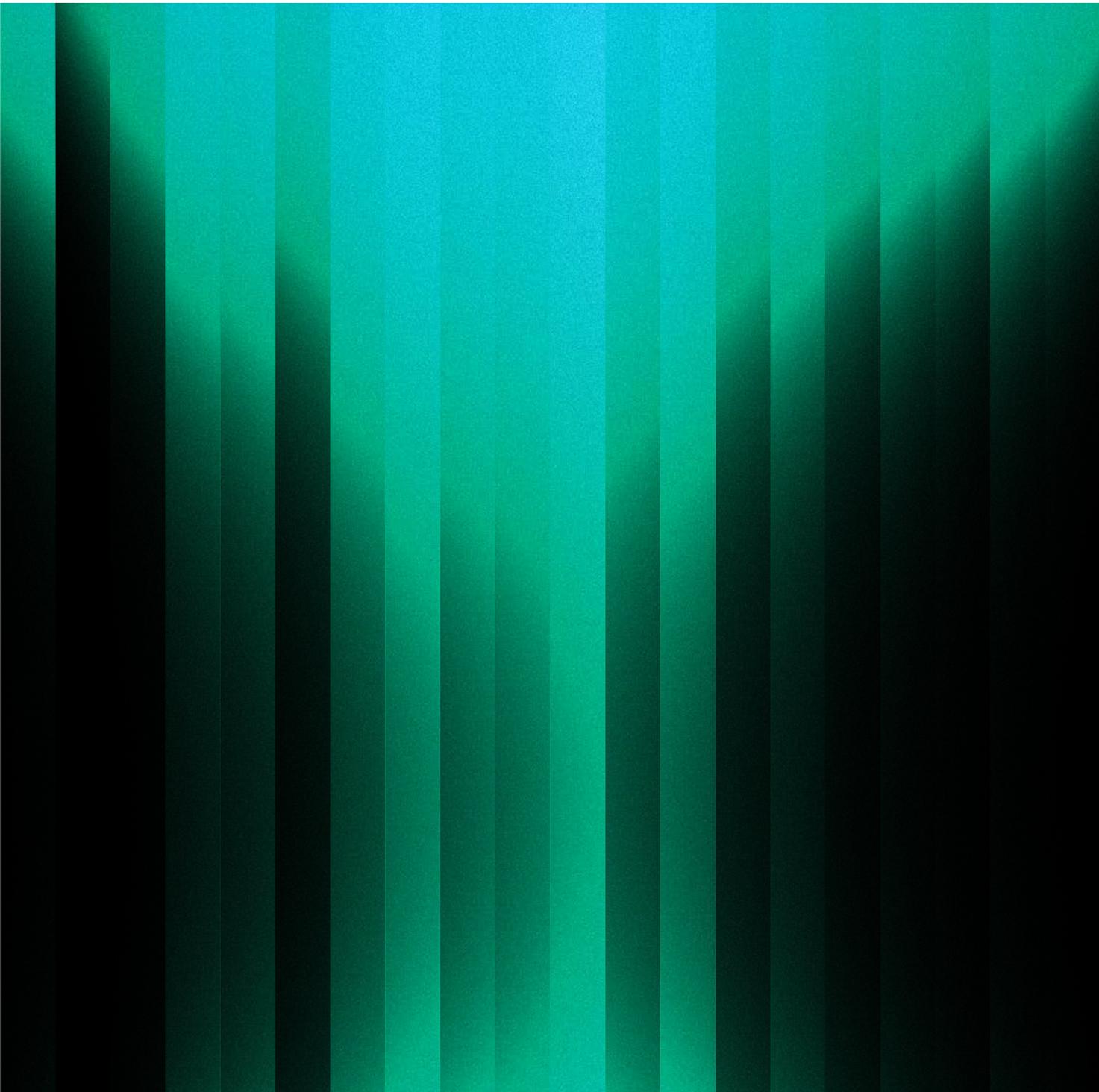
Layout

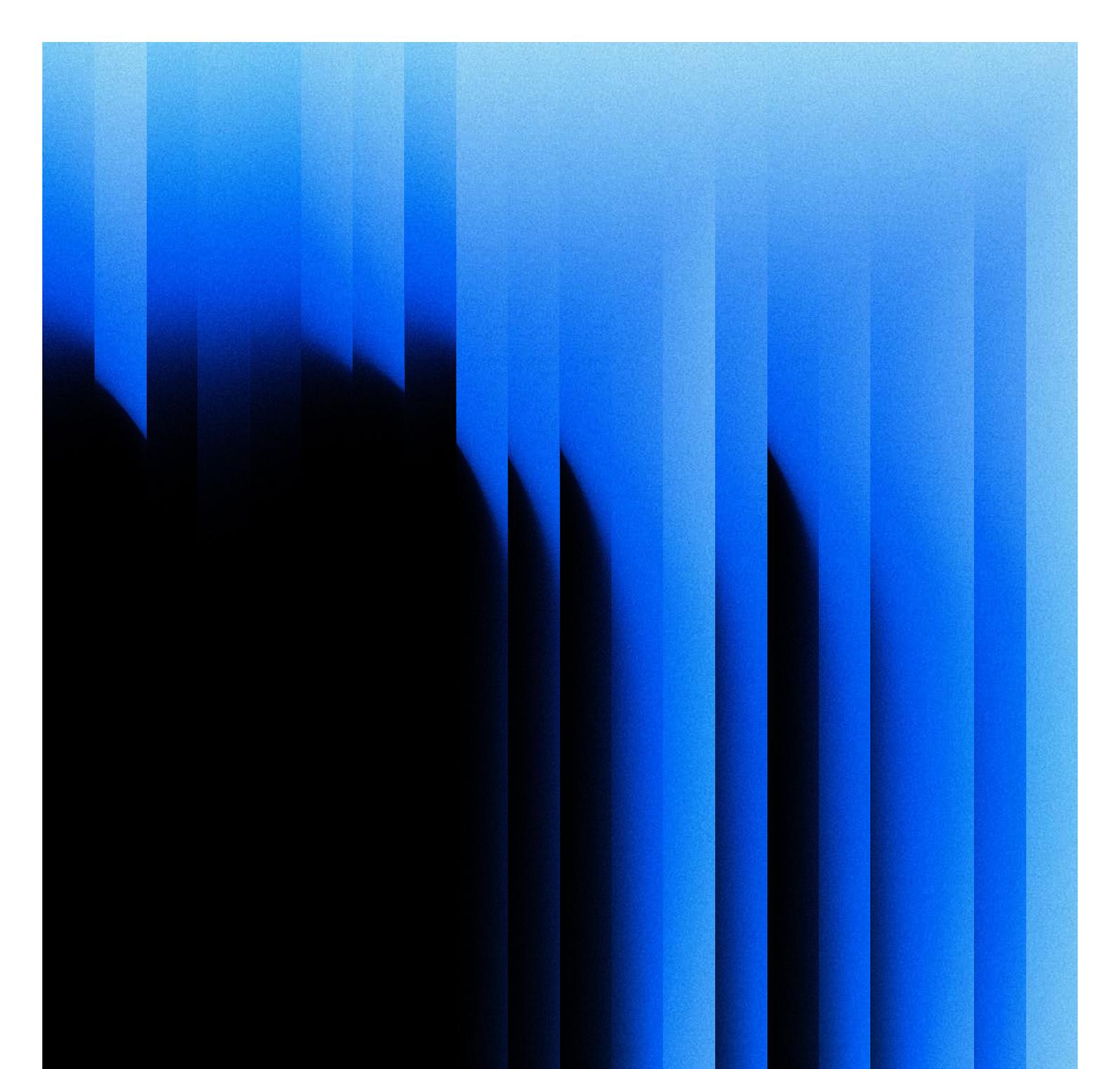
Cropmark

Impression

Imprimerie Reka

Mai 2025



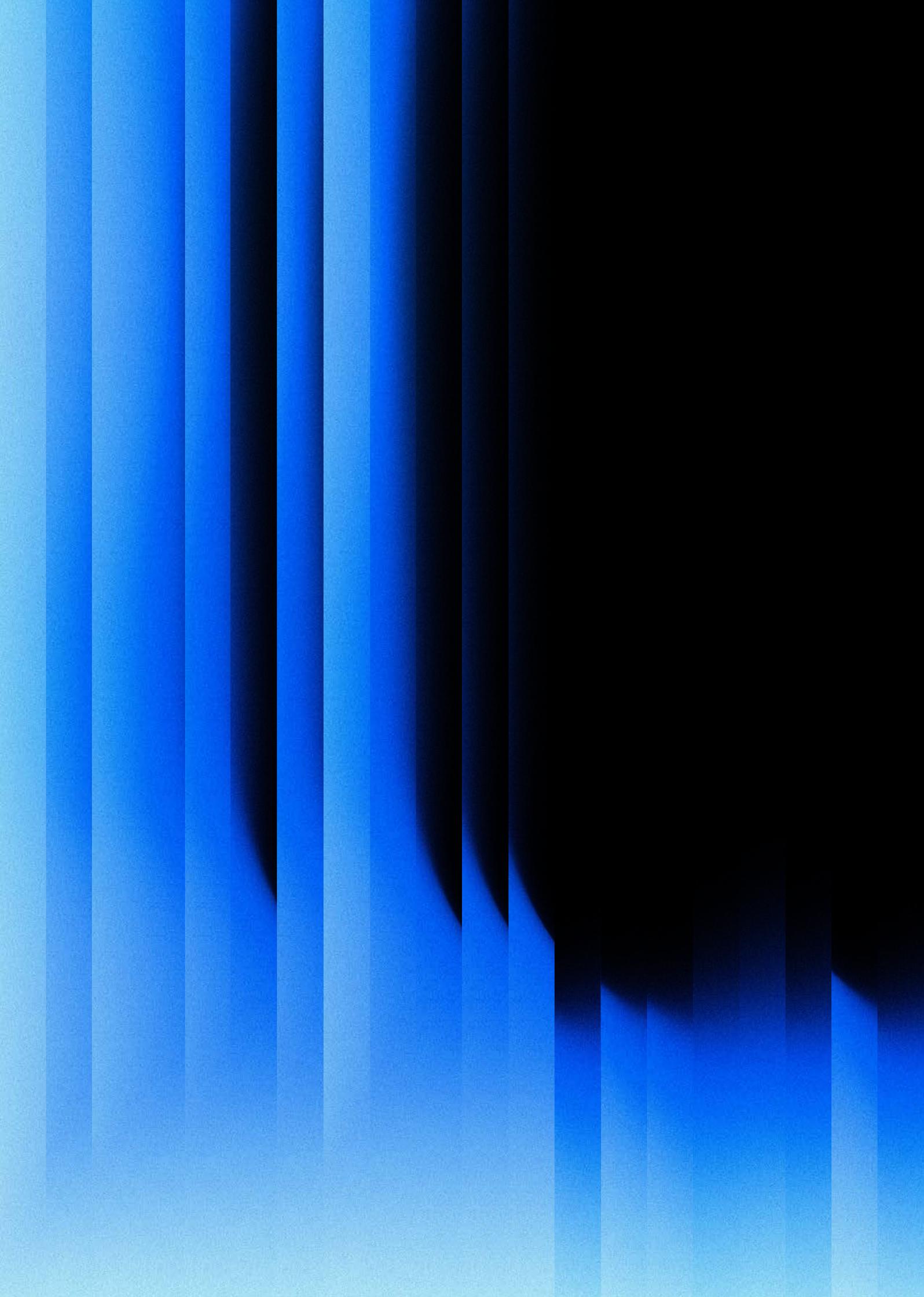


Accélérer la souveraineté numérique 2030

