

Note de cadrage prospectif

INFRA2100

Next Generation Infrastructure

« Quelles infrastructures économiques essentielles pour relancer l'économie et renforcer sa résilience au Luxembourg? »

Résumé exécutif

Les décisions et les investissements d'aujourd'hui déterminent les économies (ou les dépenses) et la capacité de résilience (ou les fragilités) de demain.

L'Accord de coalition 2023-2028 du Gouvernement du Luxembourg vise une relance économique par le biais, entre autres, de **grands investissements publics** :

« Au vu d'une situation conjoncturelle difficile et du contexte de polycrise auquel notre pays est confronté, le Gouvernement doit mener une politique de **relance économique** (...) en maintenant les investissements publics à un niveau élevé afin de répondre aux défis actuels et futurs liés à l'évolution démographique et à la **double transition durable et digitale**. »

En Union européenne, le Luxembourg se démarque par sa **politique d'investissement ambitieuse** avec un budget public pour les infrastructures supérieur à la moyenne européenne. L'enjeu consiste à combiner relance économique immédiate et transformation bas carbone long terme des infrastructures essentielles, en décidant judicieusement, sur base des connaissances d'aujourd'hui, en quoi investir pour bénéficier des effets multiplicateurs des investissements (emplois, rentrées fiscales...), tout en renforçant la résilience des constructions pour les générations futures. En effet, le contexte de dépassement des limites planétaires et d'insécurité économique globale impose de nouvelles contraintes à la construction, inédites dans l'histoire humaine. Il crée aussi de nouvelles opportunités économiques pour décarboner, repenser, sécuriser et adapter nos infrastructures.

Au niveau européen, la **directive sur la résilience des entités critiques**, entrée en vigueur en 2023, impose aux États membres de l'UE de prendre des mesures spécifiques pour garantir que les services essentiels au maintien des fonctions sociétales ou des activités économiques vitales soient fournis sans entrave dans le cadre du marché intérieur. Chaque État membre doit avoir recensé les entités critiques pour les 11 secteurs énumérés dans la directive et adopter, d'ici à juillet 2026, une stratégie nationale pour renforcer leur résilience.

Partant de ces prémisses nationales et communautaires, la présente étude prospective traite des projets d'infrastructures essentielles à l'économie nationale, qui permettraient au Luxembourg de relancer son économie et de renforcer sa résilience face aux perturbations et contraintes qui marquent notre temps. Passant en rubrique les infrastructures nationales essentielles passées et présentes, l'étude explore cinq trajectoires prospectives pour les futurs grands travaux d'importance économique nationale.

Compte tenu des investissements colossaux en infrastructures qu'entraînent les transitions vers un monde post-fossile, un nouveau type de questions stratégiques s'impose aux planificateurs et décideurs d'aujourd'hui : Comment assurer la construction et la maintenance d'infrastructures vitales dans un contexte de raréfaction matérielle, de plafond carbone et de contraintes budgétaires ? Comment construire, et reconstruire tous le 30 à

50 ans - quand les installations productrices d'énergie renouvelable de première génération arrivent en fin de vie - une nouvelle génération de ces installations ? Quelles priorités de constructions économiques dans un contexte de limitation de l'espace disponible et de compétition entre différents usages du foncier (résidentiel, sociales, ...), sachant que l'évolution démographique à long-terme est incertaine et que le Luxembourg vise à limiter l'artificialisation du sol ? Comment adapter les infrastructures aux cybermenaces et aux extrêmes climatiques ? Faut-il des lignes électriques enfouies pour les protéger de la canicule et des tempêtes, ou aériennes pour les mettre à l'abri des inondations ? Que faire chez soi, et que faire en concertation avec les pays voisins ou en Union européenne ? Dans quel choix d'infrastructures investir aujourd'hui pour ne pas s'exposer les générations futures aux infrastructures carbonées échouées ?

« *Looking back to see ahead* » : la **revue historique** des infrastructures depuis les origines de la nation luxembourgeoise montre leur place fondamentale dans la construction et le développement du pays, mais aussi la forte imbrication des infrastructures et de l'énergie, l'importance des connections transfrontalières et le rôle primordial des importations de matières premières pour la construction. Au Luxembourg comme ailleurs, le recul montre que les travaux connaissent de longues phases de conception. Leur exécution dépasse systématiquement et significativement les durées et les budgets prévus. Certains projets longtemps dans les cartons ont nécessité un cataclysme pour voir le jour. Tel est p.ex. le cas avec le **plan prospectif Marshall** de reconstruction de l'Europe après la 2^{ème} guerre mondiale. Il est à l'origine d'un sursaut infrastructurel résultant en travaux publics majeurs.

Le regard en arrière nous enseigne aussi que certains **travaux abandonnés ou rétrogradés** redeviennent intéressants à l'ère des transitions énergétiques, climatiques ou écologiques du XXI^{ème} siècle : extension des transports ferroviaires et fluviaux de fret, amélioration de la liaison ferroviaire Luxembourg-Bruxelles, achèvement de stations hydro-électriques non-réalisées après-guerre, raccordement au réseau européen de trains de nuits, renforcement de l'interconnexion électrique européenne, ...

Le contexte actuel montre aussi, qu'au-delà de la décarbonation de nos systèmes, les travaux publics du futur devront répondre à un **nouveau besoin vital**, celui de l'**adaptation et de la résilience des infrastructures** critiques, des populations et de l'appareil productif face aux adversités climatiques et environnementales, mais aussi face aux **menaces sécuritaires** qui pèsent sur les infrastructures économiques.

La sécurité économique dépend ainsi du degré de protection des infrastructures essentielles. La stratégie de **sécurité économique** de la Commission européenne de 2023 identifie **quatre grands types de risques de sécurité économique** :

- Les risques pour la résilience des chaînes d'approvisionnement et la sécurité énergétique ;
- Les risques pour la sécurité physique et la cybersécurité des infrastructures critiques ;
- Les risques liés à la sécurité technologique et aux fuites technologiques ; et
- Les risques de militarisation des dépendances économiques ou de coercition économique.

La **prospective** - l'étude des futurs plausibles - peut être une clé pour étudier des alternatives, identifier les risques et en déduire les projets d'infrastructures *future-fit*. Partant des **mégatendances** et **signaux faibles** actuels, pertinents pour le secteur de la construction, elle dresse les contours des conditions auxquelles pourraient faire face les infrastructures à long terme. Face aux défis historiques décrits plus haut, la prospective aide à préparer aux **risques émergents**.

La présente analyse vise un **horizon intergénérationnel d'anticipation allant jusqu'en 2100**, donc d'ici 75 ans ou 3 générations. Après tout, pour se protéger de l'eau, les Pays-Bas ou Singapour planifient ces infrastructures sur 100 ans. La Chine conçoit les installations de stockage d'énergie pour une durée de vie de 200 ans.

Pour l'économie et l'industrie luxembourgeoises, l'analyse retient les grandes **tendances** infrastructurelles pertinentes suivantes :

- Une vulnérabilité croissante des infrastructures face aux **risques biophysiques et sécuritaires**, dans un contexte de contraintes matérielles et énergétiques et d'interdépendance algorithmique globale ;
- Une prise de conscience de la nécessité **d'adapter les infrastructures vitales à la dérive climatique**, bien que les mesures prises restent largement en deçà des besoins anticipés. L'exposition des investissements et actifs aux dommages physique et économique est en général sous-estimée ;

- Une attente de la société pour des infrastructures transformatives, abordables, inclusives et fiables (ODD 9), socles de la cohésion sociale et de la **résilience civique** ;
- Un poids toujours plus grand de la construction d'infrastructures dans la **relance économique** tout en veillant à en réduire le coût unitaire, dans une conjoncture de taux d'intérêt et d'endettement croissants des Etats. Fonction et résilience avant ostentation et prestige ;
- Les matériaux de construction ne suivent plus. Les matières premières stratégiques pourraient constituer une limite à la décarbonation. Pour éviter des goulots d'étranglement et surpris lors de **l'approvisionnement en matériaux de construction**, il est nécessaire d'assurer préalablement et à long-terme la convergence entre offre et demande (**bouclage biophysique**) de ressources sous contraintes (métaux critiques, biomasse sous pression, électricité et ciment décarbonés, H₂ vert, sols, eau ...) ;
- La nécessité de réduire l'**empreinte matérielle et énergétique** des infrastructures, de construire sobrement et d'accroître la longévité des installations industrielles ;
- Le caractère de plus en plus stratégique des travaux publics, une sécurité de **planification** de plus en plus long-terme pour des efforts d'équipement de transition de plus en plus lourds, avec un impératif d'**hiérarchisation des infrastructures** à construire ou à maintenir, en fonction d'une part de leur pertinence transformationnelle et technique et d'autre part de leur utilité sociale ;

Partant de là, l'étude identifie les inconnues spécifiques au secteur de la construction au Luxembourg qui évoluent suivant le contexte. Comme elles sont nombreuses, la complexité est réduite en les regroupant schématiquement en quatre groupes de **bifurcations**, c. à d. des tendances dont l'évolution future est très incertaine. Ce sont ces bifurcations qui pourraient marquer particulièrement la direction que prendront les infrastructures économiques critiques au Luxembourg :

- **Risques systémiques anticipés ou non-anticipés ?**
 - Succès ou échec de l'adaptation aux menaces biophysiques par la **robustesse** et la **redondance infrastructurelles** ?
 - Protection des infrastructures face aux insécurités économiques et énergétiques, à la cyber-malveillance, à la fuite technologique - ou pas ?
 - Continuation de constructions basées sur les énergies fossiles (**actifs échoués**), dépendance de surcapacités infrastructurelles (*overbuild*) ou d'**Eléphants blancs** surdimensionnés - ou pas ?
 - Continuation de la couverture par les assurances des infrastructures non-résistantes au changement climatique - ou pas ?
- **Economie et démographie, boom or bust?**
 - Croissance ou étiolement **démographique** au Luxembourg ?
 - Continuation de l'augmentation de la consommation intérieure de **matières** - ou pas ?
 - **Saturation territoriale** et *Peak Infrastructure* au Luxembourg - ou pas ?
 - **Compétences** techniques et d'**ingénierie** nouvelles disponibles - ou pas. Compétition ou coopération entre Etats, régions, entreprises pour les talents et connaissances ?
- **Décentralisation ou centralisation** territoriale et géopolitique ?
 - Nationalisme et subsidiarité infrastructurels, ou mutualisation et dévolution de grands travaux au niveau européen ?
 - **Protectionnisme** national des ressources et chaînes de valeurs, installations et entreprises (*national-owned*) ou détention par des non-nationaux (*foreign-owned*) ?
 - **Cartellisation** globale des marchés de matières premières stratégiques, **course** aux ressources critiques et terres rares ou **coopération** internationale et accession de ces matières au statut de biens publics globaux ?

- Utilisation accrue des ressources présentes sur le **territoire** (topographie, matériaux, mines, géothermie...) en mode récupération et recyclage, *home-shoring* et *near-shoring*, ou continuation de la dépendance aux importations de ressources rares (sable, calcaire, terres rares et métaux critiques, bois ...) nécessaires à la construction ?
- **Continuité ou rupture technologique et industrielle ?**
 - Technologies éprouvées et commercialisées, ou rupture d'innovation, technologies non-encore inventées, spéculatives ou non-matures ?
 - Technicisation accélérée ou technologies anciennes revisitées car sobres en ressources (p.ex. transport ferroviaire et fluvial, ascenseurs à bateaux, solutions basées sur la nature, systèmes passifs ou analogues, *low tech*...) ?

Sur cette base, **cinq trajectoires hypothétiques de développement potentiel des infrastructures économiques à horizon 2100** sont esquissées pour le Luxembourg, en Grande Région et en Europe :

- Trajectoire T1 : Technosphère nationale circulaire et adaptée aux extrêmes climatiques,
- Trajectoire T2 : Mutualisation de méga-infrastructures en Europe,
- Trajectoire T3 : Virtualisation des infrastructures,
- Trajectoire T4 : Infrastructures échouées et carbone verrouillé,
- Trajectoire T5 : Micro-infrastructures décentralisées et résilience éclatée.

Trajectoire T1 : Technosphère nationale circulaire et adaptée aux extrêmes climatiques

Confronté à la montée des crises et des incertitudes, l'Etat renforce ses prérogatives et déclare le tissu bâti du pays comme un stock fini ayant atteint son étendue maximale. Des moyens conséquents sont mobilisés pour l'adapter aux perturbations environnementales. Il n'y aurait plus de prise nette de terre et de matériaux vierges, mais un recyclage et un entretien continus des constructions existantes. Un parc infrastructurel qui ne grandit plus en surface est plus facile à maintenir et à adapter aux intempéries et disruptions environnementales qu'un tissu bâti en constante extension. L'effort va donc dans l'adaptation de l'existant, la rénovation est rapide en ayant recours au high tech embarqué et au *low tech* revisité. Ces infrastructures adaptées du futur stockent du carbone et de l'eau et produisent plus d'énergie que ce qu'elles ne consomment. Elles résistent aux adversités et mettent à l'abri les personnes et les actifs.

Trajectoire T2 : Mutualisation de méga-infrastructures en Europe

Un *building boom* est en route pour réaliser la transition énergétique. L'interdépendance entre infrastructures critiques s'accroît à travers l'Europe. On accorde moins d'importance aux décisions nationales. De grandes infrastructures critiques et stratégiques (énergie, eau, communication, ...) sont modernisées, connectées, adaptées et construites de concert entre pays limitrophes (« Grande Région ») ou au niveau du continent, voire au-delà des frontières européennes. Pour réduire les coûts et rester compétitif, l'Europe mise massivement sur les économies d'énergie et la production locale. L'Europe profite de son étendue géographique et de ses atouts territoriaux pour produire l'énergie bas carbone là c'est le moins cher possible (p. ex. solaire au sud, éolien et hydro au nord du continent, géothermie partout). La bonne interconnexion du réseau européen d'électricité et de nouveaux câbles sous-marins permettent de dispatcher cette énergie à travers l'Europe vers les grands centres urbains et industriels de consommation. L'interconnexion des réseaux nationaux d'eau permet d'équilibrer entre régions déficitaires et excédentaires en eau. L'Europe réussit ainsi à sauvegarder son tissu industriel et devient exportatrice de technologies et d'infrastructures.

Trajectoire T3 : Virtualisation des infrastructures

Au croisement de la digitalisation, des technologies de la défense et de l'espace, les infrastructures sur Terre deviennent de plus en plus abstraites et virtuelles, avec la promesse de consommer moins de surfaces, matière, énergie et eau. Plutôt que construire une nouvelle centrale électrique, on optimise et balance les flux variables de production intermittente et de demande d'électricité pour éviter des pénuries. Plutôt que d'augmenter le nombre de propriétaires de voiture et de construire une nouvelle autoroute, la mobilité devient un service sur demande. L'usine du futur est connectée avec des assemblages optimisés en différents lieux. La digitalisation n'étant pas dématérialisée (datacenters, chips, serveurs, ordinateurs, climatiseurs, antennes, câbles, ...), les terres rares et les matériaux de construction proviennent de l'espace ou des fonds marins. L'économie algorithmique qui en résulte est très énergivore, mais procure de nouvelles recettes fiscales levées sur les données. Elle est aussi vulnérable aux cyber-attaques, ce qui verra l'avènement d'un marché de la défense, de la sécurité et des infrastructures « militarisées ».

Trajectoire T4 : Infrastructures échouées et carbone verrouillé

Le Luxembourg ne réussit pas à décarboner ses infrastructures, qui restent dépendantes des énergies fossiles importées, perdent en valeur et échouent (« *stranded assets* »). Le verrouillage carbone (*carbon lock-in*) fait référence à l'ensemble des technologies, infrastructures, institutions et normes qui sont incohérentes ou incompatibles avec un avenir à faibles émissions de carbone. Dans un dernier sursaut, l'industrie fossile pousse pour des infrastructures de *Carbon Capture Storage and Use* afin de pouvoir continuer à produire tout en maîtrisant les émissions. Sont concernés toutes les infrastructures liées directement aux énergies fossiles et tous les investissements dans ces énergies, que ce soit de la part d'investisseurs privés ou publics, de banques de la **place financière** ou des **fonds de pensions**, avec des pertes de revenus qui s'étendront sur les salariés, les fournisseurs et les bénéficiaires de transferts sociaux. Vu la densité énergétique des énergies fossiles, les retours sur investissement restent hauts pendant un moment. En fin de compte, les pertes risqueront d'être supportées par les gouvernements.

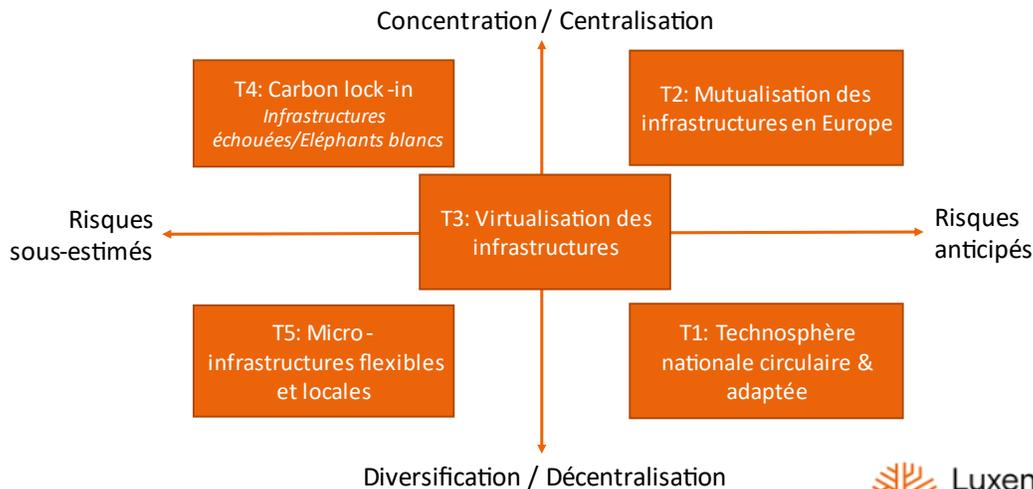
Trajectoire T5 : Micro-infrastructures décentralisées et résilience éclatée

Dans cette hypothèse, la planification transcontinentale des infrastructures est un échec et le niveau national s'évapore face aux défis. Le marché unique de l'énergie ne joue pas et les transferts d'électricité entre Etats membres de l'UE sont trop limités. Du coup, des entités décentralisées - communes, entreprises privées ou organisations citoyennes - prennent en main leur approvisionnement élémentaire et leurs infrastructures de base. Les ressources présentes sur le territoire (compétences et savoir-faire, eau, soleil, vent, topographie, sols et minerais, biomasse, géothermie...) sont conjuguées localement pour assurer une meilleure autonomie et efficacité énergétique, alimentaire, hydrique ou matérielle au bénéfice des communautés et des entreprises résidentes. Ceci peut se faire en dépit des initiatives nationales ou européennes, lentes et chères à mettre en oeuvre, ou en complément à celles-ci, *on-grid* ou *off-grid*. Cependant, ce système de *pro-sumers* et d'autosuffisance locale à lui seul ne génère pas assez de surplus pour maintenir une industrie lourde ou étendre les datacenters énergivores. Certains territoires se replient sur soi ou entrent en rapport de force. D'autres coopèrent en fonction des espaces de vie et des usages communs de ressources.

Pour avoir une vue d'ensemble, les cinq trajectoires peuvent être placées sur une **matrice 2x2** selon des bifurcations préalablement identifiées. Le comportement des trajectoires en fonction des circonstances qui se manifesteraient ou qui se combindraient est ainsi rendu plus explicite.

Dans l'exemple ci-contre, les axes représentent les deux bifurcations « risques anticipés/risques non-anticipés » et « centralisation/décentralisation ». La trajectoire T1 *Technosphère nationale circulaire et adaptée* serait robuste et adéquate dans un contexte d'anticipation des risques systémiques et d'affirmation de l'autorité centrale voire de subsidiarité (suffisance ?) nationale. La trajectoire T2 *Do something big* en Europe demande une planification supra-nationale et une coopération public-privé fortes, se heurtant aux prérogatives nationales. La trajectoire T4 *Infrastructures carbonées et échouées* sous-estimerait les risques et se manifesteraient par des grandes installations centralisées et non-régulées. Le localisme T5 promet plus de flexibilité, agilité et autonomie, mais risque de finir en îlots disparates vulnérables. Dans les 4 trajectoires, la digitalisation des infrastructures (T3) va de soi, à des doses variables en fonction de l'hypothèse.

5 trajectoires de développement possible d'infrastructures pour l'économie du Luxembourg



La note de cadrage permet de conclure que le Luxembourg est contraint dans ses choix d'infrastructures économiques décarbonées par les limitations matérielle et territoriale. Chaque décision d'investissements en infrastructure se révèle stratégique et sensible. Pour rendre les infrastructures vitales robustes face aux aléas climatiques et menaces économiques sécuritaires, l'anticipation, la prévoyance et l'arbitrage sont de mise. Les *Next Gen Infrastructures* devraient en outre :

- Intégrer la **résilience** à tous les échelons de gouvernance infrastructurelle – supranational, national, régional, communale, entrepreneuriale, et à travers tous les stades de projet, de la planification, à la sélection et au financement, jusqu'à l'exécution, l'utilisation, la maintenance et le démantèlement ou le recyclage de l'infrastructure ;
- Définir collectivement, en application de la directive CER, les **infrastructures critiques** et essentielles, en veillant à y intégrer les industries produisant de biens de base. Evaluer leur exposition aux dommages physiques et aux défaillances digitales et arrêter, d'ici 2026, une stratégie nationale pour améliorer leur résilience ;
- Prioriser les **constructions essentielles** à effectuer, à reconfigurer, à abandonner ou à mutualiser, sur le plan national et avec les régions et pays voisins. Il s'agit d'éviter d'investir dans des actifs échoués ou d'abandonner, par manque d'anticipation, des structures ou services encore utiles ou résistants au temps (p.ex. corridors de tram, lignes de trains de nuits, voies navigables...). **Maintenir l'état du patrimoine existant** et étendre sa durée de vie est dans ce contexte primordial ;
- Saisir l'opportunité d'une meilleure **intégration infrastructurelle européenne et intensification des co-constructions transfrontalières**. On pense à la gestion transfrontalière de l'eau et du bois, au raccordement du Luxembourg aux réseaux transeuropéens d'énergie (interconnexions, capacités de transfert d'électricité entre pays, stations de transmission, transformateurs, électrolyseurs, stockage...) et de logistique bas carbone (ferroviaire et fluviaux pour personnes (y compris trains de nuit) et fret (y compris train Luxembourg-Chine) ...), au risque de voir le pays enfermer dans une trajectoire de mobilité internationale intense en carbone (aérien, routier).
- Prévoir un **nouveau type d'infrastructure** qui est celui des **infrastructures adaptées aux disruptions environnementales et permettant à l'économie et à la société de s'y adapter**, en combinant :

- Les solutions **grises** (avec assistance énergétique : canaux, pompes, groupes électrogènes...) ;
 - Les solutions **vertes** (aussi appelées solutions fondées sur la nature, sans assistance énergétique : plaines d'inondation, zones humides, ventilation naturelle, restauration des milieux naturels...) ;
 - Les solutions **comportementales** (changement d'attitude par les usagers des infrastructures, baisse de la demande en énergies fossiles, décalage des heures de chargement de batteries, flexibilisation de la demande électrique...).
- Saisir la décarbonation et l'adaptation aux perturbations climatiques comme des opportunités pour **réindustrialiser et innover** (*clean tech, adaptation tech, nature tech, business-led adaptation*), **faire des affaires** (énergie, construction durable, assurances, certification, ingénierie, étude&conseil, monitoring environnemental...) et **gagner en autonomie** élémentaire (énergie, eau, alimentation, matériaux et produits de base...),
 - Anticiper les **nouvelles fonctions** « sécuritaires » à assurer à l'aide des infrastructures :
 - **Stockage** stratégique de l'énergie, de l'eau et des matériaux rares et essentiels
 - **Redondance infrastructurelle** et dédoublement de fonctions critiques.
 - **Cyber-résilience, souveraineté digitale** et infrastructures de sécurité économique
 - Anticiper mieux et plus long-terme les coûts et mobiliser des **budgets publics et privés additionnels** pour rendre les infrastructures productives et résilientes. Pour cela, mobiliser de nouveaux instruments et sources de financement conséquents est nécessaire.