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

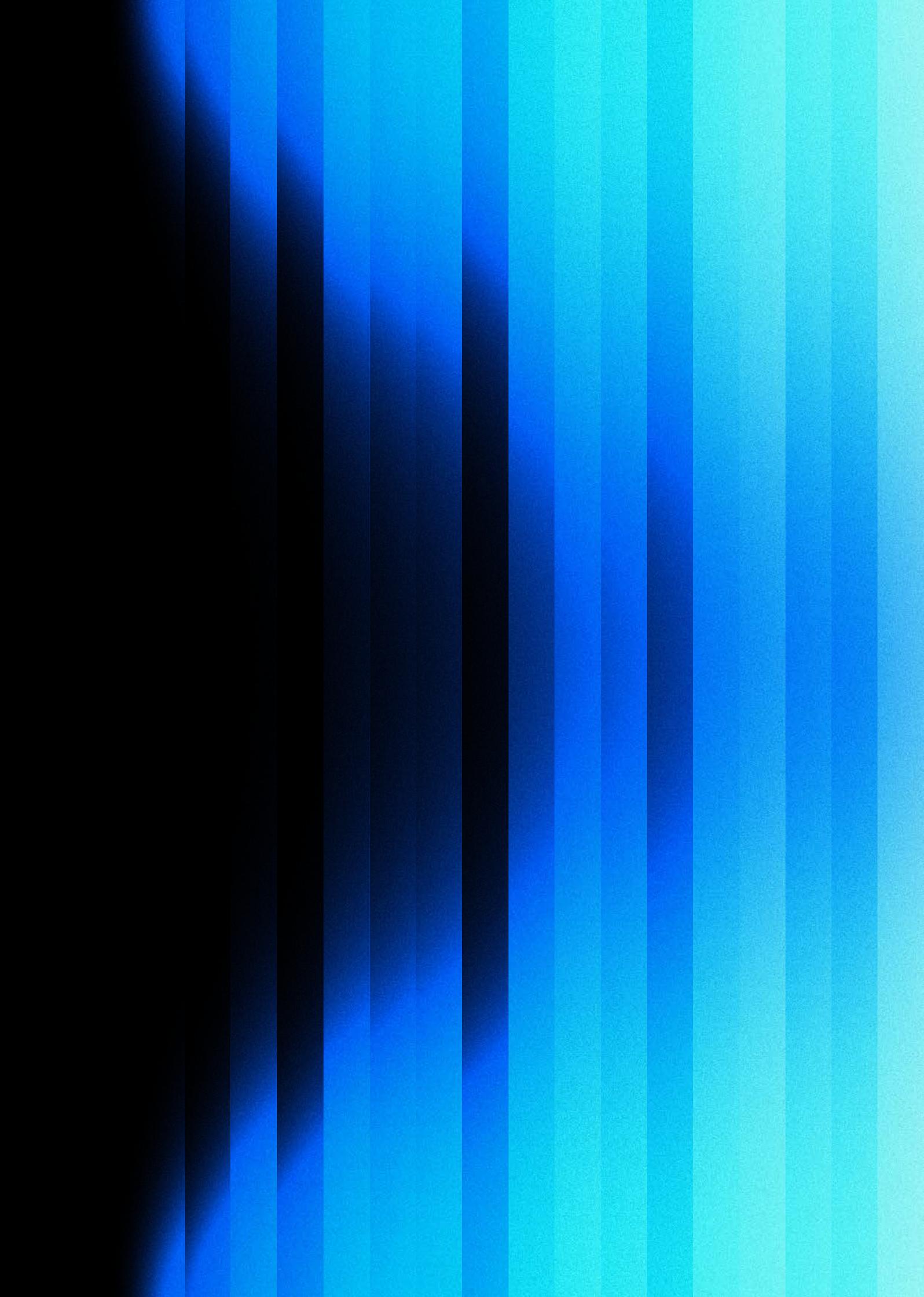
« Priorité à l'adoption concrète et utile – c'est le principe qui nous a guidé en fixant les actions en matière d'intelligence artificielle. Que ce soit à l'intérieur de l'administration publique ou des secteurs-clés comme la finance ou la santé. Chaque secteur, chaque entreprise et chaque personne aura 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.