Table des matières

Introduction : objectif, méthode et définitions	10
Objectif et méthode	10
Définition générale des termes « grands travaux, infrastructures et infrastructures critiques »	12
Définitions et critères retenus pour le cas du Luxembourg	13
Critère 1 : Fonction critique et intérêt général.....	14
Critère 2 : Budget et complexité.....	14
Critère 3 : Importance pour l'économie.....	15
Similitudes internationales et particularités nationales.....	16
I. Rétrospective : Petit pays et grands travaux, de l'indépendance à nos jours	18
1. De 1839 à 1945 : Le déploiement des réseaux de services publics.....	19
2. De 1945 à nos jours : L'ère des grands travaux infrastructurels	22
a. L'émergence de grands travaux.....	23
b. Les coûts liés aux grandes infrastructures essentielles à l'économie	24
3. Les grands travaux abandonnés ou démantelés	27
a. Les grands travaux abandonnés.....	27
b. Les infrastructures démantelées	34
4. Bilan de 185 ans de grands travaux : des infrastructures fondatrices et libératrices aux infrastructures de marché et de confort.....	37
II. Perspectives 2100 : Des mégatendances globales, aux tendances locales et aux signaux faibles.....	41
1. Polycrises, risques systémiques, économiques et bio-physiques.....	42
2. Les pertes économiques augmentant, l'adaptation climatique et les solutions fondées sur la nature gagnent en attention face à la décarbonation technologique	47
3. Infrastructures transformatives et <i>Social licence to operate</i>	51
4. Un rôle de plus en plus prégnant pour les infrastructures dans la relance économique	53
5. Sécurité d'approvisionnement en matériaux de construction	56
6. Emergence de nouvelles fonctions infrastructurelles : redondance et stockage	57
7. Infrastructures stratégiques et sécurité de planification	59
III. Prospective 2100 : trajectoires plausibles pour les infrastructures au Luxembourg	61
1. Incertitudes auxquelles font face les infrastructures au Luxembourg.....	61
2. Cinq trajectoires plausibles pour les infrastructures économiques au Luxembourg à horizon 2100.....	63
T1. Technosphère circulaire et adaptée aux extrêmes climatiques	64
T2. Mutualisation et massification de méga-infrastructures en Grande Région et en Europe	68
T3. Virtualisation des infrastructures	74
T4. Infrastructures échouées et carbone verrouillé	78
T5. Micro-infrastructures décentralisées et résilience locale.....	81
3. Matrice des 5 trajectoires de transition infrastructurelle pour le Luxembourg.....	84
IV. Annexes.....	86

Table des illustrations

Figure 1: Les infrastructures dans la Vision ECO2050, brique 5 de 10	11
Figure 2: Classification des grandes infrastructures selon secteurs, Global Infrastructure Hub, 2023	12
Figure 3: Les 12 secteurs critiques nationaux d'intérêt économique	14
Figure 4: Emploi total intérieur par secteur de 1870 - 1987	19
Figure 5: Évolution de la population résidente des grandes localités.....	19
Figure 6: Les réseaux de services suivant année de première inauguration	21
Figure 7: Evolution de la productivité par ouvrier (minerai de fer) et évolution du personnel des banques jusqu'à 1990	22
Figure 8: Les grands travaux réalisés et leurs équivalents monétaires théoriques en 2023 (M) = Plan Marshall	24
Figure 9: Comparaison du budget théorique des grands travaux réalisés versus événements <i>Black Swan</i> et grands travaux à venir	25
Figure 10: Plan du projet de canal de l'Ourthe, fin XIX ^{ème} siècle.....	27
Figure 11: Plan du canal entre la Moselle et la Chiers, 1908	28
Figure 12: Le projet des réseaux de stations hydro-électriques proposé en 1949	29
Figure 13: Le projet de la jonction ferroviaire Luxembourg-Sarre proposé en 1949.....	29
Figure 14: Le plan de la centrale nucléaire à deux réacteurs à Remerschen, années 1970.....	30
Figure 15: Réseau transfrontalier Air Liquide dans les années 1970	31
Figure 16: Proposition d'un tram régional Nordstad, 2007	32
Figure 17: Le réseau de chemin de fer nationaux des années 1930 versus les années 1970 versus la prévision 2035	34
Figure 18: Le tramway à Luxembourg-Ville des années 1930 versus 2023 versus la prévision 2035 (PNM2035)	35
Figure 19: Le <i>Minettstram</i> des années 1950.....	35
Figure 20: Les Hauts-fourneaux A et B, Esch-Belval.....	36
Figure 21: Démantèlement de la centrale turbine gaz-vapeur à Esch-sur-Alzette, 2017	36
Figure 22: Chronologie des grands travaux au Luxembourg de 1840 - 2040.....	38
Figure 23: Consommation finale d'énergie (en GWh) et décollage et atterrissage d'avions (en nombre d'avions).....	39
Figure 24: Différence entre risques physiques et risques de transition.	43
Figure 25: <i>Too little, too late climate scenarios</i> , EDHEC Infra, 2023	43
Figure 26: <i>European Climate Risk Assessment, Major risks for Infrastructures and the economy</i> , 2024.....	45
Figure 27: Matrice des risques biophysiques auxquels font face les entreprises luxembourgeoises, Etude RISK2050 (2023)	46
Figure 28: <i>Future carbon dioxide emissions of infrastructures</i>	47
Figure 29: Pertes économiques dues aux événements climatiques, OCDE 2024	48
Figure 30: Impacts sur les routes liés aux inondations au Luxembourg en 2018.....	49
Figure 31: Investissements en infrastructures des pays du G20 et leurs résultats transformateurs, 2022, selon InfraTracker	52
Figure 32: Luxembourg STABILITÉITSPROGRAMM 2023, volet investissements et infrastructures publics 2022-2026.....	55
Figure 33: Évolution annuelle de la Consommation Intérieure de Matières (CIM), Luxembourg, 2000 à 2022.....	56
Figure 34: Exemples de solutions infrastructurelles dédoublées ou passives, selon la Vision ECO2050	57
Figure 35: Exemple de protection des actifs par des solutions basées sur la nature, selon la Vision ECO2050	66
Figure 36: Exemple de <i>clean tech</i> devenu produit et savoir-faire d'exportation, selon la Vision ECO2050	67
Figure 37: <i>A conceptual plan of a European supergrid linking renewable energy projects</i>	69
Figure 38: <i>Interactive map of Projects of common interest & Projects of mutual interest</i> , EU CINEA	70
Figure 39: <i>Connecting Europe by Train</i> , CINEA 2024	71
Figure 40: <i>Important Projects of Common European Interest</i> (UE, IPCEI).....	71
Figure 41: Projets Hydrogène en Grande Région.....	72
Figure 42: <i>Wireless EV charging under development</i> (2023)	76
Figure 43: Schéma d'une centrale électrique virtuelle (<i>Virtual Power Plant, VPP</i>).....	76
Figure 44: <i>Internet of Things uses by industry</i>	77
Figure 45: Émissions sur l'ensemble du cycle de vie et durée de vie typique des infrastructures et des équipements	78
Figure 46: <i>Stranded fossil-fuel assets translate to major losses for investors in advanced economies</i>	79
Figure 47: <i>Decommissioned rig platforms, which had been hauled to a Scottish harbor</i> ,	80
Figure 48: <i>Distributed power systems (as opposed to centralised power systems)</i>	81
Figure 49: <i>Nutzungsoptionen von erneuerbaren Gasen</i>	82
Figure 50: Matrices d'interprétation des 5 trajectoires pour les infrastructures du Luxembourg d'ici 2100	85

Introduction : objectif, méthode et définitions

Objectif et méthode

Luxembourg Stratégie propose dans les pages qui suivent un panorama du chemin parcouru et à parcourir en termes de grands travaux d'importance économique nationale afin de contribuer à définir la prochaine génération d'infrastructures productives essentielles. Il s'agit d'abord de **faire voir** les infrastructures et matières, celles qu'on a tendance à ne percevoir que quand elles ne fonctionnent pas ou se font rares, et de donner un sens de leur importance vitale, souvent sous-estimée. Selon Dirk van Laak, nous avons une confiance profonde dans les infrastructures et leur fonctionnement. Nous imaginons mal ce qui se passerait si elles venaient à faire défaillance:

« Infrastrukturen sind ein Versprechen für die Zukunft.
Bei Ausfall läuft der Prozess der Zivilisierung rückwärts ».¹

Les infrastructures étant par nature long-terme et intenses en carbone, figeant de grands moyens financiers et matériels, il est en effet important d'avoir une bonne compréhension des enjeux pour éviter des **actifs échoués**, des mal-adaptations ou de l'opposition de la part de la population. En effet, sous-estimer les risques climatiques et environnementaux et les contraintes biophysiques revient à encourager l'inaction ou la continuation de la normale. Souvenons-nous p. ex. des années 70 du siècle dernier : si nous avons saisi le caractère annonciateur des crises du pétrole, nous n'aurions peut-être pas construit des maisons passoires, abandonné la recherche en énergies renouvelables ou déconstruit les trams et lignes de chemin de fer, que nous reconstruisons aujourd'hui à grands frais. L'attente d'un retour à la « normale » s'est avérée myope.

Il s'agit de faire en sorte à ce que les infrastructures continuent à garantir les services de base à la population et aux entreprises. Le *Global Infrastructure Hub* (GI Hub) du G20 appelle les gouvernements à investir dans la **transformation des infrastructures** afin qu'elles « répondent aux défis du changement climatique et de l'inégalité sociale ».² Un nouveau vocabulaire voit le jour : infrastructures verte – digitale – carbone – circulaire – régénérative – sobre – inclusive³ – résiliente – sûre – multifonctionnelle – évitée, infrastructures de gestion de catastrophes, de génération et stockage d'énergies renouvelables, solutions basées sur la nature, ...⁴

« Les infrastructures représentent un grand défi pour les gouvernements. D'abord parce qu'il faut décider dans lesquels investir. Ensuite par ce que les crises environnementales réduisent leur valeur dû au fait de la perte de recettes futures, perte elle-même résultant du ralentissement économique structurel suite à la chaleur chronique et à la cherté énergétique ».⁵

Cette note de cadrage prospectif cerne les aspects pour lesquels la compréhension gagnerait à être approfondie et dresse les contours des arbitrages nécessaires pour pouvoir définir les **next gen infrastructures**. Elle vise à caractériser les cycles passés et les acquis présents en matière infrastructurelle et à identifier les tendances lourdes futures qui influenceront le devenir des grands travaux publics d'importance économique nationale.

La note complète les travaux de la *Vision prospective stratégique ECO2050 pour une économie résiliente, inclusive et compétitive en 2050*, plus particulièrement sa brique 5, « Redondance infrastructurelle, stockage stratégique et solutions dédoublées » élaborée par Luxembourg Stratégie entre 2022 et 2023 (voir résumé ci-contre).⁶ Pour la méthode et les concepts de prospective utilisés à travers la présente étude, le lecteur est renvoyé vers le glossaire de la prospective de Luxembourg Stratégie.⁷

¹ Alles im Fluss, Dirk van Laak, 2018, p. 231 et 281

² We define transformative infrastructure as infrastructure that delivers transformative outcomes. Transformative outcomes go beyond economic development (e. g. job creation and economic growth) to have the greatest impacts on the most pressing global challenges, including the climate crisis, social inequality, adaptability, and resilience. Aspiring for transformative outcomes through infrastructure planning and investment is especially important during times of economic shock and uncertainty to ensure that these investments achieve the greatest benefits and 'bang for buck'. <https://infratracker.github.org/methodology#outcomes>

³ Global Infrastructure Hub (2019). "Inclusive Infrastructure". <https://inclusiveinfra.github.org/action-areas/stakeholder-identification-engagement-and-empowerment/>

⁴ Global Infrastructure Hub, 15.4.2021, The Role of Infrastructure in the Circular Economy, <https://cdn.github.org/umbraco/media/3889/gi-hub-thought-piece-infrastructure-and-the-circular-economy-apr-2021.pdf>

⁵ EDHEC Infra

⁶ Vision ECO2050, <https://luxstrategie.gouvernement.lu/fr/publicationsbis/rapport-vision-eco2050.html>

⁷ [Glossaire de la prospective](#), Luxembourg Stratégie, Ministère de l'Economie, 2023

Investir dans la redondance critique, le stockage stratégique et les solutions dédoublées afin d'assurer la continuité du fonctionnement de l'économie en toutes circonstances. Avoir des *backups* et des réserves permet d'affronter les ruptures d'approvisionnement, coupures d'électricité, volatilité des prix, fluctuations de demandes, fermeture de frontières, crises sanitaire ou géopolitique.

Les grandes infrastructures dont nous disposons ont largement été construites après la 2^{ème} guerre mondiale, à l'aide de l'énergie fossile et pour un climat clément et prévisible. La transition vers un régime post-fossile et un climat imprévisible poussent les installations à leur limite : le réseau d'électricité nécessite expansion et modernisation, des capacités de stockage des énergies intermittentes sont insuffisantes, les constructions ne sont pas conçues pour résister aux extrêmes climatiques, etc. Pour améliorer la résilience infrastructurelle et fonctionnelle, ECO2050 propose de :

1. Identifier et hiérarchiser, sur base du meilleur ratio coûts / bénéfices sociaux à long terme et de manière transfrontalière, participative et factuelle, les nouveaux besoins en infrastructures et services critiques (santé, manufacture, communication, sécurité, alimentation, énergie, eau, etc.).
2. Choisir la meilleure façon technique pour assurer cette résilience : redondance par dédoublement géographique ou technique d'une infrastructure (p. ex. station de potabilisation d'eau Esch-sur-Sûre), mise en réserve de pièces de rechange ou composants vitaux (p. ex. médicaments), construction de surcapacité, distribution de fonctions critiques à travers des réseaux physiques ou digitaux combinée au machine learning, augmentation de la robustesse infrastructurelle (*climate proof*), etc.
3. Concevoir des plans budgétisés de résilience économique face aux imprévus. L'étude RISK2050, que Luxembourg Stratégie a menée en collaboration avec l'Université du Luxembourg, a initié un premier pas dans cette direction. Elle analyse la vulnérabilité des entreprises face aux risques physiques que sont le changement climatique, la raréfaction des ressources naturelles et l'érosion de la biodiversité.



Figure 1: Les infrastructures dans la Vision ECO2050, brique 5 de 10⁸

L'avenir est celui qui se planifie aujourd'hui, sur base de connaissances du passé et à l'aide de la prospective à développer. Fidèle à son mot d'ordre *Rétrospective, Perspective, Prospective*, Luxembourg Stratégie se tourne d'abord vers l'histoire pour dévoiler « d'où nous venons ? », observe le présente pour acter « où nous en sommes ? », et se projette dans l'avenir pour explorer « où nous allons ? » en termes d'infrastructures économiques au Luxembourg.

Commençant à l'indépendance du pays en 1839, passant par la 2^{ème} guerre mondiale, pour couvrir l'horizon de planification actuel de grandes infrastructures, la note inventorie les grands travaux existants et en cours, en distinguant ceux réalisés, ceux abandonnés, ceux démantelés et ceux programmés. Les finalités, secteurs, budgets, périmètres ou populations concernés sont décrit, des cycles ou *patterns* (Muster) et le type de vision du monde ou les valeurs qu'ils reflètent, sont détectés.

L'analyse s'inscrit dans le cadre de l'Objectif du Développement Durable (ODD) n° 9 des Nations Unies, intitulé « **Bâtir une infrastructure résiliente, promouvoir une industrialisation durable qui profite à tous et encourager l'innovation** », et plus précisément sa cible 9.1. « Mettre en place une infrastructure de qualité, fiable, durable et résiliente, y compris une infrastructure régionale et transfrontière, pour favoriser le développement économique et le bien-être de l'être humain, en mettant l'accent sur un accès universel, à un coût abordable et dans des conditions d'équité ».



⁸ Vision ECO2050, <https://luxstrategie.gouvernement.lu/fr/publicationsbis/rapport-vision-eco2050.html>

Définition générale des termes « grands travaux, infrastructures et infrastructures critiques »

L'expression de **grands travaux** désigne généralement tous les grands chantiers liés aux projets d'infrastructures de grande envergure.⁹

Une définition commune du terme **infrastructure** comprend une construction, un ensemble d'installations (p.ex. routes, voies ferrées) ou un ensemble d'équipements nécessaires à une collectivité.¹⁰ L'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) décrit les infrastructures comme « complexes, s'inscrivent par nature dans le long terme et impliquent de nombreux risques et parties prenantes »¹¹ et catégorise les infrastructures en actifs économiques et actifs sociaux. Suivant la Banque mondiale, « investir dans des infrastructures durables permet de relier les gens aux opportunités, de promouvoir la croissance économique et d'améliorer les moyens de subsistance »¹². La Banque européenne d'investissement (BEI) confirme cette fonction centrale des infrastructures pour le développement de l'économie et précise que « le lien entre le climat, le développement et les infrastructures est indéniable ».¹³

Les secteurs public et privé¹⁴ suivent grosso modo les mêmes **classifications des grandes infrastructures**. En 2023, le Global Infrastructure Hub (GI Hub) du G20¹⁵ distingue, pour les 20 plus grandes économies du monde, les secteurs d'investissement infrastructurel suivants :

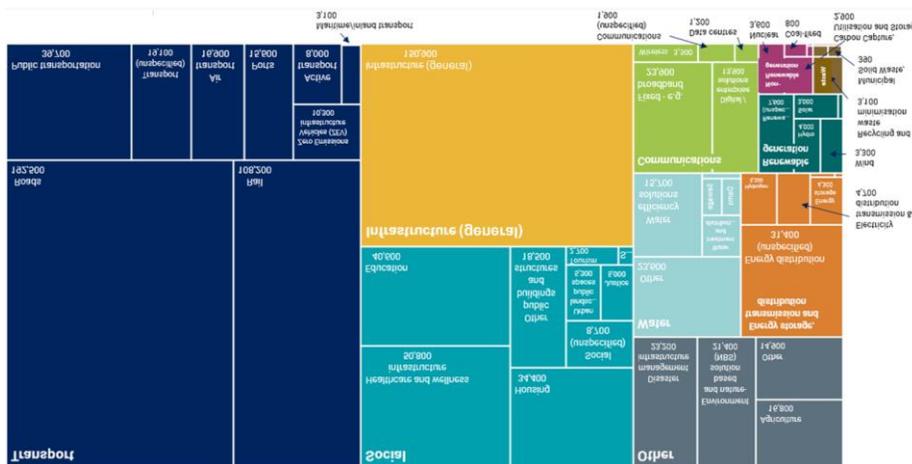


Figure 2: Classification des grandes infrastructures selon secteurs, Global Infrastructure Hub, 2023 ¹⁶

En général, les gouvernements sont les principaux **moteurs** d'investissement en infrastructures, excepté pour le secteur de l'énergie.¹⁷ Parmi les secteurs d'investissement, le GI Hub constate que dans les pays du G20, le **secteur public** investit massivement dans le transport (routes avant rail), suivi des infrastructures sociales (santé, bien-être...), et loin derrière les secteurs de l'énergie, des communications et de l'eau. L'attention du **secteur privé** est différente : il domine les investissements dans les énergies renouvelables, particulièrement l'éolien et le solaire.

⁹ Le terme « grands travaux » est paru dans les années 1980 en tant que nom informel du programme des grandes opérations d'architecture et d'urbanisme initié par l'ancien président de la République française François Mitterrand.

¹⁰ Définition du terme infrastructure suivant le dictionnaire [Larousse](#)

¹¹ Pour souligner le rôle important des infrastructures dans le développement économique d'un pays, l'OCDE a dédié sur son site une propre plateforme aux infrastructures. [OECD Infrastructure Platform](#)

¹² [La Banque mondiale](#) investit majoritairement dans les domaines *renewable energy and energy efficiency, sustainable transport* et *digital development* pour combler le déficit d'infrastructures et de créer un développement vert, résilient et inclusif. Elle donne un aperçu des projets réalisés sur son site web.

¹³ Les investissements dans des infrastructures sont suivant la [BEI](#) un domaine clé pour relever les défis mondiaux

¹⁴ EDHEC Infrastructure Institute (2022), [The Infrastructure Company Classification Standard \(TICCS\)](#), un standard commun de classification des infrastructures de l'industrie privée en 8 catégories - *power generation x-renewables, environmental services, social infrastructure, energy and water resources, data infrastructure, transport, renewable power, network utilities*

¹⁵ Les 20 **pays membres** sont l'Afrique du Sud, l'Allemagne, l'Arabie Saoudite, l'Argentine, l'Australie, le Brésil, le Canada, la Chine, la Corée du Sud, les Etats-Unis, la France, l'Inde, l'Indonésie, l'Italie, le Japon, le Mexique, le Royaume-Uni, la Russie, la Turquie et l'Union européenne.

¹⁶ <https://infrastructure.gihub.org/methodology#outcomes>

¹⁷ Suivant l'outil [Investment Tracker 2022](#) du [Global Infrastructure Hub](#)

Définitions et critères retenus pour le cas du Luxembourg

La présente étude met l'accent sur les travaux liés aux grandes **infrastructures critiques dont l'économie a besoin pour fonctionner** et qui ont été financées directement ou indirectement par des fonds publics. Cette définition comprend toutes les infrastructures de majeure envergure avec caractère vital pour le fonctionnement de l'économie (réseaux de communications et de transport, génération énergie, eau, matières, sites de production et d'assainissement...) Par conséquent, toute sorte d'infrastructures socio-culturelles et de santé (p.ex. hôpitaux, écoles, musées) ne sont pas couvertes, dans l'esprit de limiter le cadre de cette étude.