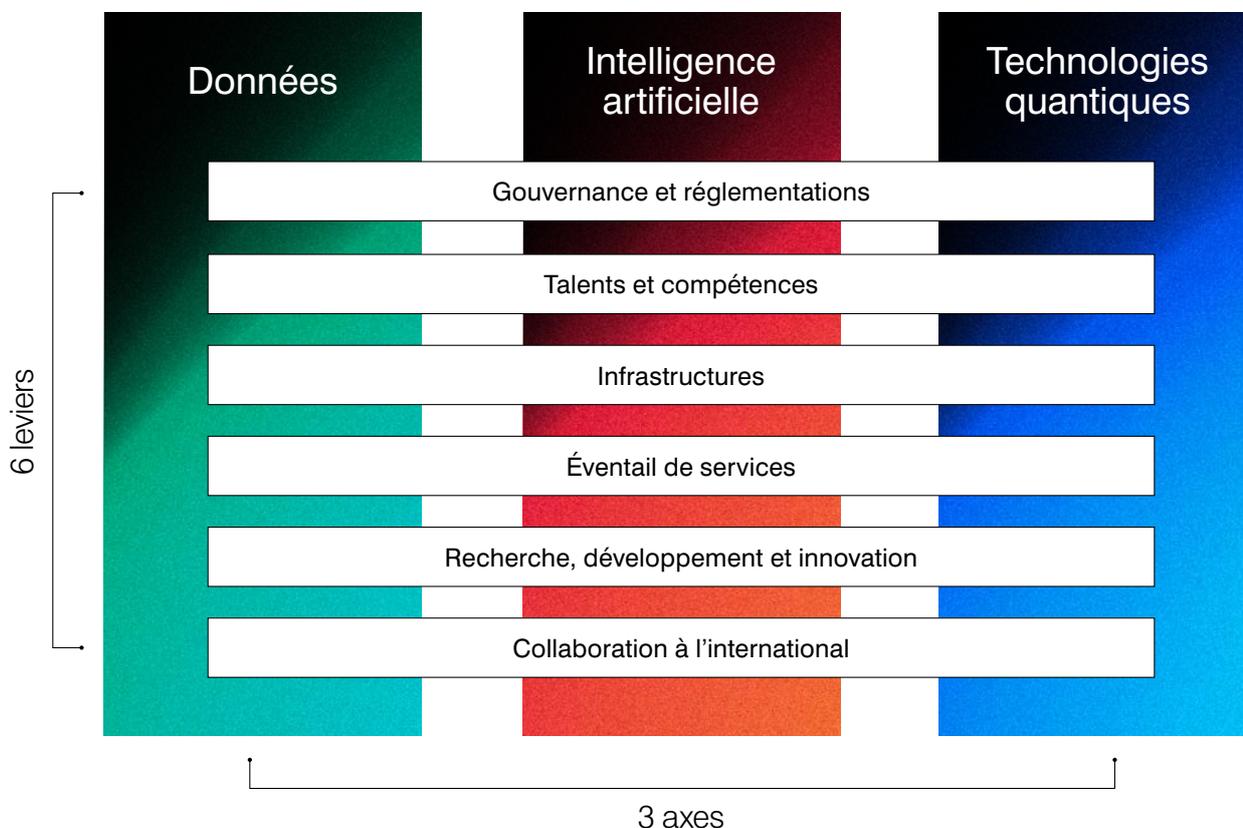
Ces stratégies visent à placer le Luxembourg à l'avant-garde d'un avenir où la technologie est un moteur essentiel de la croissance et du bien-être des citoyens, tout en assurant sa souveraineté numérique.

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.

Accélérer la souveraineté numérique 2030 : l'ambition du Luxembourg en matière de données, d'IA et des technologies quantiques



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

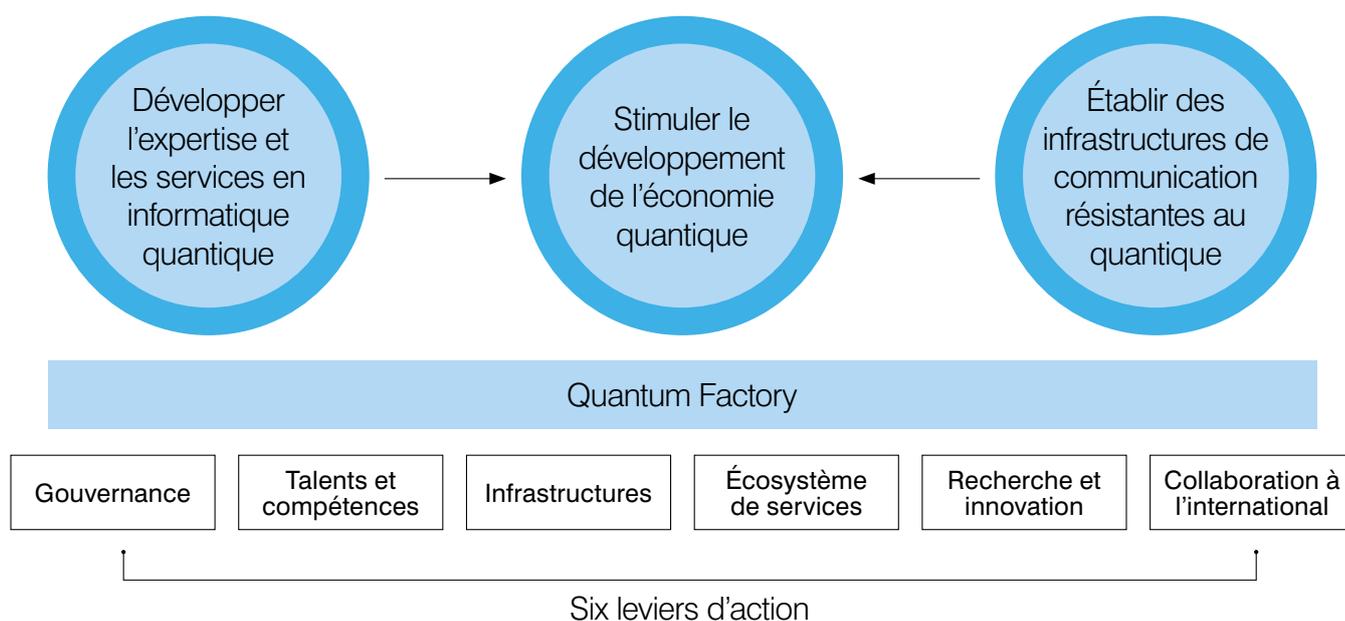
sur les données, la stratégie accorde une attention particulière aux communications quantiques et à la cybersécurité. L'un de ses objectifs majeurs est de préparer les acteurs publics et privés, ainsi que leurs infrastructures de données, à se prémunir contre les menaces d'origine quantique, renforçant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