La sélection des infrastructures a été faite suivant 3 critères distincts : **fonction critique et intérêt général, budget et complexité, importance pour l'économie**

En général, les esprits sont divisés sur la définition d'une infrastructure critique : « People will always have different views on what is essential for society and what infrastructure to invest in ».¹⁸

Les **infrastructures critiques** sont des installations qui sont essentielles pour le maintien des fonctions sociétales vitales.¹⁹ Les dommages causés à une infrastructure critique d'un pays peuvent entraîner des conséquences sévères pour sa population.

La directive de l'UE sur la **résilience des entités critiques** (CER)²⁰ considère onze secteurs critiques, de l'eau, de l'alimentation, de l'énergie et des transports aux infrastructures numériques, marchés financiers et administration publique.²¹ Elle dresse la liste non-exhaustive suivante de services essentiels qui sont cruciaux pour le maintien de fonctions sociétales ou d'activités économiques vitales, à savoir :

- le secteur de l'énergie, qui comprend des services tels que la production d'électricité et le stockage d'énergie;
- le secteur des transports, qui englobe des services tels que la gestion et l'entretien des aéroports ou des infrastructures ferroviaires;
- le secteur bancaire, qui compte des services essentiels comme la réception de dépôts et les prêts;
- le secteur des infrastructures des marchés financiers, avec des services tels que l'exploitation d'une plate-forme de négociation et de systèmes de compensation;
- le secteur de la santé, qui recouvre notamment la fabrication et la distribution de médicaments ainsi que la fourniture de services de soins de santé et de services médicaux;
- le secteur de l'eau potable, qui inclut l'approvisionnement en eau potable et la distribution d'eau potable;
- le secteur des eaux résiduaires, dans lequel figurent les services de collecte, de traitement et d'évacuation des eaux usées;
- le secteur des infrastructures numériques, qui comprend des services tels que la fourniture et l'exploitation de services de points d'échange internet, le système de noms de domaine, les domaines de premier niveau, l'informatique en nuage et les centres de données;
- les services fournis par le secteur de l'administration publique;
- le secteur de l'espace, qui inclut les services d'exploitation d'infrastructures au sol;
- le secteur de la production, de la transformation et de la distribution de denrées alimentaires, dont font partie la production et la transformation industrielles à grande échelle de denrées alimentaires, les services de la chaîne d'approvisionnement alimentaire et les services de distribution en gros de denrées alimentaires.

Au Luxembourg, depuis sa création en 2016, le **Haut-Commissariat à la Protection Nationale** (HCPN) a pour mission la protection des infrastructures critiques nationales.²² Celles-ci peuvent « subir des dommages, faire l'objet d'interruptions ou encore être détruites par des actes terroristes délibérés ou par des catastrophes

¹⁸ Long-Term Infrastructure Investors Association (LTIIA), Lessons in infra investing – the longer-term view, Georg Inderst, July 2023

¹⁹ Définition suivant la [Commission européenne](#)

²⁰ Directive (UE) 2022/2557 du Parlement européen et du Conseil du 14 déc 2022 sur la résilience des entités critiques. Ci-après désignée par Directive CER pour *Critical Entities Resilience* (CER)

²¹ https://www.epc.eu/content/PDF/2024/Economic_Security_Discussion_Paper.pdf

²² Loi du 23 juillet 2016 portant création du HCPN.

naturelles, par négligence, accident ou piratage informatique, du fait d'activités criminelles ou d'actes de malveillance ».²³

Dans le cadre de la protection de infrastructures critiques contre des interventions d'investissements directs étrangers, le ministère de l'Économie a défini 12 secteurs critiques nationales : énergie, transport, eau, défense, agroalimentaire, télécoms, traitement des données, produits à double-usage, finance, médias, aérospatial, santé. Ce sont ces secteurs qui feront l'objet de cette note.

SECTEURS CRITIQUES



Figure 3: Les 12 secteurs critiques nationaux d'intérêt économique²⁴

Critère 1 : Fonction critique et intérêt général

La **fonction critique** de l'infrastructure pour l'économie nationale est un élément essentiel pour le choix des infrastructures retenues pour cette étude. Les 12 secteurs critiques nationales ont servi comme cadre pour identifier les infrastructures potentiellement concernées. La classification de leur niveau de fonction critique a été faite suivant le degré d'interconnexion avec d'autres systèmes critiques. Un degré d'interconnexion élevé est souvent un bon indicateur d'une infrastructure de fonction critique accrue.²⁵

La fonction critique et l'**intérêt général** d'une infrastructure vont souvent de pair. Cette étude se focalise sur les infrastructures d'intérêt général, financées direct ou indirect par des fonds publics.

Critère 2 : Budget et complexité

Avoir consacré un **budget** élevé, voir même **hors norme** pour la réalisation d'une infrastructure est un autre critère clé dans la sélection. La construction d'une infrastructure majeure implique souvent des interventions massives dans le paysage, réalisées par une multitude d'ouvriers. L'indicateur d'un tel budget hors norme se fait en comparaison avec le budget d'autres projets d'infrastructures d'une même époque. Aussi, la relation entre le budget accordé pour l'infrastructure et les dépenses totales du budget public de cette même année peut servir comme bon indicateur. Souvent, ces grands travaux ont été approuvés par une loi spécifiquement dédiée à la réalisation de ce projet, indiquant un budget maximal précis²⁶.

²³ Le [HCPN](#) a pour mission de protéger les infrastructures critiques telles que les centrales et les réseaux électriques, les oléoducs, les aéroports et les gares ferroviaires des risques mentionnés

²⁴ Ministère de l'Économie (2023), Mécanisme de filtrage des investissements directs étrangers, présentation du 18.07.2023

²⁵ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2015), [Vorsorgendes Risikomanagement in der Raumplanung](#), p.57

²⁶ La loi actuelle prévoit une loi de financement spécifique pour chaque projet immobilier public qui dépasse 60 millions euros.

La figure 6 reprend les budgets des projets retenus pour cette étude converti en budgets théoriques d'aujourd'hui. Le budget minimum pour un projet est de 164 millions d'euros. A noter que dans le budget national actuel, la plupart des investissements publics consiste en des projets dotés d'un budget supérieur à 40 moi EUR (voir chapitre II.4).

La **complexité** de la réalisation, qui est caractérisée par la technicité et l'envergure du projet, est un critère qui est fréquemment en lien avec le budget. L'indicateur utilisé pour mesurer la complexité est la durée totale – de la décision à la réception – du projet. Cette étude a retenu comme durée, une durée minimale de 3 ans comme critère de sélection.

Critère 3 : Importance pour l'économie

L'importance pour l'économie joue un rôle central dans la sélection des infrastructures. Ciblées sont ces grands travaux qui ont amélioré la situation générale de l'économie du pays. Souvent, ces infrastructures ont permis à une grande partie de l'économie nationale à d'abord s'approvisionner en matière de base, ensuite à fonctionner en cascades nationales pour enfin pouvoir accéder à conquérir de nouveaux marchés et à se connecter mieux avec le reste du monde pour s'orienter plus facilement vers les exportations et importations de marchandises et services. Ces infrastructures vitales pour l'économie, ont rendu le Luxembourg attractif envers d'autres pays et ont facilité l'attraction de talents, importante pour l'augmentation de la compétitivité de l'économie nationale.

Similitudes internationales et particularités nationales

Afin de mieux comprendre l'évolution des grands travaux il est essentiel de les placer dans leur contexte historique et de comprendre certaines particularités nationales.

La Basilique St Willibrord à Echternach construit au 11^{ème} siècle, le Château de Vianden érigé pendant la période du 11^{ème} au 14^{ème} siècle ou encore les Casemates du Bock à Luxembourg-Ville qui datent du 17^{ème} siècle ne sont que quelques exemples phares des premiers grands travaux au Luxembourg.

L'indépendance en 1839 et l'adhésion du Grand-Duché au **Zollverein en 1842**, qui a permis l'exploitation du minerai, marque le début d'une transformation économique du pays. Cette transformation est accélérée par l'utilisation systématique de la machine à vapeur, le remplacement du charbon de bois par le coke et les **premières lignes de chemin de fer à partir de 1859**.

L'époque de la **fin du XIX siècle** était surtout marquée par l'**esprit d'invention de certains pionniers** luxembourgeois comme Émile Metz qui a acheté la licence sur le procédé Thomas qui permettait de déphosphorer le minerai ou encore Henri Tudor avec son brevet « Nouveaux perfectionnements apportés aux électrodes des accumulateurs électriques » et la création du premier système d'éclairage électrique de 1886 à Echternach.

Après la 1^{ère} guerre mondiale et l'écroulement du Zollverein, la **fondation de l'Union économique belgo-luxembourgeoise (UEBL) en 1921** fut une étape importante pour le développement de l'économie nationale. Au lendemain de la 2^{ème} guerre mondiale, le Luxembourg faisait partie du **plan Marshall** et a été membre fondateur de la **Communauté européenne du charbon et de l'acier (CECA) en 1951**, précurseur de l'Union européenne. Ces deux événements ont constitué un facteur clé dans le développement de plusieurs grands travaux dont le Luxembourg profite encore aujourd'hui. Les **années 1970** étaient marquées par plusieurs crises, la **crise de la sidérurgie et les chocs pétroliers**, qui ont défavorisé des investissements de grande envergure dans les années à venir.

L'histoire récente du Luxembourg est marquée par le développement rapide de la **place financière**, l'approfondissement des efforts dans le domaine spatial ainsi que la **croissance dynamique de la population**. Le dernier phénomène a déclenché plusieurs grands travaux récents dans le domaine du transport et de la mobilité.²⁷

Bien que chaque infrastructure majeure ait eu sa propre légitimation, il est tout de même étonnant quel rôle prédominant a joué le contexte historique dans la prise de décision. Souvent une invention, un pionnier, une volonté politique ou simplement la chance ont déclenché des grands travaux dédiés à la création d'infrastructures. Ceux-ci sont en plus, souvent apparus en vagues successives et étaient fréquemment interconnectés de manière directe ou indirecte.

L'influence d'inventions, de brevets et de personnalités dans le déploiement d'infrastructures majeures au Luxembourg²⁸

- 1879 : **Rachat de la licence du procédé Thomas-Gilchrist** par Metz & Cie d'Eich (Émile Metz et Jean Meyer), qui permettait de déphosphorer le minerai.
- 1886 : Echternach, première ville en Europe à disposer d'un éclairage public électrique moyennant l'**accumulateur inventé par Henri Tudor**
- 1901 : Production de la **première poutrelle suivant le procédé Grey** par le laminoir de Differdange, initié par la **rencontre entre Paul Wurth et Henry Grey** en 1898, essentielle dans la construction de ponts et bâtiments de manière industrielle.

²⁷ La publication [À propos... de l'histoire du Luxembourg](#) du service information et presse du gouvernement luxembourgeois donne un aperçu plus détaillé de l'histoire et du développement économique du Luxembourg

²⁸ Informations recueillies dans : Le gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg (2011), [Les gouvernements du Grand-Duché de Luxembourg depuis 1848](#). Service information et presse ; Le gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg (2022), [À propos... de l'histoire du Luxembourg](#). Service information et presse ; Maquoi R. (2018), [L'épopée de la poutrelle Grey](#). Université de Liège

- 1908 : Le luxembourgeois **Gabriel Lippmann** obtient le prix Nobel en physique pour sa découverte de méthode qui permet de colorer des photographies.
- 1929 : La loi « sur le régime fiscal des sociétés de participations financières *Holding companies* » entre en vigueur. Cette loi forme la base pour le succès de la place financière à partir des années 1960, soutenu par la création de l'*Eurodollar* et des *Eurobonds*.
- 1977 : Début des activités spatiales avec **le premier rachat du Luxembourg de licences pour la mise en orbite de satellites** à la conférence mondiale de l'Espace. Lancement du premier **satellite Astra 1A de l'entreprise luxembourgeoise SES** en 1988. A cause de l'utilisation de la technique américaine, les satellites ont eu le surnom « Satellites Coca-Cola ».²⁹
- 1990 : La France, la République fédérale d'Allemagne et les pays du Benelux signent à Schengen l'**Accord de Schengen**, une convention sur la libre circulation des personnes, qui ouvre la voie à une Europe sans frontières.
- 2017 : La loi sur « **l'exploitation et l'utilisation des ressources de l'espace** » entre en vigueur et donne droit à récolter des ressources minérales dans l'espace. Le Luxembourg est le 2^{ème} pays au monde, après les Etats-Unis, ayant su adopter une telle loi.

²⁹ Anecdotes sur les satellites luxembourgeoises sur le site web [ASTRA](#)

I. Rétrospective : Petit pays et grands travaux, de l'indépendance à nos jours

Ce chapitre donne un aperçu des grands travaux réalisés, abandonnés ou démantelés au fil des années et des infrastructures programmées pour les années à venir. Il est séparé en 3 parties :

1. 1839 – 1945 : Le déploiement des réseaux de services
2. 1945 – 2023 : L'ère des grands travaux infrastructurels
3. 1839 – 2023 : Les projets abandonnés et les grands travaux démantelés au fil du temps

La première partie est structurée sous forme de texte récapitulatif, essayant d'illustrer de manière chronologique le début des grands travaux à partir de l'indépendance du Luxembourg.

Une annexe illustrative présente les grands travaux individuellement sous forme de fiche descriptive en indiquant les informations clé de chaque projet choisi suivant les critères définis au préalable au Chapitre 1.

La dernière partie résume les projets de grande envergure qui ont été abandonnés au cours de leur conception ainsi que les infrastructures démantelées.

Chaque partie est complétée par des photos illustratives qui visent à mettre en avant le contexte historique et l'envergure de ses grands travaux.

1. De 1839 à 1945 : Le déploiement des réseaux de services publics

Le début de cette époque a été fortement marqué par la 1^{ère} révolution industrielle et le passage d'une économie fondée sur l'agriculture vers une société industrielle et commerciale. En 1870, la distribution de l'emploi total intérieur des 3 secteurs porteurs – agriculture, industrie, commerce-transport-services – s'élevait à respectivement 60%, 21% et 19%. Dans les décennies suivantes, surtout le secteur de l'industrie, avec la sidérurgie comme principale force motrice, a connu un développement rapide. En 1935, la répartition de l'emploi dans les 3 secteurs s'élevait à respectivement 30%, 39% et 31% (voir fig. 4). L'extraction du minerai de fer, encore assez modeste en 1868 avec 722 000 t, a atteint son apogée à la fin des années 1920 avec une extraction constante d'environ 7 000 000 t par an.³⁰ Le pic dans le nombre d'ouvriers travaillant dans l'industrie sidérurgique et minière a été atteint en 1929 avec 29 000 ouvriers, ce qui représentait environ 10% de la population totale.³¹

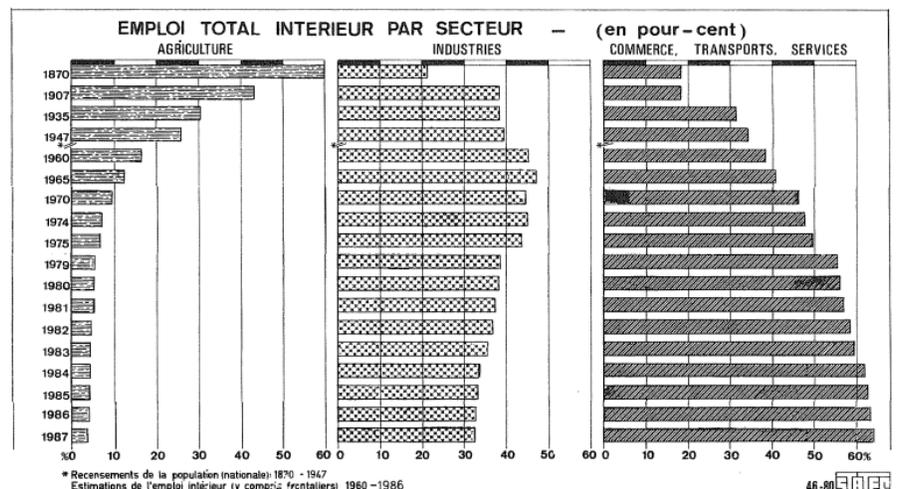


Figure 4: Emploi total intérieur par secteur de 1870 - 1987³²

Pendant cette même période, le nombre de la population a presque doublé, en passant de 170 000 en 1839 à presque 300 000 habitants avant la 2^{ème} guerre mondiale.³³ C'était aussi le moment du développement des premiers centres urbains, avec notamment Luxembourg-Ville, Esch-sur-Alzette et Dudelange.

Localité	Année				
	1851	1875	1900	1930	1947
Luxembourg	12 754	15 954	20 452	53 837	61 996
Esch-sur-Alzette	1 489	3 946	11 060	29 429	26 851
Dudelange	1 652	1 664	8 783	14 657	12 878
Differdange	1 198	1 257	3 432	8 903	7 427
Schifflange	600	971	1 198	5 456	5 077
Pétange	360	660	1 817	5 322	5 398
Ettelbruck	2 699	3 302	3 867	4 475	4 212
Bettembourg	735	1 073	1 704	4 587	4 455
Diekirch	2 846	3 127	3 779	3 858	3 793
Belvaux	363	530	859	2 712	2 562

Figure 5: Évolution de la population résidente des grandes localités³⁴

³⁰ STATEC (1990), [Statistiques historiques 1839 – 1989](#). Ministère de l'Economie, p.209

³¹ Ibid., p. 236

³² Ibid., p. 112

³³ Ibid., p.13

³⁴ Ibid., p.14

En même temps, la transition du Luxembourg d'une nation agricole vers une nation industrielle a augmenté la prospérité et la richesse du pays. Entre 1847 et 1940, les recettes du budget de l'Etat ont augmenté de 3 millions LUF à 460 millions LUF.³⁵

En termes d'infrastructure, l'époque entre l'indépendance et la 2^{ème} guerre mondiale marque le début du développement de nombreux **réseaux de services publics**, dont beaucoup sont encore aujourd'hui en utilisation. Le dynamisme et la création de richesse de cette période a partiellement eu lieu en interaction avec le développement de ces réseaux.

Les premières **routes** nationales, dont par exemple la N1 « Tréierer Strooss » qui relie Luxembourg par Wasserbillig avec Trèves, dans le sillon de ce qui fut la voie gallo-romaine Reims - Trèves, existent depuis 1843. L'administration des travaux publics, créée la même année, était et est encore toujours en charge de la maintenance de ces routes.³⁶ Aujourd'hui, le réseau compte 2 910 km de routes nationales.³⁷

« Lorsque, en 1839, le Luxembourg accéda à l'indépendance, il disposait d'un réseau routier fort modeste d'à peine 200 kilomètres de voies carrossables. Pour comble de mal, celles-ci se trouvaient pour la plupart dans un état pitoyable. Entrecoupées par des ponts écroulés, transformées en bourbiers infranchissables par la moindre averse, sillonnées de crevasses ou simplement trop étroites pour autoriser le passage de gros attelages, les quelques rares chaussées rendaient la circulation difficile, voire impossible. L'interruption du trafic pendant les longs mois d'hiver et les frais de transport exorbitants formaient un véritable goulot d'étranglement pour le développement de l'économie nationale. Pire encore l'absence de communications enfermait de nombreuses localités dans un isolement quasi complet. Tel un blocus, le délabrement de la voirie pesait lourd sur le destin du pays ».³⁸



Les deux premières lignes de **chemin de fer**, inauguré en 1859 ont connecté le Luxembourg avec la frontière française et belge. Ce mode de transport, utilisé pour le transport de personnes ainsi que pour le transport de marchandises, a connu un fort succès. Le réseau s'est développé rapidement et a atteint en 1929 son extension maximale à 400 km.³⁹

Le développement des villes et la population en croissance rapide, ont créé à partir des années 1850 une forte demande pour renforcer l'état de l'hygiène dans les villes. Ainsi, les premiers réseaux **d'eau potable** et de canalisation d'eaux ont été inaugurés en 1864 et 1880 à Luxembourg-Ville.⁴⁰ Il en allait de même avec la demande de l'énergie, dont le premier réseau de **gaz** souterrain a été construit en 1874.

À la suite de l'invention du **téléphone** dans les années 1870, le premier réseau téléphonique luxembourgeois s'étendant sur le territoire de la Ville de Luxembourg et de ses faubourgs a été mis en place en 1885.⁴¹ Un an plus tard, Echternach devient la première ville en Europe à disposer d'un **éclairage public** électrique, grâce à l'invention de l'accumulateur par le luxembourgeois Henri Tudor. Par la suite, le **réseau électrique** s'est développé dans d'autres villes comme à Luxembourg-Ville en 1888 et à Esch-sur-Alzette en 1900.⁴² Ce réseau est aujourd'hui l'un des plus développés du pays, avec une longueur totale de 10 400 km.

Le développement rapide de l'électrification a permis de remplacer en 1908 le **tramway hippomobile**, utilisé depuis 1875 comme mode de connexion entre la gare du Luxembourg et la Ville Haute, par un **tramway électrique**. En 1927, le « Minettstram », qui a relié Esch-sur-Alzette et les villes alentour, a vu le jour.⁴³ Ce mode de transport

³⁵ Ibid., p. 362

³⁶ Article et vidéo du 175^{ème} anniversaire de [l'Administration des ponts et chaussés](#) (2018)

³⁷ Voir ci-contre photo publiée lors du 175^{ème} anniversaire de [l'Administration des ponts et chaussés](#)

³⁸ Plus d'infos sur l'histoire du réseau routier national sont disponible sur le site de [l'Administration des ponts et chaussés](#)

³⁹ STATEC (1990), [Statistiques historiques 1839 – 1989](#). Ministère de l'Economie, p.294

⁴⁰ Un historique détaillé sur les débuts de l'approvisionnement en eau donne l'article de Reitz J. (2020), [Die Wasserversorgung Luxemburgs](#), forum nr. 409 ainsi que le document [ECOLOGIQUE](#) (2011) de la Ville de Luxembourg

⁴¹ Le gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg (2011), [Les gouvernements du Grand-Duché de Luxembourg depuis 1848](#). Service information et presse , p.47

⁴² L'article de la société CREOS, gestionnaire de réseaux d'électricité et de gaz naturel au Luxembourg, résume les étapes clés du développement du premier réseau d'électricité au Luxembourg. Creonews (2011), [1886-1928: Entstehung eines „Phänomens“ bis zur Errichtung des Stromnetzes](#)

⁴³ Bohnert p. et al. (2009), [Minettstram fréier an haut](#), Association Bus 34

interurbain a connu un grand succès, facilitant la mobilité entre ces villes en forte croissance démographique. Le réseau total des deux tramways électriques s'est étendu sur 80 km entre les années 1930 et 1950.

Inauguration (Fermeture)	Type de réseau	Réseau en 2023	Extension max.
1843	Route	2 910 km	réseau actuel
1859	Chemin de fer	271 km	500 km en 1948
1864	Eau potable	n.c.	réseau actuel
1874	Gaz	2 200 km	réseau actuel
1875 (1908)	Tramway hippomobile	0 km	3 km en 1875
1880	Canalisation eaux	n.c.	réseau actuel
1885	Téléphonie	30 700 km	réseau actuel
1886	Electricité	10 400 km	réseau actuel
1886	Eclairage public électrique	3 000 km	réseau actuel
1908 (1964)	Tramway électrique (Lux-Ville)	16 km	30 km en 1930
1927 (1956)	Tramway électrique (Esch)	0 km	50 km en 1950

Figure 6: Les réseaux de services suivant année de première inauguration⁴⁴

⁴⁴ Voir annexe 1 pour plus de détails

2. De 1945 à nos jours : L'ère des grands travaux infrastructurels

« La Libération trouvait un Grand-Duché en ruines. Surtout les contrées septentrionales du pays avaient été ravagées par les violents combats de la Bataille des Ardennes qui avaient laissé de nombreux immeubles détruits ou fortement endommagés, plus de cent ponts dynamités et un réseau routier inutilisable à cause des entonnoirs creusés par les obus. Autant dire qu'à peu de choses près, **tout était à refaire.** »⁴⁵

L'économie du Luxembourg après la 2^{ème} guerre mondiale a été marquée par plusieurs périodes clés, dont notamment la reconstruction du pays, la relance de l'économie et la mise en œuvre d'une partie des projets rassemblés sous le plan Marshall dans les années 1950, le développement de l'industrie sidérurgique et son déclin brutal fin des années 1970, l'émergence et le développement de la place financière et des institutions européennes à partir des années 1970 ainsi que le développement des nouvelles technologies de l'information et de la communication, classifié comme la 3^{ème} révolution industrielle, à la fin du XX^{ème} siècle jusqu'à aujourd'hui.

Après 1945, le déclin du secteur de l'agriculture a été accéléré par le succès de l'industrie, surtout favorisé par des gains de productivité énormes dans la sidérurgie et par l'émergence de la place financière (voir fig. 7). En 1946 fut créé la Commission nationale des économies et de la rationalisation afin de réduire les dépenses de fonctionnement de l'Etat. En 1947 la distribution de l'emploi total intérieur des 3 secteurs - agriculture, industrie, commerce-transport-services - s'élevait à respectivement 25%, 40% et 35% et en 1975 à 8%, 42% et 50% (voir fig. 4).

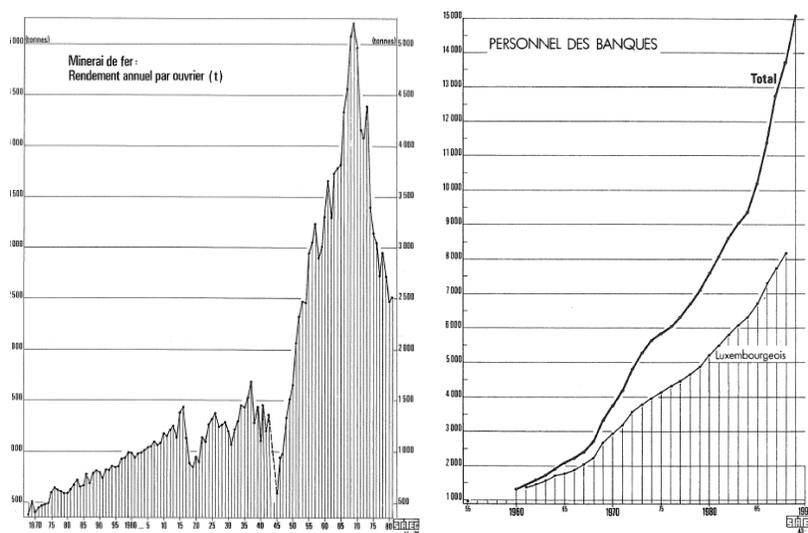


Figure 7: Evolution de la productivité par ouvrier (minerai de fer) et évolution du personnel des banques jusqu'à 1990⁴⁶

La crise de la sidérurgie à la fin des années 1970 a en même temps marqué le début du déclin du secteur de l'industrie. Par la suite, l'économie du Luxembourg s'est transformée principalement dans une économie de services. Aujourd'hui, la distribution de l'emploi entre le secteur de l'agriculture, de l'industrie (y inclus la construction) et du reste de l'économie (principalement des services) s'élève à 4%, 17%, 79%.⁴⁷

⁴⁵ Description de la situation après-guerre par [l'Administration des ponts et chaussés](#). Un rapport détaillé de la situation après-guerre ainsi que des coûts de la reconstruction a été publié par Jos Schroeder, commissaire général à la reconstruction, au [bulletin d'information numéro 10 de l'année 1946](#). Sur un total de 58 000 immeubles sur le territoire luxembourgeois en 1935, environ 18 000 immeubles ont été endommagés ou détruits lors de la guerre.

⁴⁶ STATEC (1990), [Statistiques historiques 1839 - 1989](#). Ministère de l'Economie, p.211 et p.345

⁴⁷ STATEC (2023), [Edition 2023 - Le Luxembourg en Chiffres](#), p.19

Pendant cette même période, la population a plus que doublé, en passant de 290 000 après la 2^{ème} guerre mondiale à 440 000 en 2001 et à 660 000 en 2023. En outre, s'y ajoute le nombre de frontaliers qui compte aujourd'hui 214 000 personnes.⁴⁸

a. L'émergence de grands travaux

À partir de 1945, le Luxembourg a commencé à investir dans des infrastructures de grande envergure ponctuelles, ceci notamment pour suivre le rythme du développement de la population et aussi afin d'améliorer le service public dans les domaines du transport et de la mobilité, de l'énergie et de l'approvisionnement de l'eau. Les travaux pour professionnaliser l'aéroport du Findel, déjà décidé en 1937, ont pu être terminés après la guerre. Ceci a marqué un moment important pour le développement des relations économiques avec des pays plus éloignés.

Dans le cadre du **plan Marshall**, le Luxembourg a proposé en 1949 tout un tas de projets nationaux ayant des chances d'être financés.⁴⁹ À cette époque, suite à l'évolution de l'électrification, le Luxembourg disposait même d'un **Ministre de l'Électricité**. Ces projets concernaient principalement l'électrification du pays, la construction de plusieurs stations hydro-électriques et la canalisation de la Moselle. Même si pas tous ces projets ont été réalisés, l'approche d'une **planification structurée des infrastructures** requises pour réaliser une transition énergétique vers l'électricité peut servir comme source d'inspiration pour les défis d'aujourd'hui.

« Marshall wanted to bring the same culture of planning for decision-making while setting up a new "policy planning" team. He succeeded there too: Marshall's new team would be instrumental in designing the Marshall Plan to rebuild Europe and in laying the groundwork of what are today NATO and the OECD. »⁵⁰

Dans les années 1960, la canalisation de la Moselle et le port de Mertert en 1964, la centrale hydroélectrique à Stolzembourg en 1964 (non-reliée au réseau électrique luxembourgeois) et le barrage et la station d'approvisionnement en eau potable en 1969 ont finalement été réalisés. Le dernier projet, une des infrastructures les plus marquantes au Luxembourg, a pris une durée remarquablement longue de 16 ans du moment de la décision à la finalisation des travaux.

« Die **Wasserenergie** wurde letztendlich eine immer attraktive erscheinende Ausweichmöglichkeit, die nicht von den Kohlepreisen abhängig war. Robert Schaffner, Minister für Elektrizität, hatte ebenfalls erkannt, dass der Bau von Wasserkraftwerken eine Möglichkeit war, unabhängiger von fossilen Energieträgern zu werden. (...) Das Interesse an einer hydraulischen Energieproduktion rührte auch daher, dass der amerikanische Marshall-Plan die Ausnutzung der in Europa noch nicht viel verwendeten Wasserenergie entscheidend förderte. »⁵¹

À la suite de la crise nationale de la sidérurgie et le réajustement de l'économie fin des années 1970, les investissements dédiés aux grands travaux étaient assez rares fin du 20^{ème} siècle. L'attention principale pendant cette époque était portée sur le développement massif des réseaux de services (routes, téléphonie, électrification, ...).

La forte croissance de la population et des frontaliers dans les dernières 20 années a entraîné un besoin pour améliorer les infrastructures de la mobilité. Ceci est aussi démontré par les derniers grands travaux réalisés, notamment l'autoroute A7 « Nordstrooss » finalisée en 2015 ou encore le tramway de Luxembourg-Ville, dont le premier tronçon a été inauguré en 2017.

Les prochaines infrastructures majeures planifiées, dont le réseau électrique 380 kV, le tramway rapide et corridor multimodal entre Luxembourg-Ville et Esch-sur-Alzette ou encore le réseau transfrontalier d'hydrogène *vert* MoSaHYc, sont toutes liées soit à la mobilité, soit à l'énergie.

⁴⁸ Ibid., p.18

⁴⁹ Le Ministère d'Etat du Luxembourg a publié dans l'édition spéciale de son bulletin d'information « [Le Grand-Duché de Luxembourg et le plan Marshall](#) » (no.2 de l'année 1949) toute une série d'informations sur l'origine et l'accord du plan Marshall. Le chapitre 2 du bulletin décrit le rééquipement et la modernisation de l'industrie luxembourgeoise et propose des projets nationaux concrets.

⁵⁰ "Don't fight the future, decide it!", Ruben Erik Diaz-Plaja, Joshua Polchar, 13.12.2023

⁵¹ Scholer (2012), [Die Gründung der Société électrique de l'Our und ihre Rolle als europäisches Gemeinschaftswerk](#), p.67

b. Les coûts liés aux grandes infrastructures essentielles à l'économie

Les investissements liés aux grands travaux demandent en général un budget important. La loi du 8 juin 1999 sur le Budget, la Comptabilité et la Trésorerie de l'Etat, prévoit une loi de financement spécifique pour chaque projet immobilier public qui dépasse un certain budget. Ce montant est actuellement fixé à 60 millions d'euros.⁵²

Le tableau ci-dessous (figure 6) regroupe les grands travaux réalisés et indique l'année de décision ainsi que le budget accordé par projet en francs luxembourgeois (LUF) ou en euros (EUR). Ce budget est mis en comparaison avec les dépenses totales du budget public de l'année en question, indiquant l'impact financier en % sur le budget public de ladite année. Les projets figurant dans le **plan Marshall sont marqués avec un (M)**.

Le **budget « théorique » dans l'année 2023** estime l'impact financier d'aujourd'hui en supposant que la réalisation du projet prendra en charge le même % des dépenses totales du budget 2023. Cette approche nous permet de réaliser une comparaison de l'impact financier des grands travaux de différentes époques. Il faut cependant mentionner que cette méthode est bien simplifiée et suppose une composition similaire des dépenses du budget dans le temps.

	Findel (M)	Barrage et SEBES (M)	Canal, Moselle et Port (M)	SEO (M)	Autoroute A7	Tramway et Fun.	Terminal intermodal
année de décision	1937	1953	1956	1958	1997	2014	2014
	Luxembourg	Esch-sur Sûre	Mertert	Stolzembourg	Lux <-> Schieren	Luxembourg	Bettembourg
Budget du projet	10 000 000 LUF	600 000 000 LUF	29 000 000 LUF	200 000 000 LUF	14 800 000 000 LUF	526 780 000 EUR	221 000 000 EUR
Budget de l'Etat (année de décision)	330 936 00 LUF	4 292 961 000 LUF	4 635 000 000 LUF	5 561 000 000 LUF	170 413 370 000 LUF	14 762 600 000 EUR	14 762 600 000 EUR
en % du Budget	3.0%	14.0%	0.6%	3.6%	8.7%	3.6%	1.5%
Budget "théorique" dans l'année 2023	793 000 000 EUR	3 666 000 000 EUR	164 000 000 EUR	945 000 000 EUR	2 280 000 000 EUR	935 000 000 EUR	393 000 000 EUR
Budget de l'Etat 2023: 26 243 372 000 EUR							

Figure 8: Les grands travaux réalisés et leurs équivalents monétaires théoriques en 2023⁵³ (M) = Plan Marshall

La figure 7 fait une comparaison entre les budgets « théoriques » dans l'année 2023 des grands travaux réalisés, les coûts des événements *Black Swan* récents et les budgets des grands travaux à venir. Ceci permet de mieux évaluer les impacts financiers des infrastructures majeures déjà réalisées et de les comparer à la mobilisation rapide des ressources financières pour des événements imprévisibles. En outre, le graphique facilite l'évaluation de l'impact financier des grands travaux à venir.

Le terme *Black Swan* désigne un événement imprévisible qui a une faible probabilité de se dérouler mais qui, s'il se réalise, entraîne des conséquences sévères et exceptionnelles.⁵⁴ Il faut cependant mentionner que les 3 événements *Black Swan* récents ne sont pas au même niveau. Alors qu'il est discutable de qualifier les inondations survenues en 2021 en Belgique, Allemagne et au Luxembourg de *Black Swan* par leur occurrence (les rapports GIEC les annoncent), leur envergure (crue centennale) et les dommages causés peuvent être considérés de surprise totale. Cependant, surtout la pandémie Covid-19 a pris de revers le monde entier.

⁵² Loi du 1er février 2023 portant modification de l'article 80 de la loi du 8 juin 1999 sur le Budget, la Comptabilité et la Trésorerie de l'État

⁵³ Budgets des projets suivant les lois d'investissement correspondantes

⁵⁴ [Glossaire de la prospective](#), Luxembourg Stratégie, Ministère de l'Economie, 2023

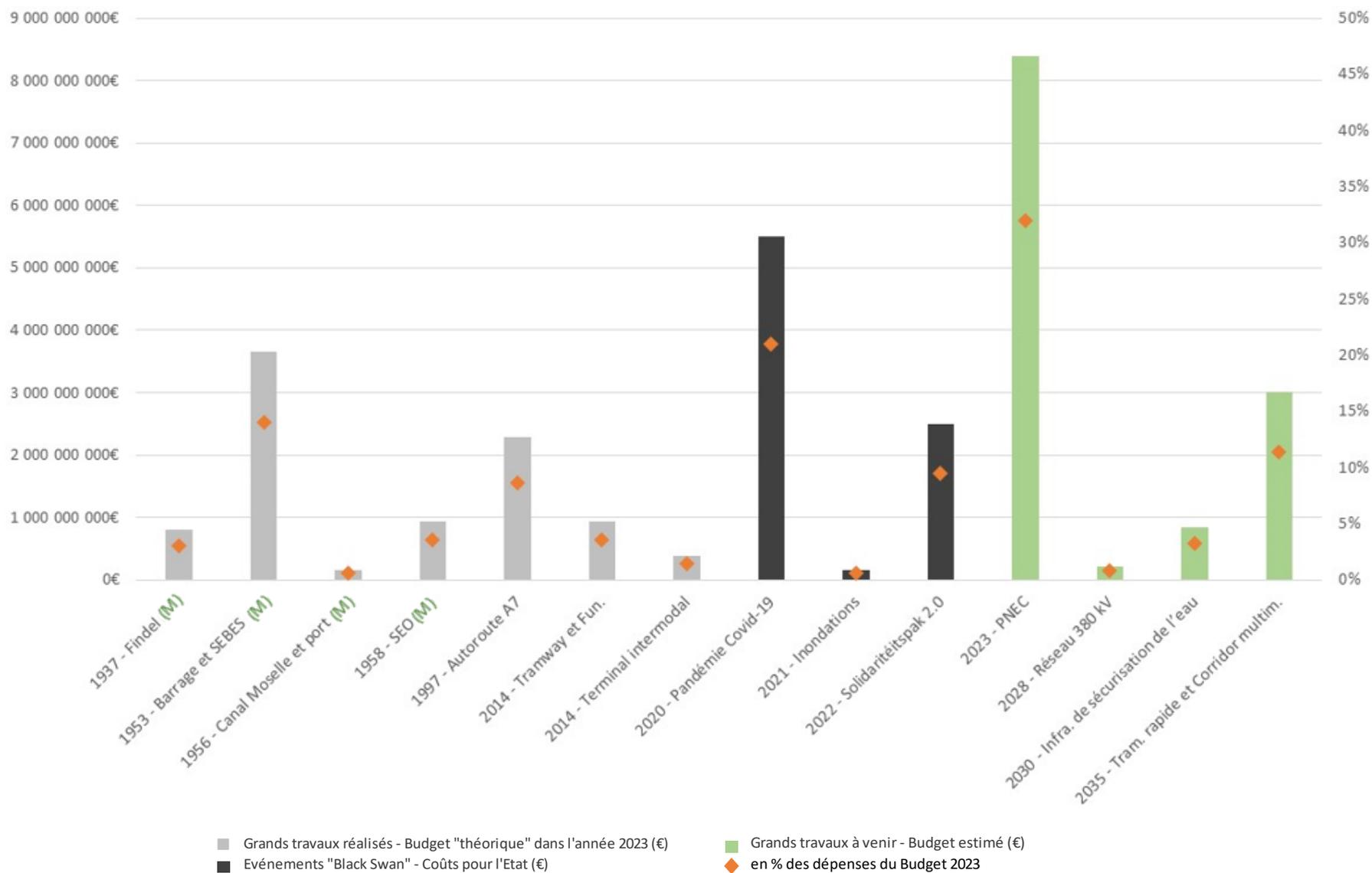


Figure 9: Comparaison du budget théorique des grands travaux réalisés versus événements *Black Swan* et grands travaux à venir ((M) = Plan Marshall) (voir Annexe 1 pour plus de détails)

Les coûts liés à la pandémie Covid-19 sont par exemple équivalents aux budgets communs destinés à la réalisation de la SEO, l'autoroute A7, le tramway à Luxembourg-Ville et le terminal intermodal à Bettembourg. Les coûts des inondations sévères en 2021 sont comparables à la création du futur réseau électrique 380 kV, un projet clé pour la sécurité électrique du pays. Les coûts du *Solidaritétspak* 2.0, principalement dédié à diminuer les effets des fortes augmentations des prix énergétiques, sont comparables aux frais de réalisation d'un tramway rapide ainsi qu'un corridor multimodal entre Luxembourg-Ville et Esch-sur-Alzette.

La **programmation nationale en cours (2023 -2040)** d'infrastructures majeures à incidence économique concernent les secteurs de l'énergie, du climat, de l'eau et des transports en commun. Le mouvement des personnes, des matières et des biens ayant été une préoccupation constante du pays, la décarbonation mais aussi le **retour des grandes infrastructures de sécurisation de l'eau** sont les faits marquants du XXIème siècle. Ainsi, le Luxembourg rattrape son retard en infrastructures de gestion de l'eau causé par une population galopante, par le renforcement de sa capacité de production et de distribution d'eau potable et de traitement des eaux usées.

L'Etat et le Syndicat des eaux du barrage d'Esch-sur-Sûre (SEBES) ont investi dans l'extension et la modernisation de la station d'**approvisionnement et de potabilisation de l'eau** (mise en service en 2023, coût est. 207 Mio EUR).⁵⁵ Plusieurs constructions et extensions de stations de **traitement et d'épuration des eaux usées** (STEP) sont entreprises : à Bleesbruck⁵⁶ (inaugurée en 2018, coût 81 Mio EUR), à Grevenmacher⁵⁷ (inaugurée en 2018, coût 124 Mio EUR), à Uebersyren⁵⁸ (mise en service prévue pour 2029, coût est. 130 Mio EUR), et enfin à Beggen⁵⁹ (mise en service prévue pour 2030, coût est. 300 Mio EUR). Le coût total prévisionnel de ces investissements dans la gestion de l'eau s'élèverait ainsi à 842 Mio EUR (2018 – 2030).

Pour ce qui est de la décarbonation, les investissements nécessaires pour mettre en œuvre le **Plan National intégré en matière d'Énergie et de Climat** (PNEC 2023-2030) sont estimés à 8,3 milliards EUR jusqu'à 2030 (soit env. 1 milliard EUR par an, ce qui représente environ 2% du PIB annuel). C'est donc la décarbonation qui entre dans l'histoire de 200 ans de grands travaux du Luxembourg comme étant le projet au plus fort budget.

⁵⁵ <https://paperjam.lu/article/sebes-va-obtenir-rallonge-budg> ; <https://www.corporatenews.lu/fr/archives-shortcut/archives/article/2023/06/inauguration-de-la-nouvelle-station-de-traitement-d-eau-a-eschdorf?author=SEBES>

⁵⁶ <https://www.siden.lu/bleesbruck>

⁵⁷ https://gouvernement.lu/de/actualites/toutes_actualites/communiques/2018/09-septembre/28-bausch-station-epuration.html

⁵⁸ <https://www.wort.lu/luxemburg/flugzeug-enteisungsmittel-soll-nicht-mehr-in-die-syr-laufen/2354758.html>

⁵⁹ https://www.vdl.lu/sites/default/files/media/document/10466_VDL_Broch_CSEB_FR_Planches_WEB.pdf

3. Les grands travaux abandonnés ou démantelés

Cette partie est divisée en deux chapitres et traite d'un côté les grands travaux qui ont été abandonnés lors du processus de planification et d'autre côté les infrastructures qui ont été réalisées, mais cependant démantelées au fil du temps. Les raisons pour les deux cas de figure sont souvent similaires, dont notamment l'aspect financier ou encore des intérêts divergents même avant ou lors de l'utilisation de l'infrastructure.

Les différents projets sont présentés ci-après au cas par cas.

a. Les grands travaux abandonnés

Canal de l'Ourthe à la Moselle⁶⁰

En 1866, le **canal de l'Ourthe**, un projet colossal destiné à relier par voie d'eau la Meuse en Belgique et la Moselle au Luxembourg, a été abandonné en faveur de la construction d'une ligne de chemin de fer.



Figure 10: Plan du projet de canal de l'Ourthe, fin XIX^{ème} siècle

⁶⁰ Cellule de coordination du contrat de rivière Ourthe (2018), [Canal de l'Ourthe vs Canal Meuse-Moselle](#), Itinéraire au fil de l'eau – à la découverte des projets de navigation entre Liège et le Luxembourg

Canal du Grand-Duché, de la Moselle à la Chiers⁶¹

En 1908 furent dessinés les plans pour un canal luxembourgeois de 51 km de long, reliant la Moselle à la Chiers, et connectant au-delà les réseaux des canaux allemands et français. L'objectif était d'échanger du minerai de fer et du charbon et coke entre la Minette et la Ruhr allemande. Les coûts du projet, le peu d'enthousiasme de l'industrie sidérurgique allemande et la concurrence au chemin de fer auraient rendu ce projet caduc. Il a été abandonné pendant la première guerre mondiale.