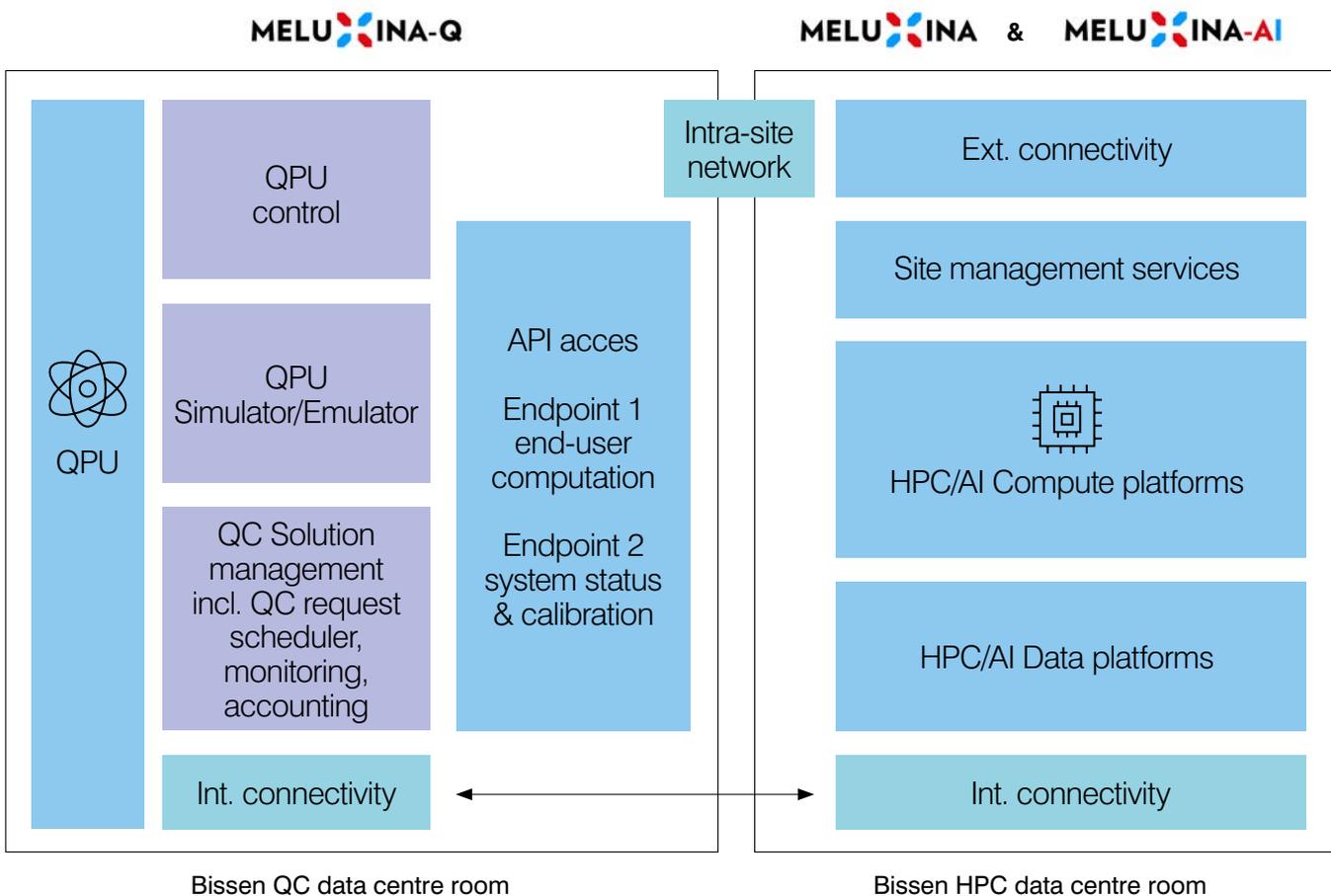


Schéma simplifié de l'architecture MeluXina-Q

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 cybersécurité, 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.

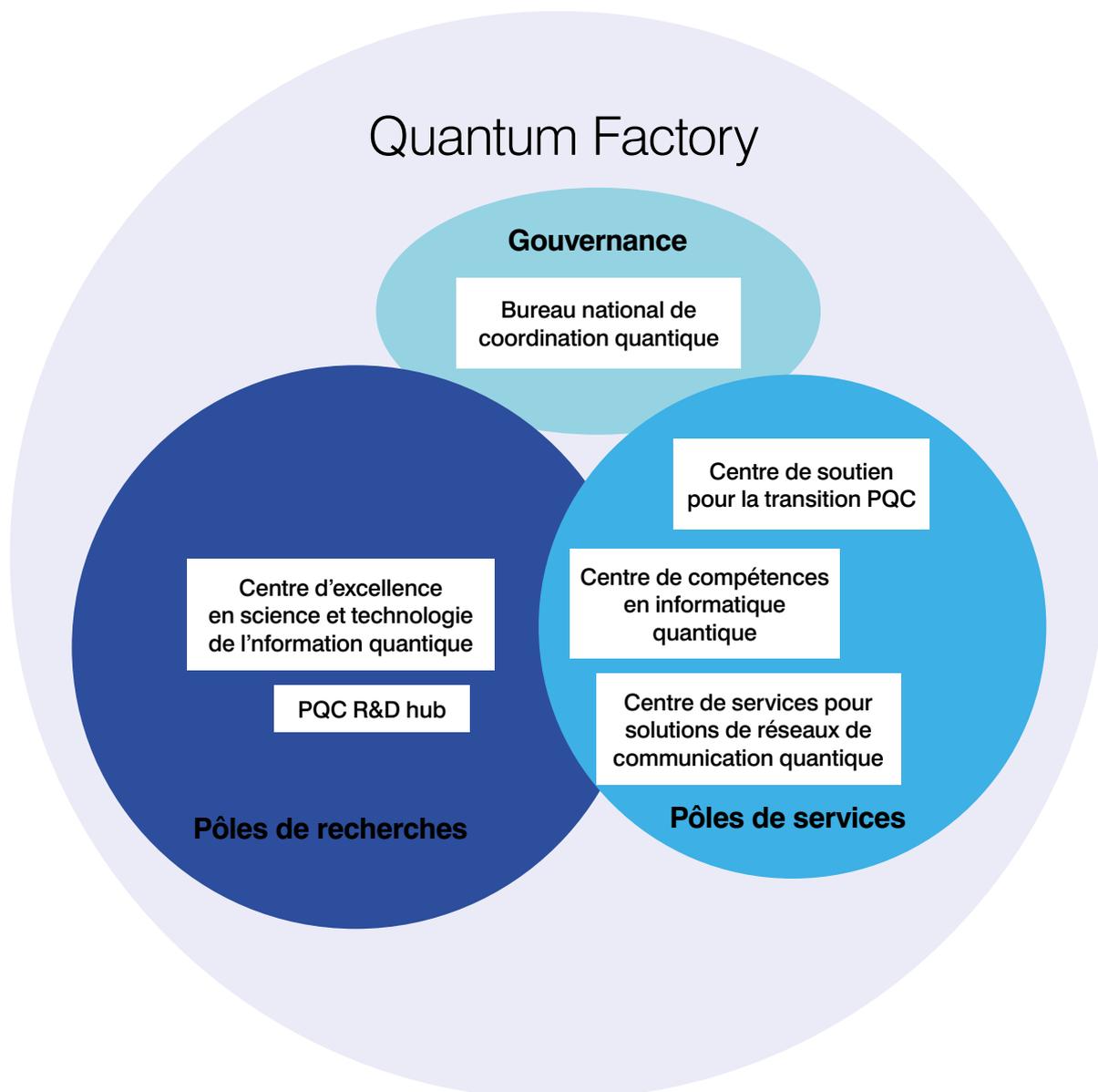
Une approche centrale sera également l'intégration des technologies quantiques avec l'IA et la science des données, permettant la formation d'équipes pluridisciplinaires composées d'experts métier, de chercheurs en IA, de data scientists et d'ingénieurs logiciels. Ces équipes auront accès aux plateformes 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, Quanterra 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 inabordable 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 CCloud & 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.

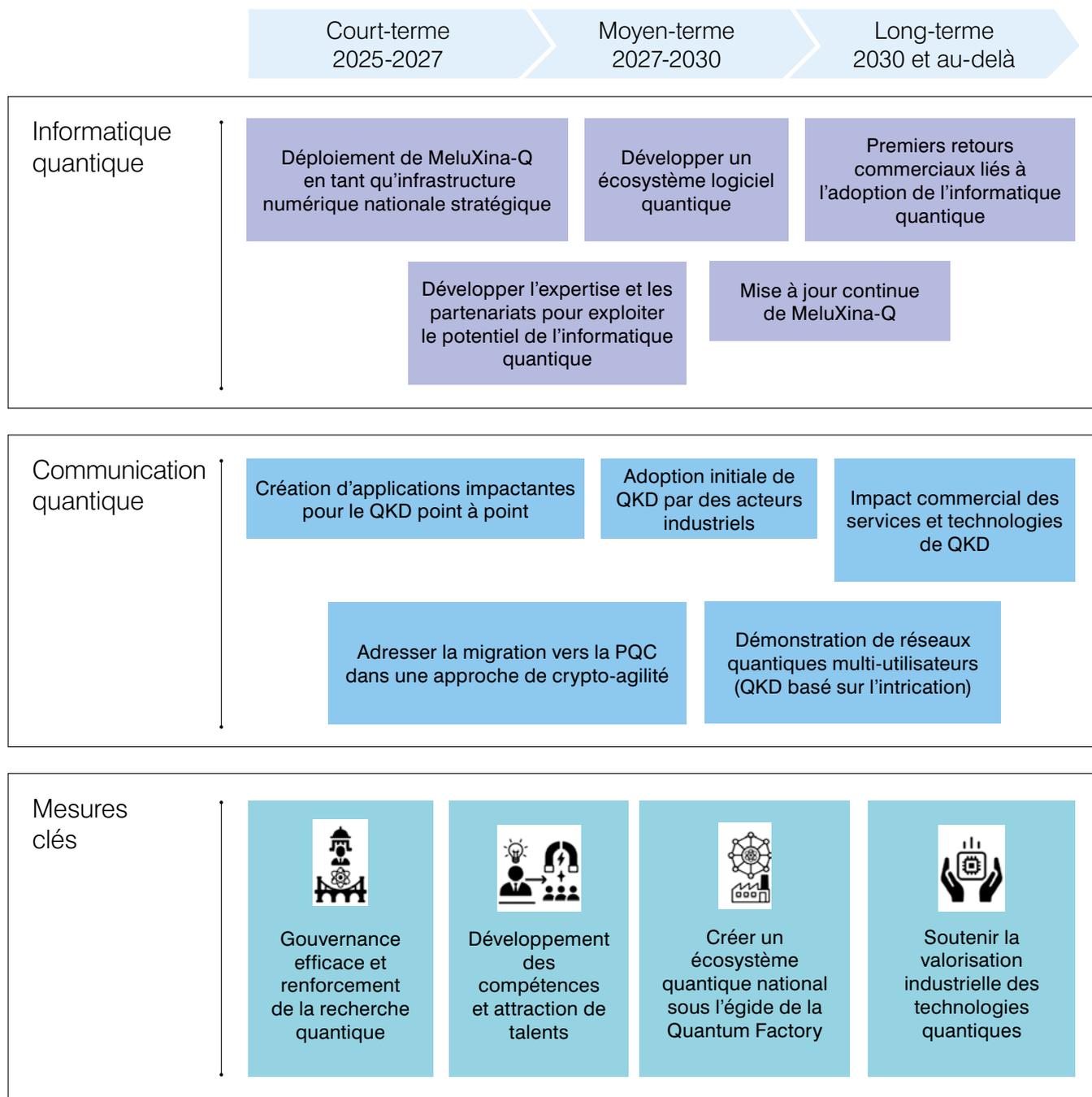
- **En premier objectif**, le projet vise à mieux comprendre les adversaires en utilisant les outils existants de collecte de renseignements sur les menaces et en transformant les données brutes en informations de valeur. L'intégration de ces