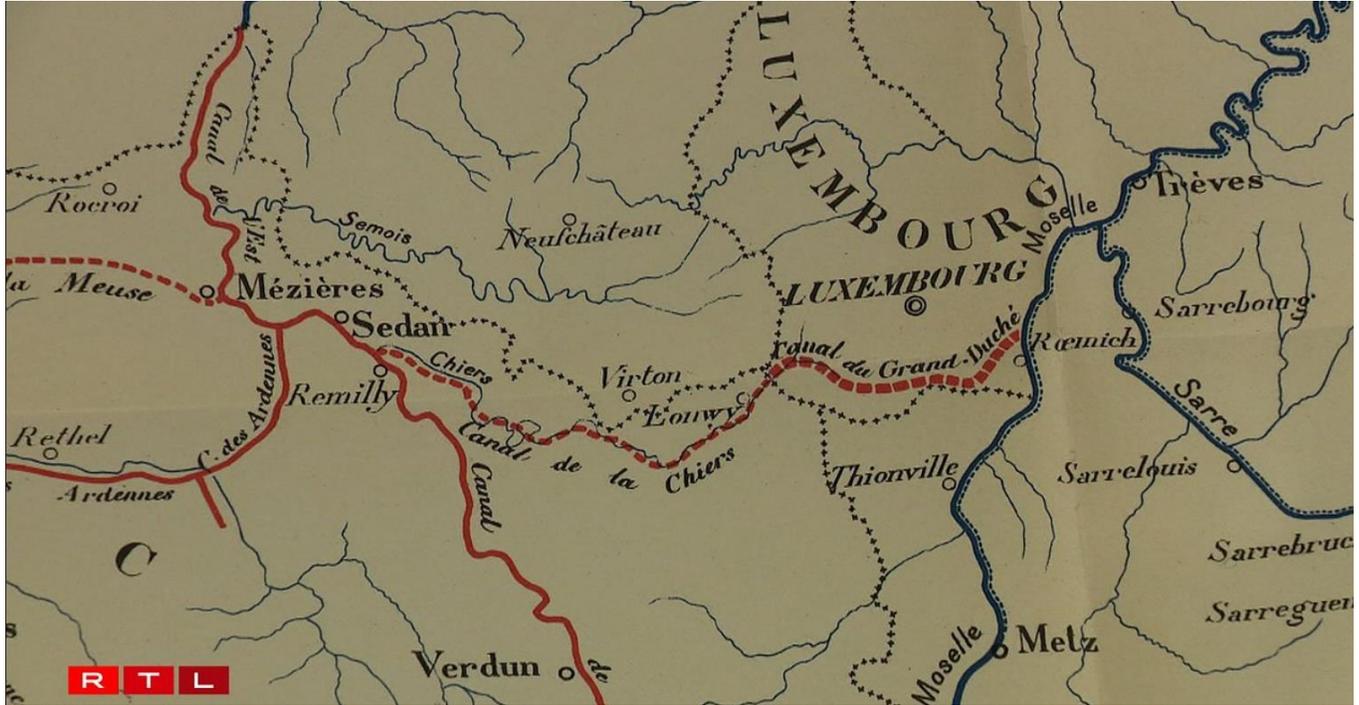


Figure 11: Plan du canal entre la Moselle et la Chiers, 1908⁶²

⁶¹ Geplangt, awer ni gebaut : De Kanal vun der Musel an de Minett, PISA Wëssenmagazine, RTL, Olivier Catani, 10.7.2024

⁶² Ibid.

Projets nationaux prévus dans le Plan Marshall mais non-réalisés⁶³

Dans le cadre du Plan Marshall, le Luxembourg a présenté en 1949 toute une liste de projets nationaux à long terme destinés au rééquipement et à la modernisation de l'industrie et du réseau routier et ferroviaire luxembourgeois. Ces projets étaient principalement du domaine des transports et de l'énergie électrique. La majorité de ces projets a été réalisée au fil du temps. Parmi ceux abandonnés, il convient de souligner :

- Les stations hydro-électriques mineures
- Une jonction ferroviaire Luxembourg-Sarre
- Une usine à gaz centrale pour approvisionner le sud et le centre du pays

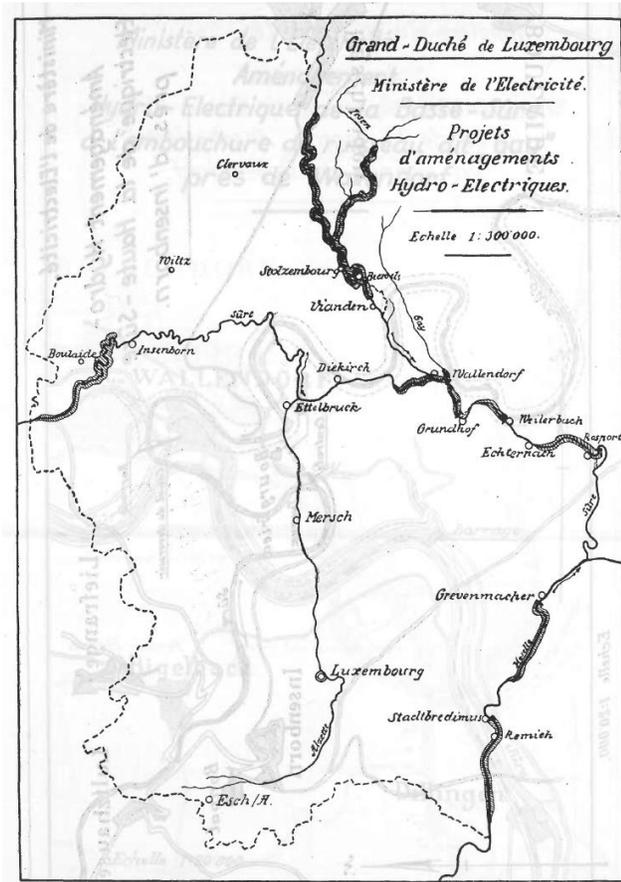


Figure 12: Le projet des réseaux de stations hydro-électriques proposé en 1949

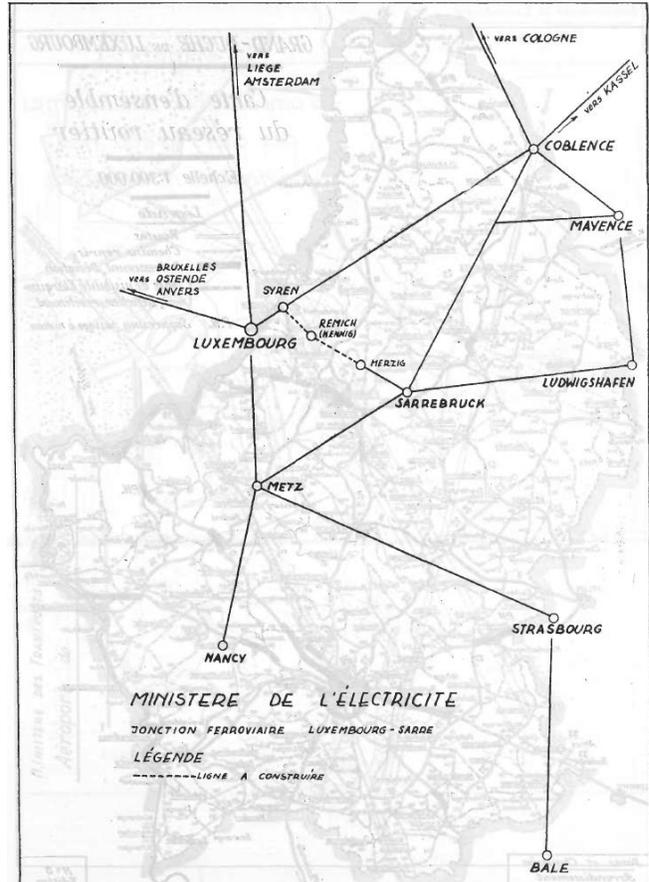


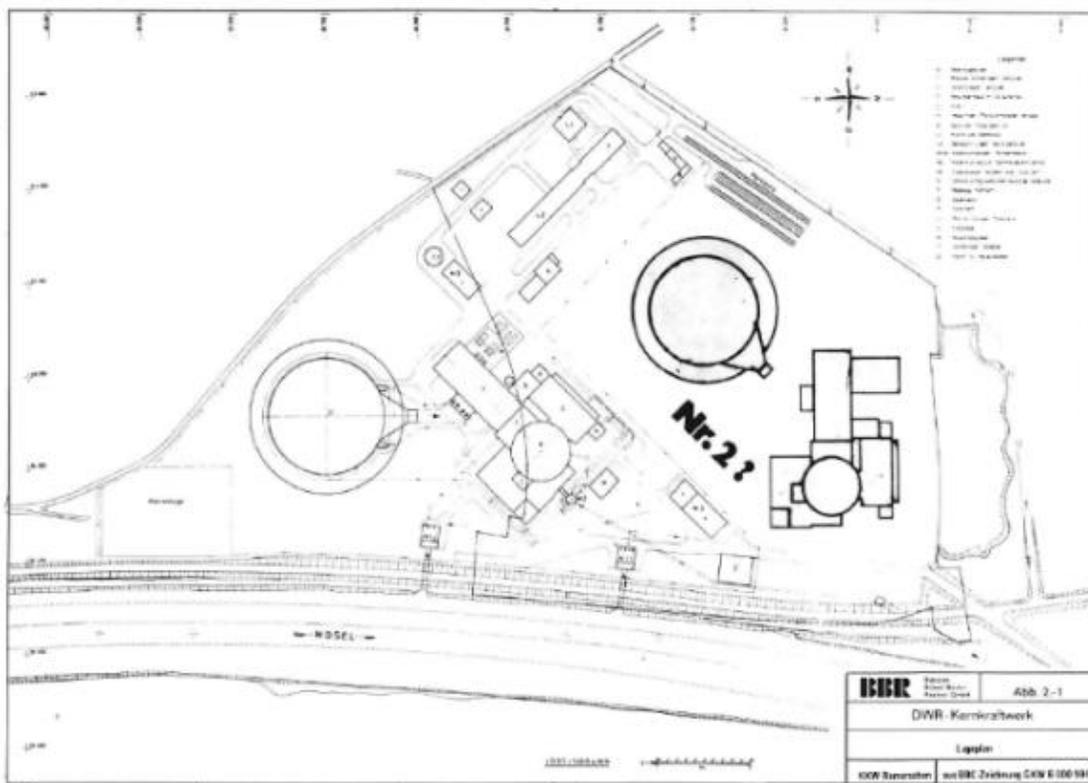
Figure 13: Le projet de la jonction ferroviaire Luxembourg-Sarre proposé en 1949

⁶³ Ministère d'Etat, [Le Grand-Duché de Luxembourg et le plan Marshall](#), Service information et presse, Bulletin d'information no.2, 1949

Centrale nucléaire à Remerschen⁶⁴

En face d'une consommation d'électricité en constante augmentation, le gouvernement luxembourgeois a signé en juin 1973 un accord avec l'entreprise allemande RWE en vue de la conception, la construction et l'exploitation d'une centrale nucléaire à Remerschen. Il était prévu de construire au moins un réacteur à eau pressurisée d'une puissance électrique installée de 1 300 MW (pour comparaison, la centrale à Cattenom a quatre réacteurs et une puissance électrique totale de 5 200 MW avec une production annuelle d'environ 30 000 GWh), ceci pour un coût estimé à 1,5 milliard Deutsche Mark (DM). Dès le début du projet, il y a eu une forte résistance de la part d'une partie de la population, notamment de l'initiative « Biergerinitiativ Museldall ». Le Ministre de l'Énergie, Marcel Mart, défendait le projet en mettant en avant le risque d'un blackout possible avec les mots « da ginn 1980 d'Luten aus ». Face à une résistance accrue, l'idée d'une centrale nucléaire a été définitivement abandonnée en 1978.

Ce projet était en concurrence directe avec l'idée du gouvernement français de construire une centrale nucléaire à Cattenom, à moins de 20 km de Remerschen, qui a finalement été réalisée.



⁶⁴ Le Règlement ministériel du 24 juillet 1974 porte sur l'institution d'une commission interministérielle chargée du contrôle de l'étude pour l'implantation éventuelle d'une centrale nucléaire. Le Comité national d'action pour un moratoire (CNAM) composé entre autres de scientifiques luxembourgeois et de la « Biegerinitiativ Museldall » a publié en 1976 le « [KKW Remerschen Weissbuch](#) », un appel contre la construction de la centrale nucléaire à Remerschen. Les événements de l'époque ont bien été résumés dans plusieurs livres et récemment dans l'article de Tauer S. (2013), « [Kampfplatz Remerschen](#) » forum nr. 327.

⁶⁵ Source : [KKW Remerschen Weissbuch](#).

Réseau air liquide à Esch/Alzette

En 1972, Oxylux S.A., filiale de la S.A. Air Liquide, installe à Esch/Alzette la plus grosse centrale de production d'oxygène du monde pour en ravitailler les aciéries. Un réseau transfrontalier de conduites de gaz transporte de l'oxygène et de l'azote gazeux aux sites sidérurgiques grand-ducaux, sarrois et lorrains. La production est arrêtée en 1996 en raison de la conversion des fours à oxygène en fours électriques. Le réseau présage dans les grandes lignes celui planifié 50 ans plus tard pour le transport transfrontalier de l'hydrogène vert (voir plus loin, trajectoire T2).

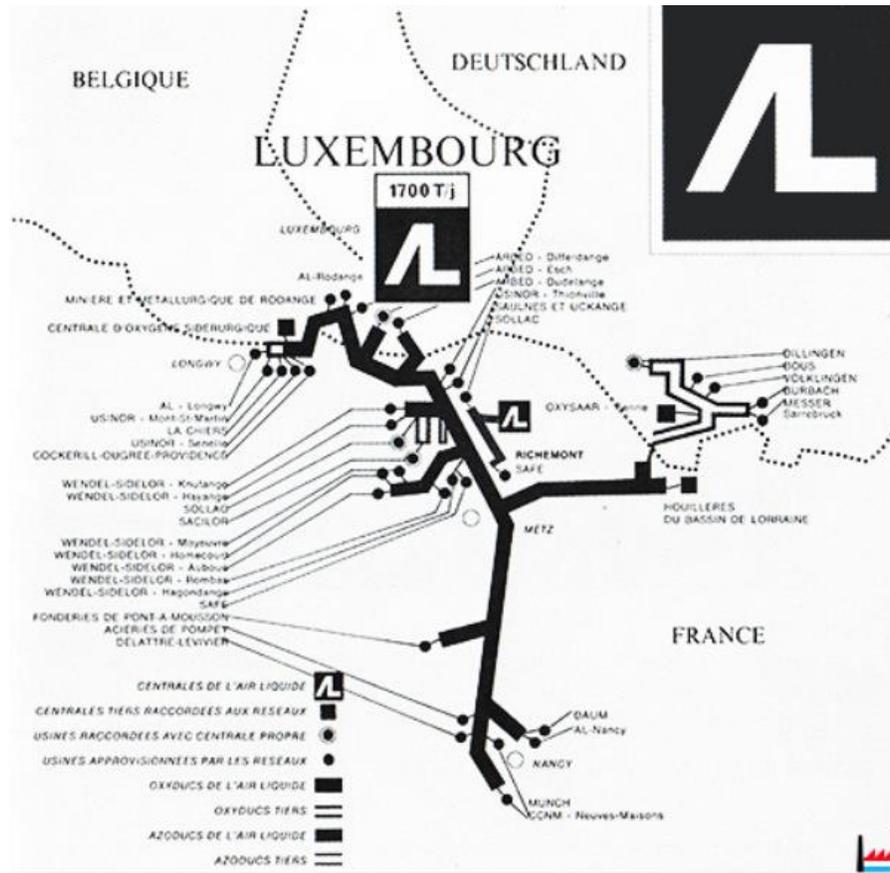


Figure 15: Réseau transfrontalier Air Liquide dans les années 1970⁶⁶

⁶⁶ Source : <https://industrie.lu/oxylux.html>

Projet de tramway Nordstad⁶⁷

Pour faciliter la mobilité dans la Nordstad, la plus petite des trois agglomérations du pays, l'association *Nordstad Tram asbl* s'est créée en 2007 ayant comme objectif la construction d'un tramway de 15 km reliant les villes Bissen et Gilsdorf avec une cadence de 10 minutes. Ce projet n'a pas été retenu dans le Plan National de Mobilité 2035.



Figure 16: Proposition d'un tram régional Nordstad, 2007

Projet de gare souterraine *train-tram* à l'aéroport de Luxembourg⁶⁸

En 2008 débutent les travaux pour la construction d'une gare souterraine à l'aéroport de Luxembourg, devant accueillir le TGV venant de Paris et le nouveau tram urbain de Luxembourg-ville, pour un budget est. de 1.5 mrd EUR. Le Ministre des Transports Cl. Wiseler arrête le *Projet Zuch-Tram* en 2009. Les gros œuvres de la gare ayant été achevés, les discussions sont régulièrement ravivées pour trouver une autre destination (parking, data-centre, centre d'affaires avec hotel, shoppings, gare tram ...) à cette « gare-fantôme ».⁶⁹

⁶⁷ Le projet est présenté en détail sur le site officiel « [Mobilitätskonzept Nordstad](https://rail.lu/projettramnordstad.html) » et ici : <https://rail.lu/projettramnordstad.html>

⁶⁸ <https://www.rtl.lu/news/national/a/2189245.html>

⁶⁹ <https://www.virgule.lu/luxembourg/sous-le-findel-la-gare-fantome-accueillera-boutiques-et-data-center/220197.html>

En Grande Région : Projet d'une station de transfert d'énergie par pompage-turbinage à Trèves (PSKW Rio)– en suspens⁷⁰



Les *Stadtwerke Trier* (SWT) sont responsables pour l'alimentation électrique de la région autour la ville de Trèves (arrondissements Trèves-Saarburg, Bernkastel-Wittlich, Eifel Bitburg-Prüm, Vulkaneifel ainsi que la ville de Trèves), couvrant une population d'environ 500 000 personnes.

L'extension rapide des énergies renouvelables dans la région (surtout énergie éolienne et photovoltaïque) va entraîner que dans les prochaines années l'électricité produite à partir de sources renouvelables soit supérieure à la consommation totale d'électricité.

Cependant, comme la production et la consommation d'électricité ne sont pas

forcément concordantes, une méthode efficace de stockage d'électricité est nécessaire pour tirer pleinement profit des énergies renouvelables et devenir plus indépendant des prix du marché de l'électricité. Afin de remédier à ce problème, les SWT ont déjà lancé en 2013 le projet de construire une station de transfert d'énergie par pompage-turbinage (STEP en français, *Pumpspeicher-kraftwerk* (PSKW) en allemand, *Pumped Hydro Storage* (PHS) en anglais) sur la Moselle à Ensch et Mehring (commune de Schweich), appelé PSKW – Rio. Cette station permettrait le stockage et le réglage de l'électricité renouvelable produite.

Illustration fictive et données clés du projet

- Puissance de 300 MW (la STEP luxembourgeoise à Vianden a une puissance de 1 100 MW)
- 2 bassins d'une superficie de 45-70 ha par bassin
- Différence de niveau de 200 mètres
- Volume de stockage de 6 millions m³ d'eau

Le projet, dont les étapes de la planification ainsi que la réalisation d'études géologiques et la signature des déclarations d'intention d'achat avec les propriétaires des terrains sont en grande partie achevées, n'a pas encore été mis en œuvre pour des raisons économiques. Le coût total a été estimé en 2014 à 600 millions EUR, ce qui n'est à l'heure pas compétitif avec l'alternative de batteries de stockage des énergies intermittentes ou avec les modèles de flexibilisation de la demande.

⁷⁰ Le site des [Stadtwerke Trier](#) donne un bref aperçu de la situation actuelle du projet. Plus de détails techniques se trouvent dans la publication [Pumpspeicherkraftwerk Rio – Energiewirtschaftliche Betrachtung](#) (2012) et [Informationsblatt – Pumpspeicherkraftwerk PSKW-RIO](#) (2014)

b. Les infrastructures démantelées

Le réseau de chemin de fer national

Les premières lignes de chemin de fer, inauguré en 1859, ont fait partie de la liaison internationale avec la Belgique (Arlon) et la France (Thionville). Au cours des décennies suivantes, le chemin de fer a connu une grande popularité et le réseau s'est développé rapidement. Il a servi comme infrastructure clé pour transporter le coke aux hauts-fourneaux et a ainsi favorisé le développement du secteur de la sidérurgie. Au moment de son plus grande extension, entre 1922 – 1939, le réseau comptait 400 km de lignes exploitées.

En 1951, la CFL a décidé de substituer une partie du réseau ferré par la mise en place d'un parc autobus. En outre, à partir des années 1960, la voiture et ainsi la mobilité individuelle ont gagné rapidement en succès. Entre 1960 – 1970, le réseau de chemin de fer s'est rétréci de 400 km à 271 km. En même temps, le nombre d'autobus est passé de 355 à 560 et le nombre de voitures a presque triplé en passant de 33 446 à 84 816.⁷¹ Aujourd'hui, une bonne partie de l'ancien réseau a été transformé en pistes cyclables.

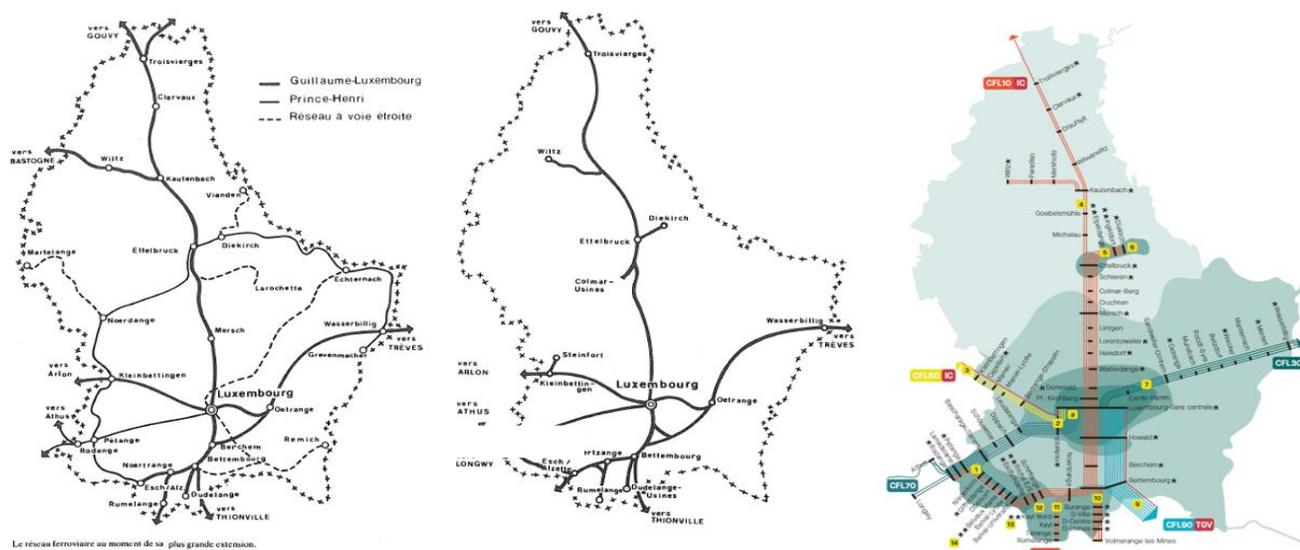


Figure 17: Le réseau de chemin de fer nationaux des années 1930 versus les années 1970 versus la prévision 2035⁷²

⁷¹ STATEC (1990), [Statistiques historiques 1839 – 1989](#). Ministère de l'Economie, p.305

⁷² Cartes suivant STATEC (1990), [Statistiques historiques 1839 – 1989](#). Ministère de l'Economie, p.293 et [Plan national de mobilité 2035](#)

Le tramway à Luxembourg-Ville⁷³

Le tramway hippomobile, inauguré en 1875, qui a connecté la gare avec la Ville Haute a servi comme un des premiers moyens de transport urbain collectif. À partir de 1908, il a été remplacé par un tramway électrique composé initialement de 4 lignes pour environ 8,5 km. En 1930, le tramway électrique était déjà composé de 12 lignes et d'un réseau total de 30 km. Après la 2^{ème} guerre mondiale, le réseau de tramway a connu un destin similaire que le réseau de chemin de fer, ceci pour les mêmes raisons. Le réseau a été démantelé au cours des années ligne par ligne et le dernier voyage a été effectué en 1964. Au total, les anciens tramways (hippomobile et électrique) ont transporté près de 400 millions de passagers au cours de leurs 89 ans d'existence.



Figure 18: Le tramway à Luxembourg-Ville des années 1930 versus 2023 versus la prévision 2035⁷⁴ (PNM2035)

Le « Minettstram »⁷⁵

Le tramway à Esch-sur-Alzette et alentours, aussi appelé « Minettstram », était en service entre 1927 – 1956. Le réseau, qui a connecté Esch-sur-Alzette avec les villes Rodange, Niederkorn, Differdange, Kayl, Dudelange, Rumelange, Tétange et Schifflange, était composé de 6 lignes et comptait 53 km.

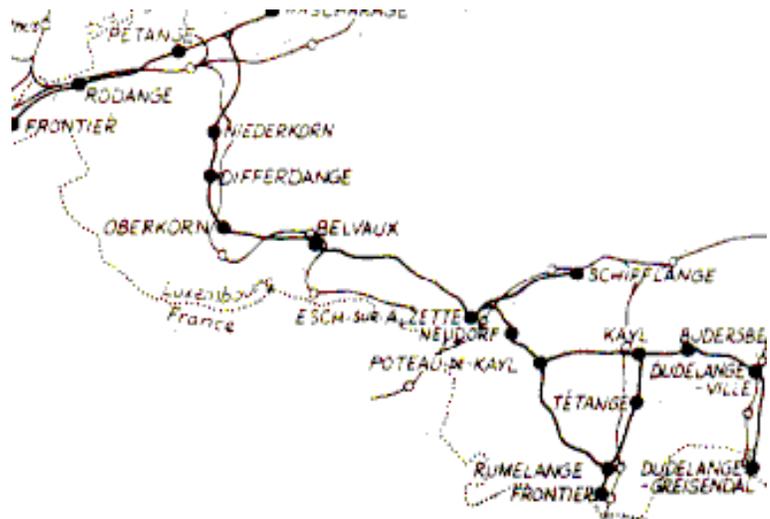


Figure 19: Le Minettstram des années 1950

⁷³ Luxemburger Wort (2014), [Als in Luxemburg noch die Tram fuhr](#)

⁷⁴ Cartes suivant [rail.lu](#), [luxtram.lu](#) et [Plan national de mobilité 2035](#)

⁷⁵ Bohnert p. et al. (2009), [Minettstram früher an haut](#), Association Bus 34

Hauts-fourneaux A, B et C à Esch-Belval⁷⁶

Les hauts-fourneaux A, B et C qui ont été mis à feu en 1965, 1970 et 1979 étaient le résultat de la modernisation du site de l'ARBED à Esch-Belval des années 1960. Ils avaient une capacité de 2 300, 3 000 et 4 300 tonnes de fonte brute par jour. Fin des années 1990, les 3 hauts-fourneaux ont été arrêtés. Le haut-fourneau C a été démantelé et transféré en Chine. Les deux autres ont été classés comme monument historique et servent aujourd'hui comme illustration de l'héritage national dans le quartier urbain moderne de Belval.



Figure 20: Les Hauts-fourneaux A et B, Esch-Belval

Twinterg : La centrale de turbine gaz-vapeur à Esch-sur-Alzette⁷⁷

Construit en 2002 pour un budget de 150 000 000 EUR, la centrale avait comme objectif de produire d'électricité à un prix économiquement abordable avec une puissance de 376 MW. L'exploitation de la centrale turbine gaz-vapeur **TwinErg** a été arrêtée en 2016 pour des raisons économiques. Elle a été démantelée en 2017.



Figure 21: Démantèlement de la centrale turbine gaz-vapeur à Esch-sur-Alzette, 2017⁷⁸

⁷⁶ Sur le site industrie.lu se trouve une liste chronologique des événements liés au démantèlement des hauts-fourneaux

⁷⁷ Article apparu en 2016 au site de la [Chambre de Commerce](http://www.chambredecommerce.lu) suite à la fermeture définitive de la centrale turbine gaz-vapeur

⁷⁸ <https://www.martensdemocom.com/fr/projecten/demolition-totale-de-la-centrale-a-vapeur-et-a-gaz-twinterg/24/>

4. Bilan de 185 ans de grands travaux : des infrastructures fondatrices et libératrices aux infrastructures de marché et de confort

Nous avons retracé la mise en place des infrastructures physiques constitutives d'une nation (transports par routes, chemin de fer, tram, énergie et électrification, eau potable et assainissement...), suivies de celles formatrices d'une économie diversifiée et ouverte (mines et sidérurgie, communication, transport aérien, autoroutier et fluvial...).

Certains cycles, *patterns* ou structures se détachent de cette rétrospective. Avant l'indépendance, les grandes infrastructures dures se résument à qq routes. Depuis l'indépendance, le moteur des grands travaux était l'industrie minière et sidérurgique. Outre les sites industriels, ceci se concrétisait sur le plan économique par la construction de liaisons ferroviaires et routières et, sous l'impulsion de l'extension démographique, des réseaux d'eau, de gaz et d'électricité.

Au lendemain de la 2^{ème} guerre mondiale « tout était à refaire ». Le **Plan Marshall** fut un formidable accélérateur de travaux et catalyseur de modernisation infrastructurelle. Ce **plan prospectif**⁷⁹ à long terme a mis un fort accent sur l'exploitation précurseur de **l'hydro-électricité**, dans un pays dépourvu de grands fleuves et de grands espaces. Sans le choc de la 2^{ème} guerre mondiale et l'élan Marshall, le petit Luxembourg n'aurait peut-être jamais réussi l'exploit d'accueillir sur son territoire ce qui est encore aujourd'hui une des plus grandes centrales de pompage turbinage d'électricité d'Europe ? La sidérurgie luxembourgeoise profitait pleinement du boum de la reconstruction, jusqu'à son déclin fin des années 60, qui se conjugue avec le déclin du charbon. A cette époque a été amorcé le **fuel switch** du charbon (peak en 1960) vers l'électricité et, avec l'avènement de la voiture individuelle et de l'aviation, un ajout d'une énergie primaire, le pétrole et ses produits dérivés (Figure 19).

Le dernier quart du XX siècle voit aussi la construction du quartier européen au Kirchberg (Tour Alcide de Gasperi, 1966), puis l'extension des moyens de communication, marquée par les installations de communication satellites, et des infrastructures d'accueil de la place financière. Des constructions de prestige et de récréation voient le jour après la satisfaction des besoins infrastructurels de base. Un **transport mode switch** s'opère à partir des années 1960, de la mobilité collective par tram et train à la mobilité individuelle par voiture, avec comme conséquence que la place et les moyens consacrés à la voiture s'étendent.

Le XXI siècle est, en Occident industrialisé et urbanisé, celui de la **saturation et complexification infrastructurelles**. Tandis qu'il existe en Europe des régions sous-équipées et perdant en population, la saturation est particulièrement marquée au Luxembourg qui connaît une accélération démographique sur un territoire exiguë avec une forte proportion sous statut de protection ou de restrictions et déjà fortement fragmenté, urbanisé et dense en population.⁸⁰ Ceci entraîne un **retard infrastructurel**, particulièrement en matière de transport des personnes, d'assainissement de l'eau ou de génération d'énergie. Aujourd'hui, avec jusqu'à 100 heures/an passées en bouchons, les embouteillages ont atteint des proportions affectant la qualité de vie des citoyens et travailleurs et la compétitivité de l'économie.

Aujourd'hui, le **transport mode switch** des années 60 du siècle dernier est partiellement inversé, avec la cession d'espace « voiture » pour la reconstruction du tram urbain à Luxembourg Ville ou la conversion de routes et rails en pistes cyclables. Les investissements en énergies renouvelables sont aussi très visibles et commentés. Ceux tout aussi vitaux et significatifs en gestion de l'eau le sont moins.

Toutes les grandes infrastructures ont eu un effet d'entraînement économique et de désengorgement fonctionnel, nous permettant de confronter des pénuries et imprévisibilités. Elles ont aussi comme effet d'accélérer la vie.⁸¹

⁷⁹ "Don't fight the future, decide it!", Ruben Erik Diaz-Plaja, Joshua Polchar, 13.12.2023

⁸⁰ Programme Directeur d'Aménagement du Territoire (PDAT), Luxembourg, 2023. Espon Europe ; European Commission, Knowledge for policy, Foresight, Importance of territorial inequalities, https://knowledge4policy.ec.europa.eu/foresight/importance-territorial-inequalities_en ; Share of land covered by artificial areas in EU member states, 2015 (%), <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/wdn-20180523-1> En EU, seul Malte, les Pays Bas et la Belgique sont plus densément peuplés que le Luxembourg, Statec, le Luxembourg en chiffres, 2023.

⁸¹ Alles im Fluss, Dirk van Laak, 2018, p. 285

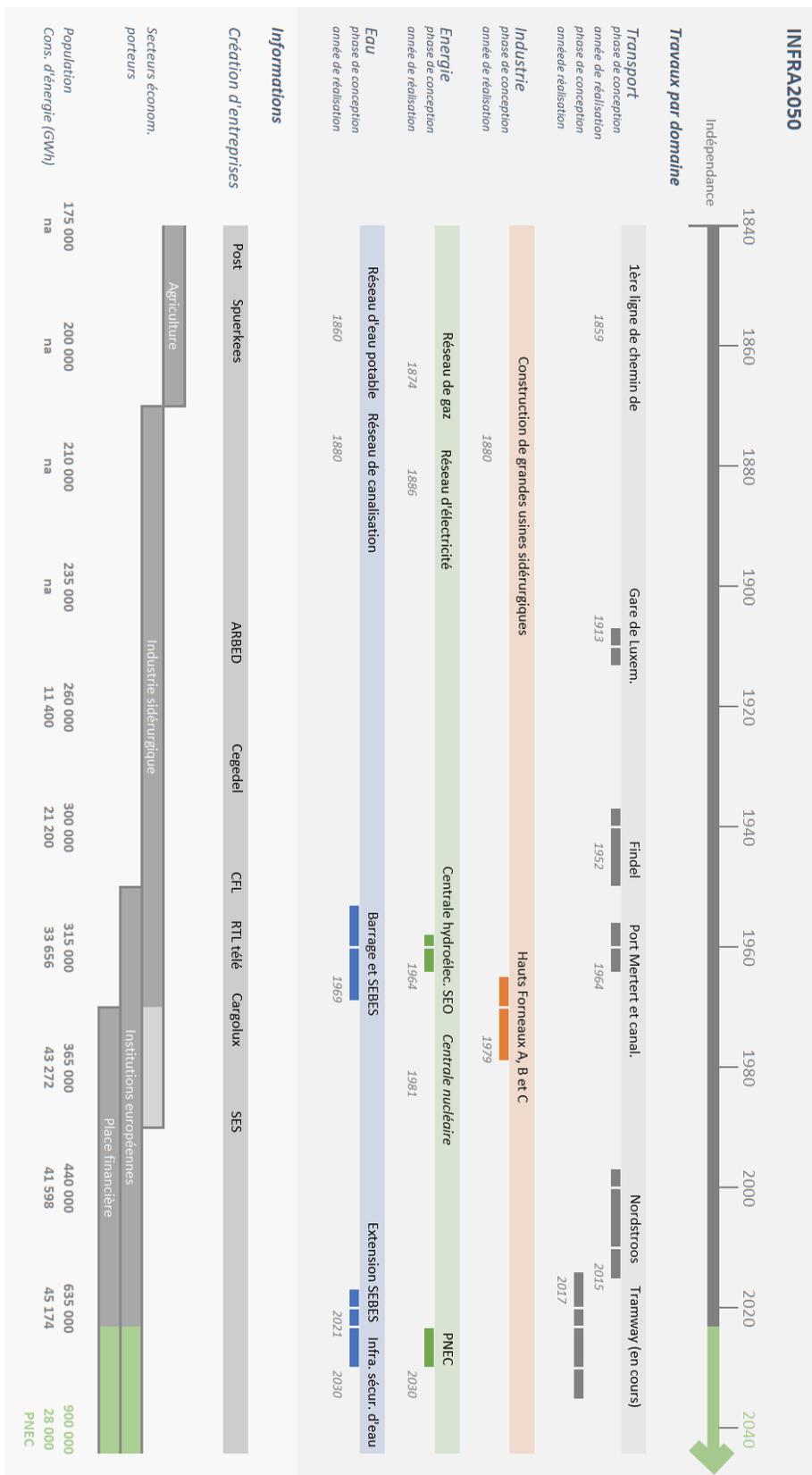


Figure 22: Chronologie des grands travaux au Luxembourg de 1840 - 2040⁸²

⁸² Chiffres historiques de la population et de la consommation d'énergie suivant STATEC. Chiffres pour 2040 suivant PNEC.

Le **XXIème siècle** sera marqué par la **décarbonation et la digitalisation** de nos systèmes et infrastructures. La décarbonation est prévue par les politiques et plans énergétiques et climatiques européennes et nationales (PNEC). En termes de décarbonation, la meilleure infrastructure est celle dont on n'a pas besoin. Il en vaut autant pour l'énergie, dont la consommation au Luxembourg est prévue de baisser de 45 000 GWh en 2020 à 28 000 GWh en 2040.. Selon le PNEC, l'électricité, non dérivée de l'énergie fossile, deviendrait le vecteur énergétique n°1 au Luxembourg en 2040.

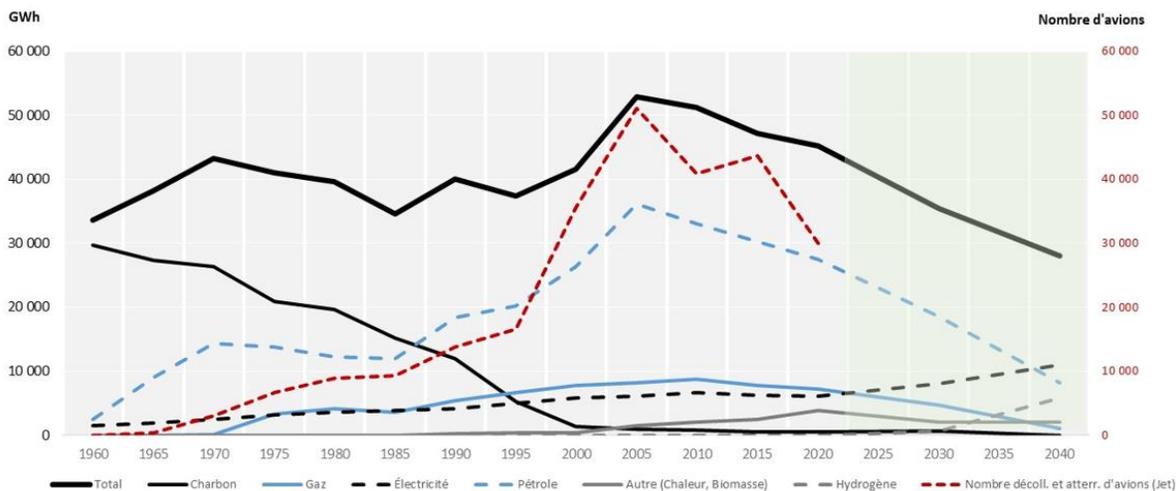


Figure 23: Consommation finale d'énergie (en GWh) et décollage et atterrissage d'avions (en nombre d'avions)⁸³

La partie historique met en exergue le rôle des infrastructures dans le développement du pays, l'imbrication de l'énergie et des infrastructures, l'importance des connections transfrontalières, la dépendance des importations de matières premières critiques ou la nécessité d'aligner l'approvisionnement de base (énergie, eau, ...) à l'évolution économique et démographique du pays. En effet, une 3^{ème} tendance lourde semble se démarquer à côté de la décarbonation et de la digitalisation de nos infrastructures : le **retour en force de la sécurisation des approvisionnements de base** (énergie, eau, ...). Cette préoccupation est adressée par l'accord de gouvernement 2023 – 2028 :

« Par ailleurs, le gouvernement garantira la sécurité d'approvisionnement en énergie à tout instant au Luxembourg. À cette fin, il fera avancer l'intégration du marché de l'électricité européen, investira dans des **installations de stockage d'énergie** et approfondira la coopération avec nos partenaires européens. Les **infrastructures énergétiques**, que ce soit l'électricité, l'hydrogène ou la chaleur, seront développées de manière substantielle. »⁸⁴

L'expérience montre que les grands travaux connaissent de longues phases de conception et leur exécution dépassent systématiquement les durées et budgets prévus, consommant et immobilisant de grandes ressources biophysiques, humaines et financières sur une longue période. C'est l'inertie inhérente aux grands travaux. Certains projets longtemps dans les tiroirs ont nécessité un cataclysme pour voir le jour. C'était le cas du **plan prospectif Marshall** de reconstruction de l'Europe après la 2^{ème} guerre mondiale.

Aujourd'hui, à une époque de contraintes matérielle et financière accrues et de risques physiques amplifiés pesant sur la durée de vie du bâti, face aussi au défi colossal de la décarbonation, la planification des infrastructures essentielles devrait viser un **horizon intergénérationnel d'anticipation allant jusqu'en 2100**, donc d'ici 75 ans ou 3 générations. Après tout, pour se protéger de l'eau, les Pays-Bas ou Singapour planifient ces infrastructures sur 100 ans. La Chine conçoit les installations de stockage d'énergie pour une durée de vie de 200 ans. Au Luxembourg plus qu'ailleurs, les besoins en ressources et en espace des infrastructures nécessitent plus **d'anticipation, de prévoyance et de constance**, afin de

⁸³ Données historiques de la consommation d'énergie et du décollage et atterrissage d'avions (Jet) de la base de données [LUSTAT](#) du STATEC. Données prévisionnelles de la consommation d'énergie de l'[avant-projet de mise à jour du PNEC](#) (2023).

⁸⁴ L'accord de coalition 2023 -2028, p. 52.

- saisir des opportunités économiques de décarbonation et d'adaptation aux risques biophysiques (p.ex. les stations hydro-électriques abandonnées, l'extension des transports ferroviaires et fluviaux, amélioration de la liaison ferroviaire Luxembourg-Bruxelles),
- former les compétences pour assurer la maintenance de l'existant et la conception et exécution de nouvelles infrastructures adaptées aux nouvelles exigences
- éviter d'investir dans des actifs échoués (p. ex Twinerg),
- éviter de démanteler des technologies encore utiles ou résistantes au temps (p.ex. transport collectif par tram, réseau européen de trains de nuits...)

Nos systèmes actuels étant entièrement construits sur l'abondance d'énergies fossiles bon marché, l'effort de décarbonation ressemble en bien des aspects à un nouvel effort de guerre. Il implique une remise à plat complète de notre façon de faire. L'histoire montre que le Luxembourg a déjà une fois réussi « à tout refaire ». Son exemple est de nature à pouvoir motiver les générations présentes et futures à réaliser les efforts qui s'imposent aujourd'hui.

II. Perspectives 2100 : Des mégatendances globales, aux tendances locales et aux signaux faibles

Ce chapitre donne un aperçu des mégatendances globales, des tendances locales et des signaux faibles en matière d'infrastructures, avec une attention particulière pour leur déclinaison au Luxembourg.

Parmi les mégatendances relevées par la prospective de la Commission européenne depuis 2020, celles pertinentes pour le secteur de la construction concernent « l'aggravation de la raréfaction des ressources », « la digitalisation et l'hyper-connectivité », « l'accélération technologique », « le changement climatique et la dégradation environnementale », « les tensions sociales, les mutations démographiques et la montée des inégalités et radicalités ».⁸⁵ Luxembourg Stratégie les complète en 2021 par celles qui portent sur la « Grande électrification et les nouvelles technologies » et sur « les transitions net zéro ».⁸⁶

En tirant profit des études récentes sur l'avenir en général des infrastructures et des analyses et observations de terrain concernant le cas du Luxembourg, cette image peut être précisée et nuancée. Il s'en démarque 7 grandes familles d'évolutions et de tendances qui influenceront les infrastructures d'ici la fin du siècle :

1. Une vulnérabilité croissante des infrastructures face aux risques biophysiques et sécuritaires, dans un contexte de contraintes matérielles et énergétiques
2. Les dommages physiques et économiques augmentant, l'adaptation climatique et les solutions fondées sur la nature gagnent en importance
3. Une attente sociale pour des infrastructures transformatives, abordables, inclusives et résilientes (ODD 9) et une tentative de compensation de l'érosion de résilience civique et de cohésion sociale par plus de résilience infrastructurelle
4. Un poids toujours plus grand de la construction d'infrastructures dans la relance économique Un poids toujours plus grand de la construction d'infrastructures dans la relance économique tout en veillant à en réduire le coût unitaire. Fonction, sobriété et résilience avant ostentation et prestige.
5. Les goulots d'étranglement en matière d'approvisionnement en matériaux de construction
6. La place centrale de l'énergie dans la transition des infrastructures et la nécessité de rallonger la durée de vie des installations et d'ajouter de nouvelles fonctions infrastructurelles - le stockage et la redondance
7. Le caractère de plus en plus stratégique, une sécurité de planification de plus en plus long-terme pour des efforts d'équipement de transition de plus en plus lourds

Nous allons voir ces sept tendances plus en détail dans les pages qui suivent.

⁸⁵ P. ex UE, https://knowledge4policy.ec.europa.eu/navigation-page/megatrends-hub_en

⁸⁶ <https://luxstrategie.gouvernement.lu/dam-assets/documents/tableaux-de-suivi-prospectifs/tableau-megatendances-ls-200722.pdf>

1. Polycrises, risques systémiques, économiques et bio-physiques

Depuis COVID, la planète assiste à une accélération, une accentuation et une diversification des **polycrises**⁸⁷ et **risques systémiques**⁸⁸ ou **existentiels**⁸⁹ (changement climatique, dégradations des écosystèmes, pandémies, géo-ingénierie, tensions géopolitiques et armes de destruction massive, intelligence artificielle non-alignée, déficit de compétences humaines, dégradation de la santé mentale et perte de confiance généralisées...). L'interdépendances entre les systèmes, les sociétés et les acteurs font que ces risques concernent désormais tous les secteurs d'activités. Leurs impacts peuvent être inédits en termes d'ampleur, et dans certains cas, entraîner des dommages irréversibles, susceptibles de compromettre l'habitabilité de la planète, voire la survie (d'une partie) de l'humanité.

Au sein de ces risques systémiques, les **risques économiques, biophysiques et transitionnels** touchent plus particulièrement les constructions.

La stratégie de **sécurité économique** de la Commission européenne de 2023 identifie quatre grands types de risques économiques :⁹⁰

1. Les risques pour la résilience des chaînes d'approvisionnement et la sécurité énergétique
2. Les risques pour la sécurité physique et la cybersécurité des infrastructures critiques
3. Les risques liés à la sécurité technologique et aux fuites technologiques, et
4. Les risques de militarisation des dépendances économiques ou de coercition économique.

Ce que les quatre ont en commun, c'est qu'ils nécessitent des formes d'action plus intenses et nouvelles au niveau de l'UE pour protéger les fonctions sociétales critiques et défendre les intérêts économiques de l'Europe.

La **Directive UE sur la résilience des entités critiques**⁹¹, crée un cadre global qui traite de la résilience des entités critiques face à **tous les dangers**, qu'ils soient naturels ou d'origine humaine, accidentels ou intentionnels. La directive exige que les États membres adoptent des **stratégies nationales de renforcement de la résilience des entités critiques identifiées**, d'ici juillet 2026, et effectuent régulièrement des évaluations des risques pour identifier les entités considérées comme critiques ou vitales dans onze secteurs, de l'eau, de l'alimentation, de l'énergie et des transports aux infrastructures numériques, marchés financiers et administration publique.

Les **risques biophysiques** représentent les pertes et dommages d'infrastructures causés par des perturbations environnementales. Les risques transitionnels sont ceux liés à la transition économique vers la neutralité carbone et comprend les politiques, taxations ou régulations climatiques qui augmentent les coûts pour les opérateurs économiques.

⁸⁷ « Le terme de « polycrise » est maintenant utilisé par certaines organisations, y compris l'ONU, et était au cœur du forum de Davos de janvier 2023. La polycrise désigne la coexistence ou la succession très rapprochée de crises de nature très diverse, qui vont interagir voire se renforcer entre elles. », <https://www.futuribles.com/en/risques-systemiques/>

⁸⁸ « Risque systémique » est réduit en finance aux risques qui portent sur le maintien de la stabilité du système financier, Comité du risque systémique, Luxembourg 2023, <https://cds.lu/>

L'usage est devenu plus général pour désigner les risques qui pèsent sur les systèmes humains vitaux : une typologie de risques systémiques distinguerait 3 types de risques, <https://www.futuribles.com/en/risques-systemiques/>:

- Ceux liés à la conjonction de différentes évolutions simultanées.
- Ceux liés au franchissement d'un effet de seuil / point de non-retour sur une dimension physique structurante d'un système (p. ex. l'inversion du Gulf Stream, le franchissement de seuils de température vivable), entraînant en retour des impacts en cascade.
- Des défaillances de systèmes humains vitaux (systèmes technologiques, financiers, infrastructures électriques...), qu'il s'agisse de pannes, de destructions volontaires ou causées par des phénomènes naturels

⁸⁹ "Risque existentiel": "An existential risk is a risk that threatens the destruction of humanity's longterm potential.", The Precipice: Existential Risk and the Future of Humanity, Toby Ord, 2022. Voir aussi OCDE Strategic Foresight Unit exposant aux Conférences annuelles de Luxembourg Stratégie 2022, 2023. Voir aussi MIT Infrastructures, Centre for existential risques sous Paul Edwards.

⁹⁰ "Power stations, pipelines, transportation networks, electronic communication networks and undersea cables are the beating heart and arteries of essential societal functions. About 8,000 km of oil and gas pipelines crisscross the North Sea alone, which according to reports, have been surreptitiously mapped out in detail by Russia over the past years. As this example highlights, Europe must now move on from a form of naiveté of insouciance to affirm and establish a common culture of anticipation and prevention." https://www.epc.eu/content/PDF/2024/Economic_Security_Discussion_Paper.pdf

⁹¹ DIRECTIVE (UE) 2022/2557 du PARLEMENT EUROPÉEN et du CONSEIL du 14 décembre 2022 sur la résilience des entités critiques

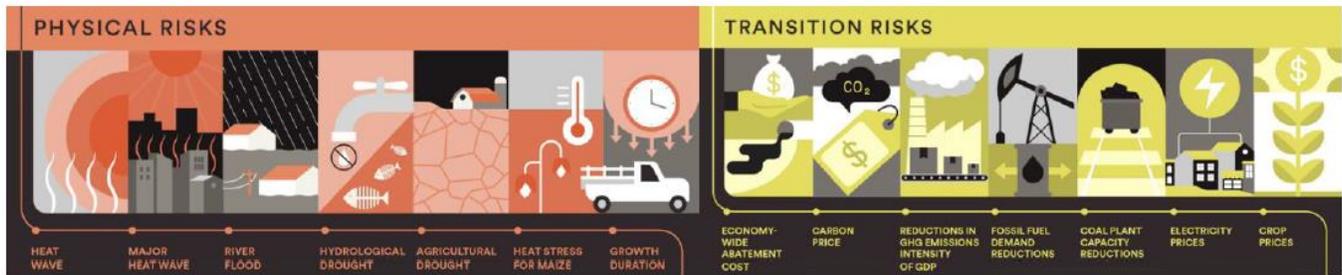


Figure 24: Différence entre risques physiques et risques de transition.⁹²

EDHEC Infrastructure Institute rappelle (voir les deux graphiques ci-contre) que les **risques physiques** créés par le changement climatique (inondations, tempêtes, température extrêmes, ...) ne se posent pas dans un avenir lointain, mais que les investisseurs en infrastructures pourraient **perdre plus de 50% de la valeur** de leur portefeuille pour cause de dommages climatiques avant 2050, et ce non pas comme intuitivement admis dans les pays en voie de développement, mais dans les économies développées dotées d'un tissu infrastructurel dense et de multiples actifs physiques de grande valeur. L'annexe 5 présente plus en détail les risques physiques qui peuvent peser sur les infrastructures.

Pour les investisseurs privés en infrastructures, le **risque transitionnel** toucherait 30%, le risque physique 54% du capital investit. Ensemble les deux risques représenteraient USD9 milliard d'actifs échoués en Europe. EDHEC conclut que « a *Too little, too late scenario*, by which emissions keep rising and climate change happened faster, would show a rapidly decreasing value of infrastructure assets due to their loss of future revenues, itself the result of a less active economy, mostly due to chronic heat »⁹³

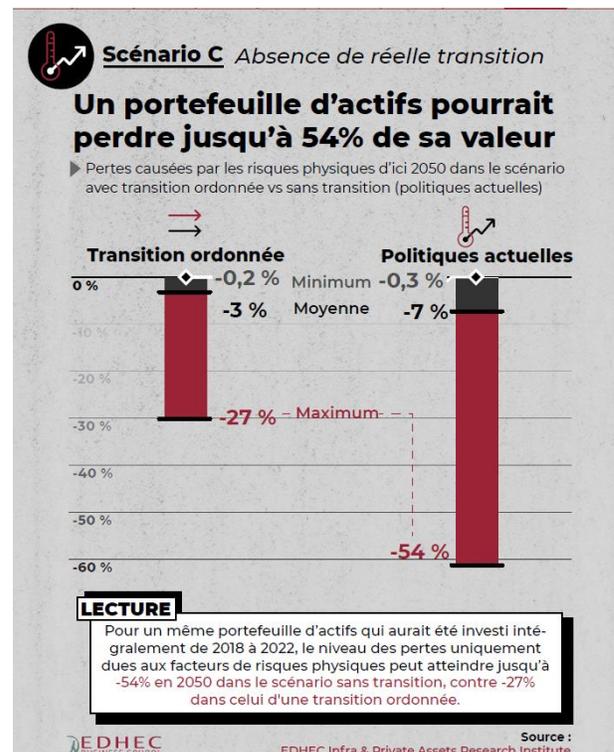
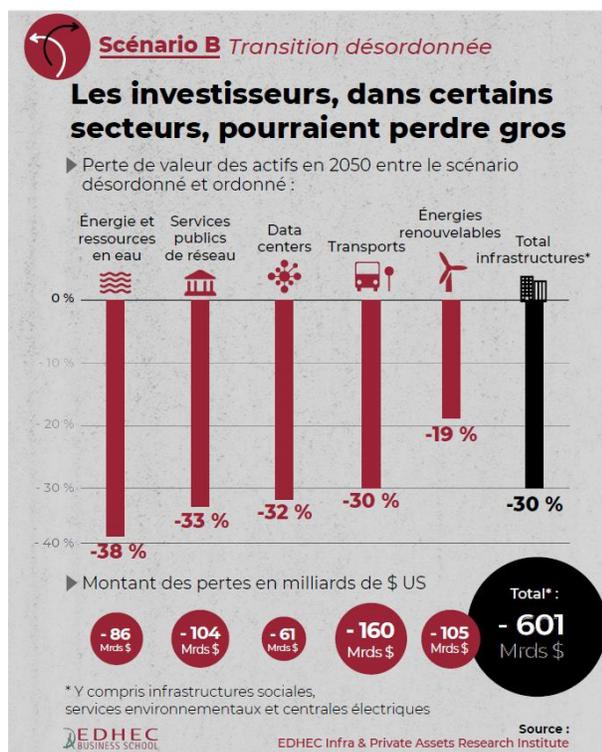


Figure 25: *Too little, too late climate scenarios*, EDHEC Infra, 2023

En 2022-2023, Luxembourg Stratégie a commandité une étude pilote – [RISK2050](#) – pour mieux comprendre certains **risques biophysiques majeurs pour les entreprises luxembourgeoises** (changement climatique, érosion

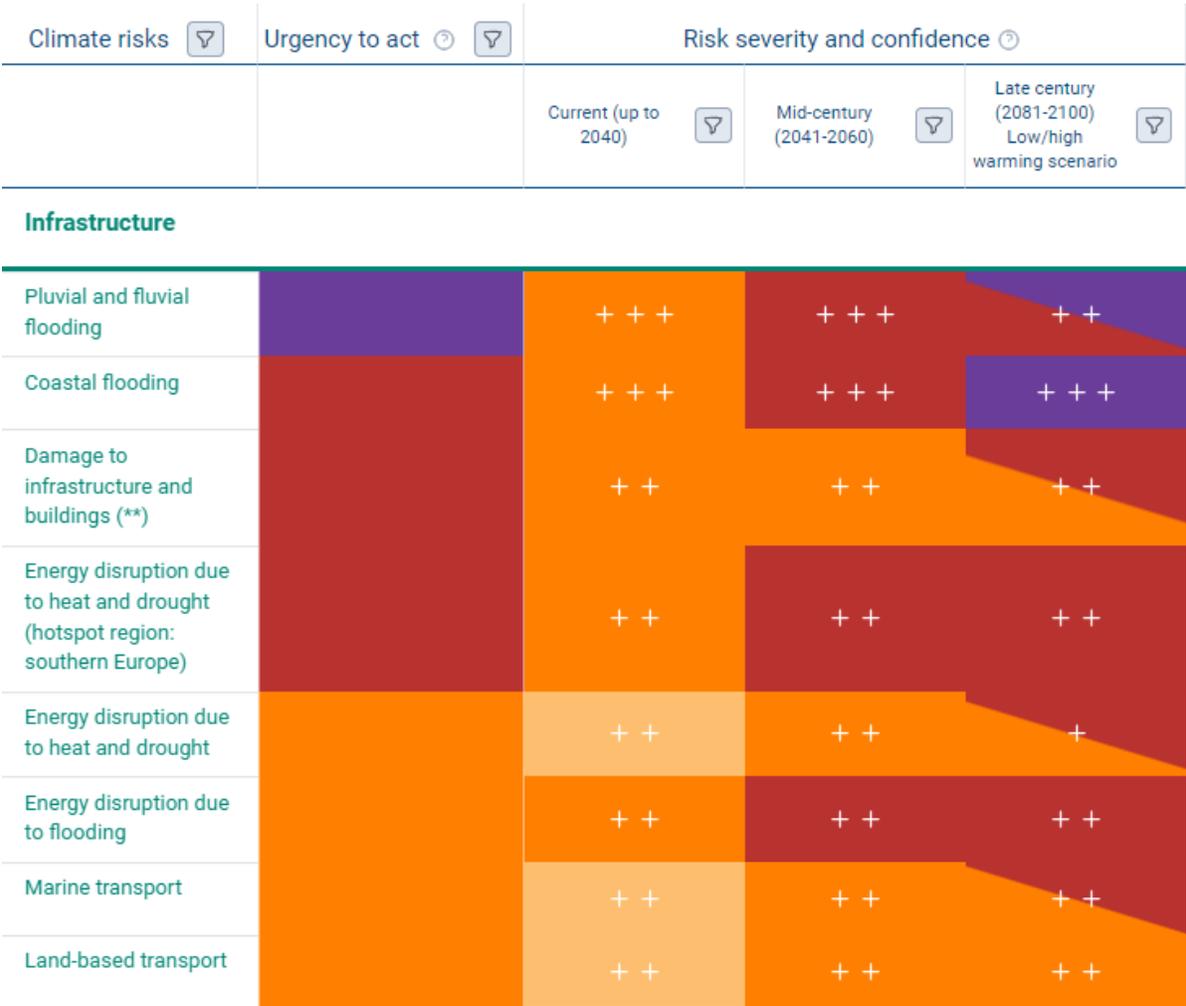
⁹² Extrait de l'étude [RISK2050](#), Luxembourg Stratégie, 2023

⁹³ Highway to Hell – Climate Risks will cost hundreds of billions to investors in infrastructure before 2050, EDHEC Infrastructure & Private Assets Research Institute, December 2023 <https://www.edhec.edu/fr/recherche-et-faculte/edhec-vox/dataviz-changement-climatique-pourrait-couter-tres-cher-investisseurs-infrastructures>

de la biodiversité, disruptions de l’approvisionnement en ressources naturelles). L’extrait ci-contre décrit la situation pour le secteur de la construction :

« The construction sector is also vulnerable to suboptimal working conditions, decreased productivity and labour supply shortages. The National Climate Adaptation Strategy (2018) has identified that extreme weather events and high summer temperatures affecting the indoor climate of buildings are impact priorities Furthermore, the chronic climatic shifts affect the energy requirements of buildings and the suitability of locations for new development projects The building industry is further vulnerable to heat stress, increased cooling demand, potential significant damage from flash floods, and heightened weather-related damage affecting property insurance. Similar studies on the perceived risks by stakeholders divide the risks into two groups – those related to the construction process and to already completed projects, where physical and transition risks overlap. The construction process is exposed to occupational health and safety risks for workers, risks for the quality and supply of materials, waste management, compliance to changing regulations, changing energy demands, and preparedness to pay for unexpected events. The finished products are exposed to higher heat load, compromised energy and water efficiency, and increased insurance claims».⁹⁴

Le *European Climate Risk Assessment* (EUCRA) synthétise les risques climatiques court-, moyen- et long-terme pour les infrastructures et pour l’économie du continent comme suit :



⁹⁴ Etude RISK2050, Luxembourg Stratégie, 2023, <https://luxstrategie.gouvernement.lu/fr/publicationsbis/risk2050.html>

Economy and finance

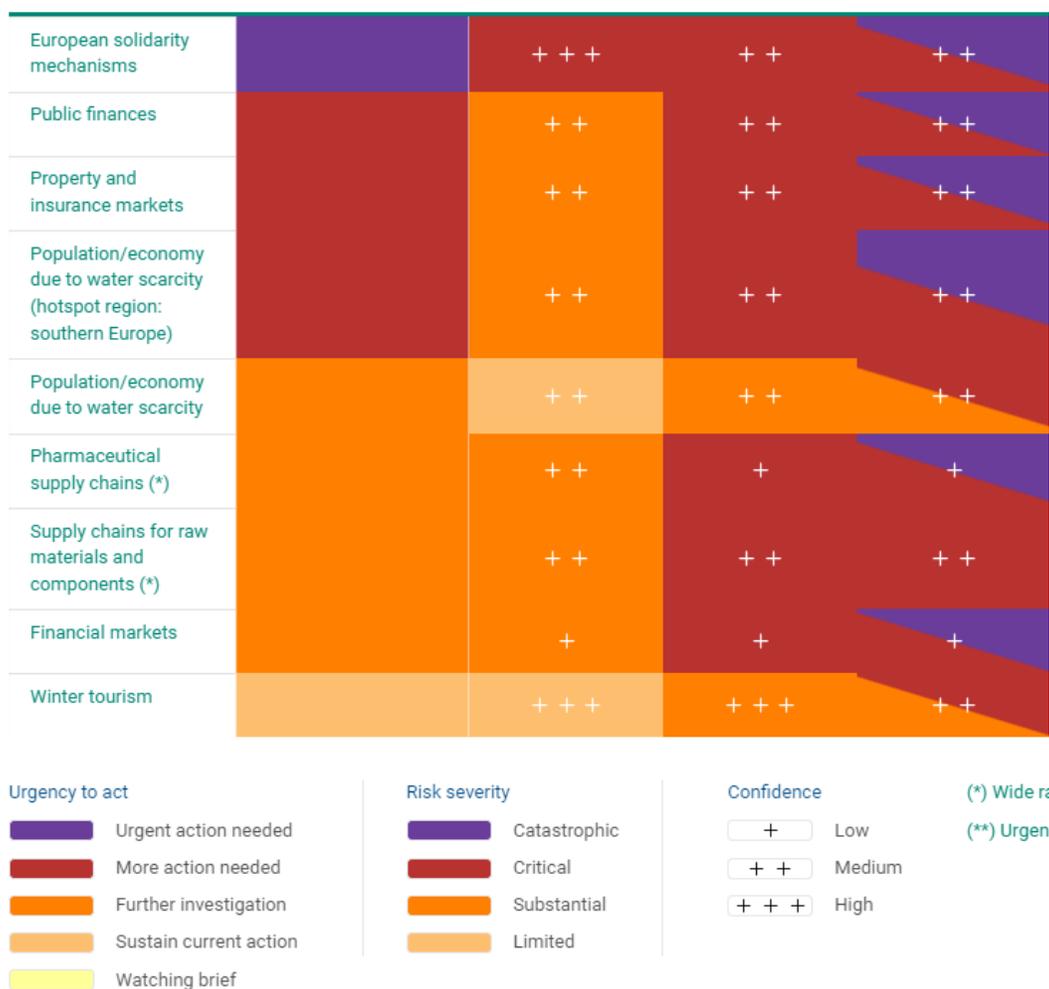


Figure 26: European Climate Risk Assessment, Major risks for Infrastructures and the economy, 2024⁹⁵

La matrice ci-contre des risques biophysiques auxquels font face les entreprises luxembourgeoises est composée de 23 indicateurs (8 concernant le changement climatique, 8 concernant l'érosion de la biodiversité et 7 concernant les disruptions de l'approvisionnement en ressources naturelles). Ces indicateurs, résultant d'une recherche agrégée de publications scientifiques, ont été classés selon la probabilité de leur matérialisation – *probability* – et la gravité de leur impact – *severity* – pour 6 secteurs économiques (4 secteurs productifs – fabrication industrielle, construction, sylviculture et transformation des aliments ; et 2 secteurs de soutien – énergie et logistique) au Luxembourg d'ici à 2050. Par la suite, des acteurs locaux représentant ces secteurs ont été interrogés sur leur propre perception de l'évolution de ces risques d'ici 2050.

⁹⁵ Agence européenne de l'environnement, 2024, <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/eu-adaptation-policy/key-eu-actions/european-climate-risk-assessment/eucra-viewer-major-risks>

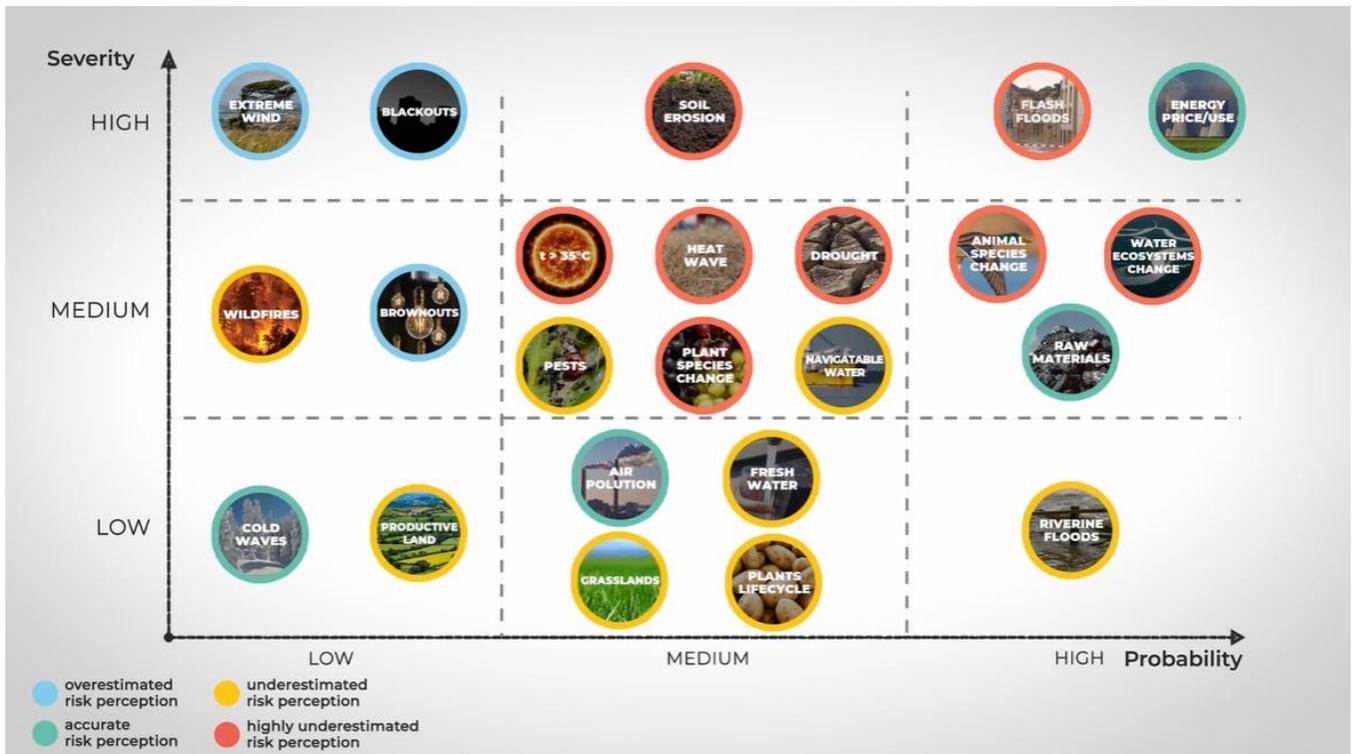


Figure 27: Matrice des risques biophysiques auxquels font face les entreprises luxembourgeoises, Etude RISK2050 (2023)⁹⁶

La figure 21 compare les résultats des deux approches et révèle ainsi des lacunes dans les perceptions – des incohérences (surestimations et sous-estimations) entre les risques perçus et les risques projetés. Il s'avère que les entreprises manquent en général de prise de conscience face à ces risques biophysiques, pour leur business case et pour leurs actifs physiques. Quid p. ex. de la construction en bois si, sous l'effet des détériorations du climat et de la biodiversité, la quantité et la qualité du bois ne répondent plus aux besoins et aux exigences de la construction ? Pour aider les entreprises à mieux se préparer à ces risques, l'étude RISK2050 propose un premier **plan d'adaptation des entreprises aux risques biophysiques**.

Conscient de ces risques, le Gouvernement du Luxembourg a prévu de procéder à une analyse approfondie de effets possibles du changement climatique sur la société dans tous les domaines et d'actualiser la stratégie d'adaptation au changement climatique. Dans ce cadre, « le Gouvernement ne se limitera pas à l'élaboration de mesures concrètes, mais mobilisera aussi les moyens financiers nécessaires à leur mise en oeuvre afin de renforcer la **résilience** de la société et de l'environnement, entre autres, en passant par l'adaptation des habitats naturels et humains, la **protection des infrastructures critiques** et la consolidation de la santé publique.⁹⁷

⁹⁶ Ibid.

⁹⁷ Accord de coalition 2023-2028, p. 59

2. Les pertes économiques augmentant, l'adaptation climatique et les solutions fondées sur la nature gagnent en attention face à la décarbonation technologique

Les transitions énergétique et climatique s'accompagnent de nouveaux besoins en infrastructures. Mondialement, les investissements dans les technologies et infrastructures de réduction des émissions de GES (décarbonation) augmentent. La vision ECO2050 a compilé les budgets estimés d'investissements nécessaires pour la décarbonation des économies nationales d'ici à 2050, pour arriver aux ordres de grandeur conservateurs suivants⁹⁸ :

- 1 mrd EUR / an pour le Luxembourg (PNEC 2030)
- 1.000 mrd EUR / an pour l'Union européenne
- 10.000 mrd EUR / an pour le monde, soit ~ 10 % du Produit Intérieur Brut (PIB) mondial (2022)

La prise de conscience des limites planétaires rend visible l'invisible : les besoins en matières premières, surface, eau, énergie et les rejets causés par la construction. En effet, le secteur de la construction a une lourde **empreinte carbone et matérielle**. Plus nous construisons, plus haute elle sera. "Infrastructure is responsible for 79 % of all greenhouse gas emissions – and 88 % of all adaptation costs. In Europe alone, for example, the building sector represents almost 40 % of Europe's energy demand – 80 % of it from fossil fuels ».

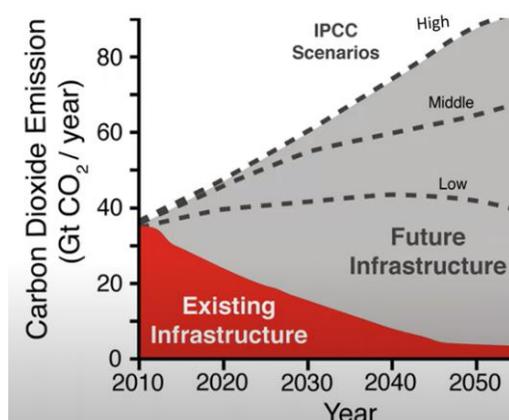


Figure 28: Future carbon dioxide emissions of infrastructures⁹⁹

Les futures infrastructures sont donc amenées à être pensées différemment afin de baisser rapidement leur intensité carbone et matérielle résultant de l'extraction et l'usage de matériaux, le terrassement et l'occupation des sols et la construction et l'opération des bâtiments. Ce focus sur la décarbonation ne doit pas faire oublier le besoin d'adapter les constructions aux nouvelles contraintes que sont les dommages physiques potentiels à la suite de perturbations climatiques.

A travers le monde, les **pertes économiques dues aux dommages climatiques** sur les infrastructures augmentent.¹⁰⁰ Avec des températures mondiales record en 2023 dépassant d'environ 1.4 degré Celsius les moyennes préindustrielles, le monde connaît des vagues de chaleur et des inondations plus graves, des sécheresses plus fréquentes, des saisons de feux de forêt plus longues et une élévation du niveau de la mer.

Entre les années 1970 et 2010, le nombre d'événements extrêmes liés au climat a considérablement augmenté, tandis que les pertes économiques enregistrées à la suite de ces catastrophes ont été multipliées par sept, passant de 198 milliards USD à 1 600 milliards USD. Les infrastructures représentent une part importante de ces dommages économiques.

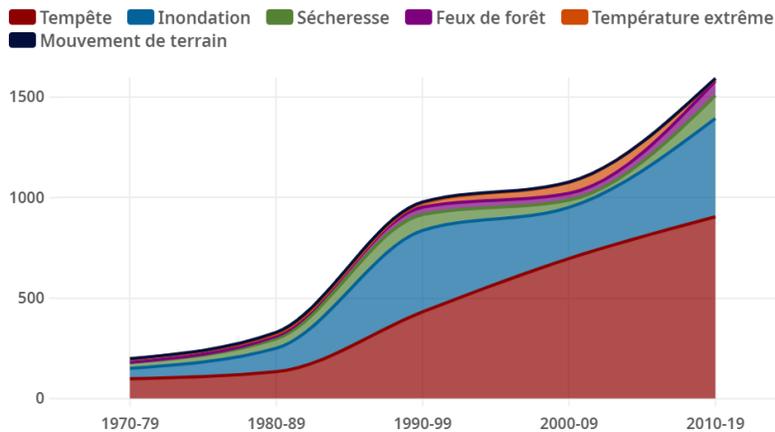
⁹⁸ Vision ECO2050, <https://luxstrategie.gouvernement.lu/fr/publicationsbis/rapport-vision-eco2050.html>

⁹⁹ Figure from a lecture from Stanford University professor Paul Edward on the topic: *Technology Eats History Techno metabolism and Time in the Anthropocene, 2023*

¹⁰⁰ Des infrastructures pour un avenir résilient face au changement climatique, OECD, 9.4.2024, <https://doi.org/10.1787/464404b3-fr>

Pertes économiques dues aux événements climatiques extrêmes

Milliards USD, année de référence 2021



Mouvement de terrain : les mouvements en masse incluent les avalanches, les glissements de terrain, les coulées de boue, les éboulements et les affaissements soudains. • Source : OCDE (2024), [Des infrastructures pour un avenir résilient face au changement climatique](#).

Figure 29: Pertes économiques dues aux événements climatiques, OCDE 2024

Dans ces conditions, les infrastructures et les biens ne seront plus assurables. Les impacts et la fréquence des catastrophes liées au climat poussent les souscripteurs à augmenter les tarifs et impose des conditions strictes dans certains domaines, empêchant les gens d'assurer leurs biens et obtenir des hypothèques. Des zones entières ne sont plus desservies par le secteur des assurances.¹⁰¹

Les solutions technologiques et digitales pour la décarbonation étant bien établies, les investissements en **résilience** infrastructurelle (réduire la vulnérabilité des constructions face aux effets du changement climatique) et les **solutions basées sur la nature** (voir aussi annexe 4), ou sur les comportements des usagers des infrastructures, restent aujourd'hui dans le monde et en Europe, les **parents pauvres** des investissements en infrastructures.¹⁰² Écoutons encore une fois l'expert en infrastructures Dirk van Laak: « die Bereitschaft für Notfälle vorzusorgen, nimmt ab ».¹⁰³ L'adaptation de la construction d'ouvrages aux aléas météorologiques et hydrologiques est un **angle mort** :

« More capital will be needed for **climate adaptation**. There is not enough focus yet on energy efficiency and security or upgrading the existing transport and energy system to become more climate resilient. All will require strong political leadership. It is not grandiose infrastructures that are needed, but "consistent policies, clear project pipelines and credible funding models ».¹⁰⁴

Or les exemples se multiplient de défaillances d'infrastructures face aux extrêmes climatiques et météorologiques. Ils peuvent avoir des conséquences géopolitiques, logistiques et sécuritaires, p. ex lorsque la chaleur et la fonte des glaciers des Alpes met en sursis la navigation fluviale en Europe ou pour le refroidissement des centrales électriques ou le bon fonctionnement des barrages hydro-électriques. Les destructions de la crue centennale de juillet 2021 au Luxembourg se sont élevées à un coût historique de près de 200 millions EUR (fig. 9) pour l'Etat et les assureurs, alors que le Fond Solidarité en cas de désastres de l'UE est sous pression.

¹⁰¹ "insurance sector has significant exposure to fossil fuel assets despite vulnerability to climate change", ERM, Aug 2023, <https://www.erm.com/news/new-research-shows-insurance-sector-has-significant-exposure-to-fossil-fuel-assets-despite-vulnerability-to-climate-change/> Policy Horizons Canada's Disruptions on the Horizon 2024 report

¹⁰² GI Hub, How much are governments investing in infrastructure to address climate change and achieve the SDGs? https://infrastructure-transition.gihub.org/strategies-and-transition-pathways/?_gl=1*tfdt3*_qc_au*NzQ2NDUyNDIwLjE3MDEwODI3NjA.*_ga*MTc0MzA4MDEwODI0NzAxMDgyNzYw*_ga_CDSSGHEPYJ*MTcwNTE4MTc0OS43LjEuMTcwNTE4MjE3Ny40OS4wLjA.

¹⁰³ Alles im Fluss, Dirk van Laak, 2018, p. 230

¹⁰⁴ Long-term infrastructure Investors Association, Lessons in infra investing – the longer-term view, Georg Inderst, July 2023

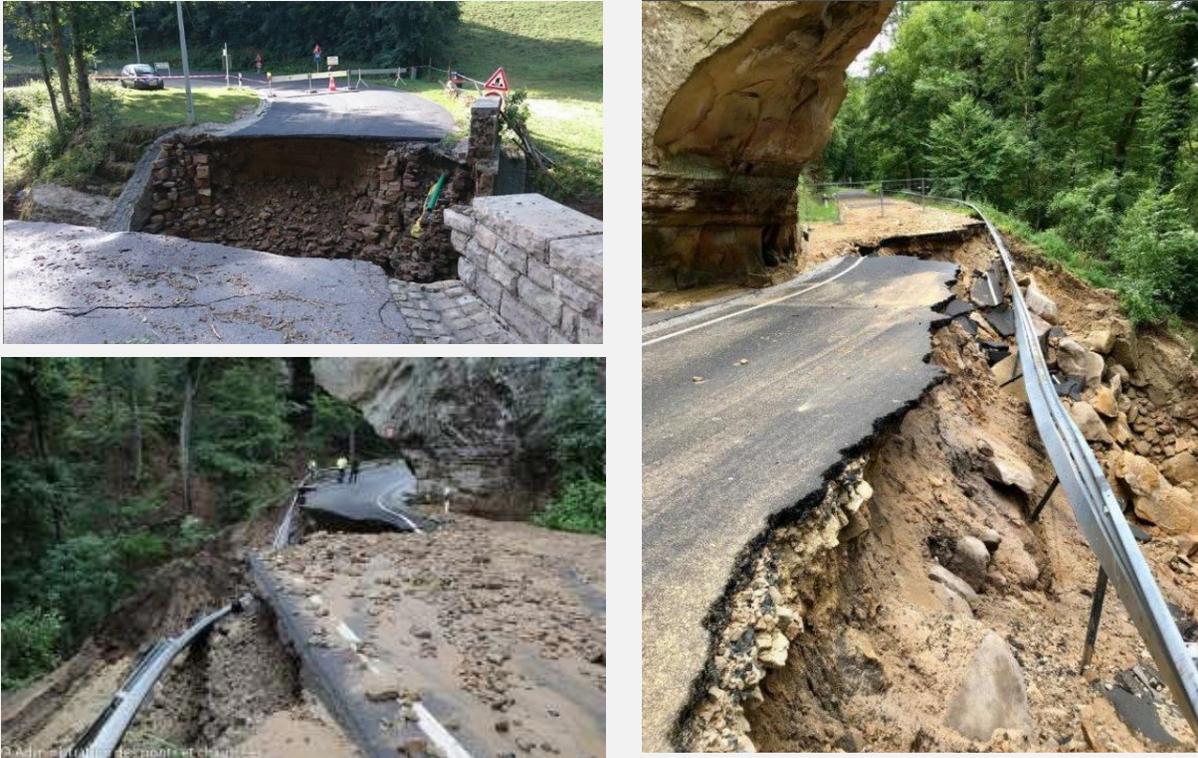


Figure 30: Impacts sur les routes liés aux inondations au Luxembourg en 2018¹

Les **défaillances d'infrastructures** peuvent se manifester de diverses manières: «Infrastructure in some countries could fail due to extreme heat, with problems such as melting roads impeding transportation, and failing electricity grids that would cause disruptions to service delivery. This could be made worse by an inability to safely undertake repair and reconstruction work outdoors during periods of extreme heat. The increased stress placed on water and electricity supplies during heat waves could cause intermittent outages and increase the cost of living in ways that would be particularly acute for low-income households. Some areas could become uninhabitable, which may drive unprecedented migration and place stress on the infrastructure of still-liveable areas».¹⁰⁵

Or le Luxembourg est absent du chapitre «Delivering environmentally sustainable and climate-resilient infrastructure» et du classement des pays en fonction de l'intégration des considérations environnementales et climatiques dans la planification et l'évaluation des projets d'infrastructure, du rapport OCDE *Governance at a Glance 2023*.

L'OCDE recommande aussi d'adopter les **solutions fondées sur la nature**¹⁰⁶, notamment lorsqu'elles présentent un meilleur rapport coût efficacité par rapport aux solutions grises (ingénierie assistée par l'énergie). Pour illustrer les deux concepts, une solution «verte» consisterait p. ex. en un étang de retenue d'eau, là où la solution «grise» construirait un réseau d'égouts en béton, assisté par des pompes. Autres exemples : La sédimentation pourrait être réduite par la restauration forestière ou le dragage mécanique des réservoirs d'eau. Les inondations et

¹⁰⁵ OECD Strategic Foresight Toolkit for Resilient Public Policy, p. 31/137

¹⁰⁶ "Nature-based solutions are actions to protect, conserve, restore, sustainably use and manage natural or modified terrestrial, freshwater, coastal and marine ecosystems, which address social, economic and environmental challenges effectively and adaptively, while simultaneously providing human well-being, ecosystem services and resilience and biodiversity benefits (United Nations Environment Assembly), cite dans OECD (2023), "Government investment spending", in *Government at a Glance*, p. 135/234. DOI: <https://doi.org/10.1787/3bb97646-en>

l'érosion des sols peuvent être régulés par l'agroforesterie ou la renaturation de cours d'eau, ou bien par la construction de réservoirs d'eau ou l'installation de ponceaux en béton.¹⁰⁷

Le potentiel d'adaptation n'est lui-même pas sans limites¹⁰⁸: le caractère fini des financements, de la place, de l'énergie et des matériaux ne permet pas de continuellement reconstruire. La mitigation technologique prend la part du lion dans les financements climatiques. Certains endroits ou régions peuvent devenir inhabitables¹⁰⁹. Certaines détériorations écosystémiques en cours sont irréversibles : la fonte des glaces, la perte des forêts, terres arables ou récifs coralliens, l'effondrement du « Gulf Stream » entraînant potentiellement un refroidissement du continent européen...¹¹⁰. C'est ce qu'on appelle des *tipping points*.

¹⁰⁷ OCDE, Des infrastructures pour un avenir résilient face au changement climatique, Mettre les solutions fondées sur la nature au service d'infrastructures résilientes face au climat, 9.4.2024, <https://doi.org/10.1787/7bc25378-fr>. Economic losses from weather- and climate-related extremes in Europe, EEA, 6 Oct 2023.

¹⁰⁸ 10 New Insights in Climate Science 2023/2024, Future Earth, Earth League, World Climate Research Programme, Stockholm 2023

¹⁰⁹ UNEP, Signals of Change 2023.

¹¹⁰ Physics-based early warning signal shows that Atlantic meridional overturning circulation (AMOC) is on tipping course, RENÉ M. VAN WESTEN, MICHAEL KLIPHUIS, HENK A. DIJKSTRA, SCIENCE ADVANCES, 9 Feb 2024. DOI: 10.1126/sciadv.adk1189

3. Infrastructures transformatives et *Social licence to operate*

Comme le rappelle l'ODD 9 (voir page 11), le choix et la réalisation d'infrastructures est aussi une affaire d'acceptation sociale, d'accès équitable et de consensus culturel et institutionnel. Suite à la pandémie et vu l'impact économique, budgétaire, social et environnemental des infrastructures, le public est plus regardant en ce qui concerne l'impact environnemental et la **durabilité** des infrastructures. A côté de l'écologisation, il insistera aussi sur les infrastructures sociales et sur une amélioration et pérennisation des services publics (*social licence to operate*¹¹¹).

Un consensus public sur l'objectif, la légitimité, l'urgence, le retour sur investissement et la résilience des infrastructures majeures devra être recherché. L'acceptabilité par le grand public des grandes infrastructures, de leurs coûts et de leurs externalités négatives, est plus facilement atteinte dans une démarche impartiale et basée sur les faits et sur les risques (*evidence-based*). Or le Luxembourg est classé très en retard pour ce qui est de l'information, consultation et participation des acteurs en matière de prise de décision infrastructurelle.¹¹²

L'étude *Futures of Civic Resilience in Europe 2040*¹¹³ insiste sur un autre lien entre santé sociale et infrastructures : à l'âge où la confiance dans les institutions et la santé mentale des populations se dégradent, les infrastructures doivent continuer à livrer même si la société devient instable. Elles sont une contre-assurance à la dislocation sociale.

Augmenter l'accès universel aux infrastructures de base, améliorer les normes de fonctionnement et de maintenance, assurer la cohésion sociale et territoriale, réduire la pollution et la prise de terre, rendre les services infrastructurels abordables pour tous, créer des emplois et étendre la mobilité inclusive et bas-carbon sont autant d'ingrédients de cette acceptabilité publique et *social licence to operate*. (voir aussi Annexe 4 *Increase the positive social impact of infrastructures*).

Cela passe aussi par la formation aujourd'hui des jeunes **talents et compétences** (techniques, sociologiques, écologiques, STEM ; ingénierie de grands projets¹¹⁴, flexibilité électrique, adaptation au climat, ...) nécessaires à mener ses transitions dans la façon de planifier, concevoir, exécuter, utiliser, entretenir les infrastructures de l'avenir. Tout dépend donc aussi de l'évolution des compétences, sachant que sans les énergies fossiles, de nouveaux bras sont aussi nécessaires pour travailler dans la production manufacturière et agricole et dans la transformation alimentaire.

Des considérations de **confort et de sécurité** entre aussi en jeu. Le secteur de la construction devra prendre en compte les perturbations environnementales pour éviter que les personnes réalisant les travaux (ouvriers, techniciens, conducteurs d'engins, etc.), puis celles les occupant et les entretenant une fois les bâtiments réceptionnés, ne soient exposées à des températures élevées ou à des défaillances techniques potentiellement dangereuses (coupure électrique, inondations, dégâts, ...).

En matière de transition énergétique ou alimentaire, on observe aussi une effervescence d'**initiatives locales** (citoyens, coopératives, fermes, communes, quartiers, communautés citoyennes, villes, région...). Cela se traduit par de plus petites infrastructures décentralisées, connectées ou pas, visant à gagner en autonomie énergétique ou alimentaire (autoproduction et consommation, *distributed power systems*, flexibilité et stockage locaux, ...).

¹¹¹ Social licence to invest and operate, How to secure and leverage stakeholder engagement for infrastructure, Vauban, Altermind, 2022, <https://vauban-ip.com/wp-content/uploads/2022/09/Vauban-IP-Social-Licence-to-Operate-Report-2022.pdf>

¹¹² OECD (2023), "Government investment spending", in Government at a Glance, p. 128/234. DOI: <https://doi.org/10.1787/3bb97646-en>

¹¹³ Futures4Europe Policy Brief 8/2023

¹¹⁴ Megaprojects without fear, Oxford global projects

Le G20 présente les **infrastructures transformatives** et leur besoin de financement comme suit :

What are the next steps to transform the future of infrastructure?¹¹⁵

Governments, MDBs, and their partners continue to plan and develop infrastructure projects leading up to the 2030 SDG and Paris Agreement milestones. These investments must continue to strengthen economies while also removing social inequalities and transitioning to an environmentally sustainable and digitally-enabled infrastructure future. This means a **core shift** in how infrastructure is being planned, developed and delivered, moving from built solutions that address singular problems to those that address multiple transformative outcomes.

All infrastructure investments can achieve economic development outcomes such as job creation and economic growth. When combined with long-term considerations of sustainability, inclusivity, and resilience, infrastructure can also achieve transformative outcomes.

A major challenge to achieving these outcomes is the **sustainable infrastructure investment gap** which, by some estimates, could be as high as USD3 trillion in annual investments needed by 2050. Closing the gap could require more than three times the current level of investment into clean energy, and 70% of the spending required to get on track for 1.5 °C is needed in emerging markets and developing economies.

The four pillars of action needed to scale up investment in sustainable infrastructure are:

- Setting long-term national infrastructure priorities and targets for sustainable infrastructure
- Defining sustainable infrastructure and setting data disclosure standards for sustainable infrastructure
- Strengthening legal, regulatory, and policy environments to support the implementation of sustainable infrastructure
- Developing and using new financing mechanisms and technological innovations to support at-scale implementation of sustainable infrastructure.

In this context, **private sector participation** in scaling up sustainable infrastructure investment is more important now than ever before. The graph below shows the **transformative outcomes** being targeted by the investment. Note that all investment in infrastructure targets the transformative outcome of “Job creation and economic growth”.