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

Conclusion

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.

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

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.

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

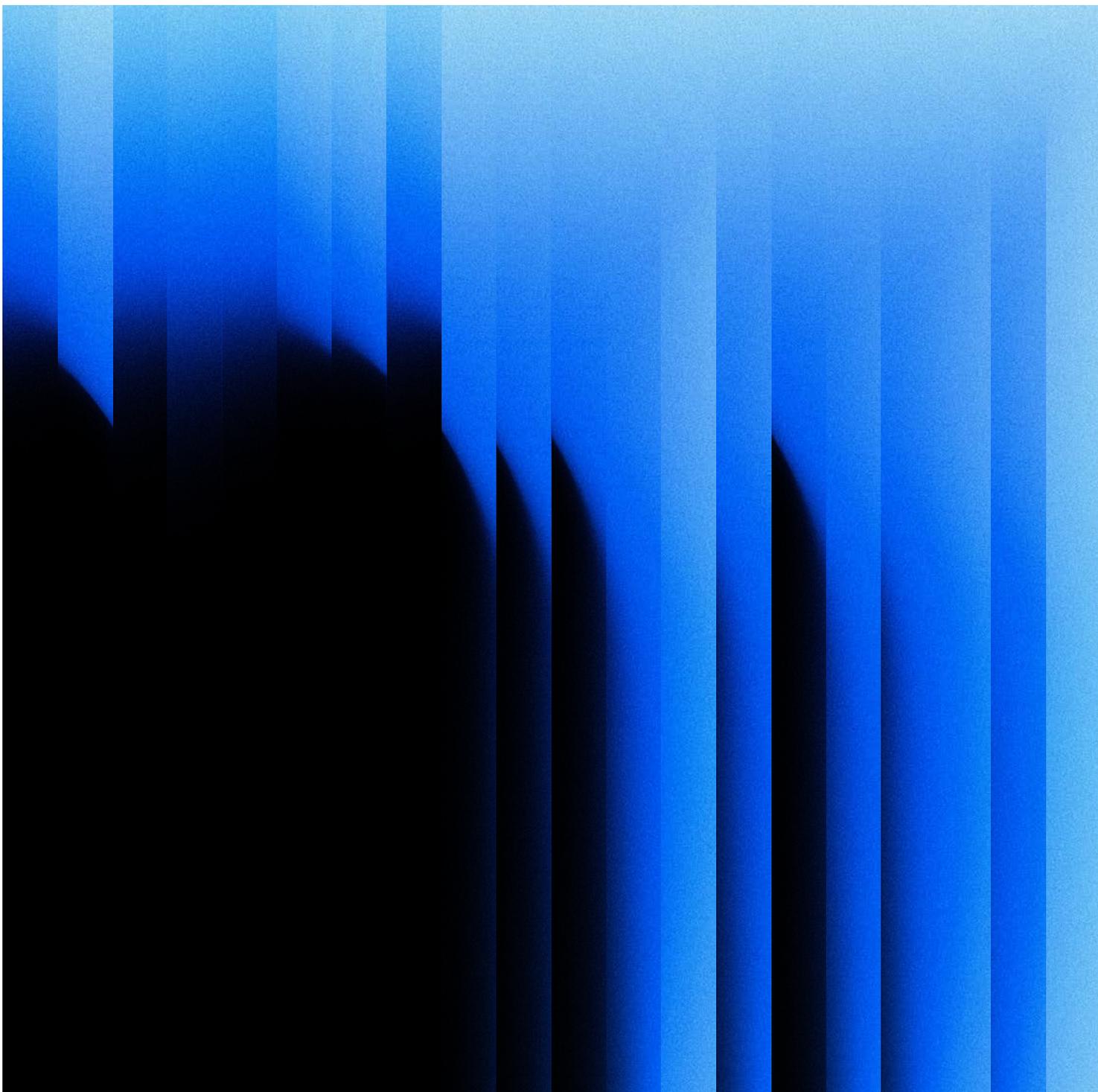
Layout

Cropmark

Impression

Imprimerie Reka

Mai 2025



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG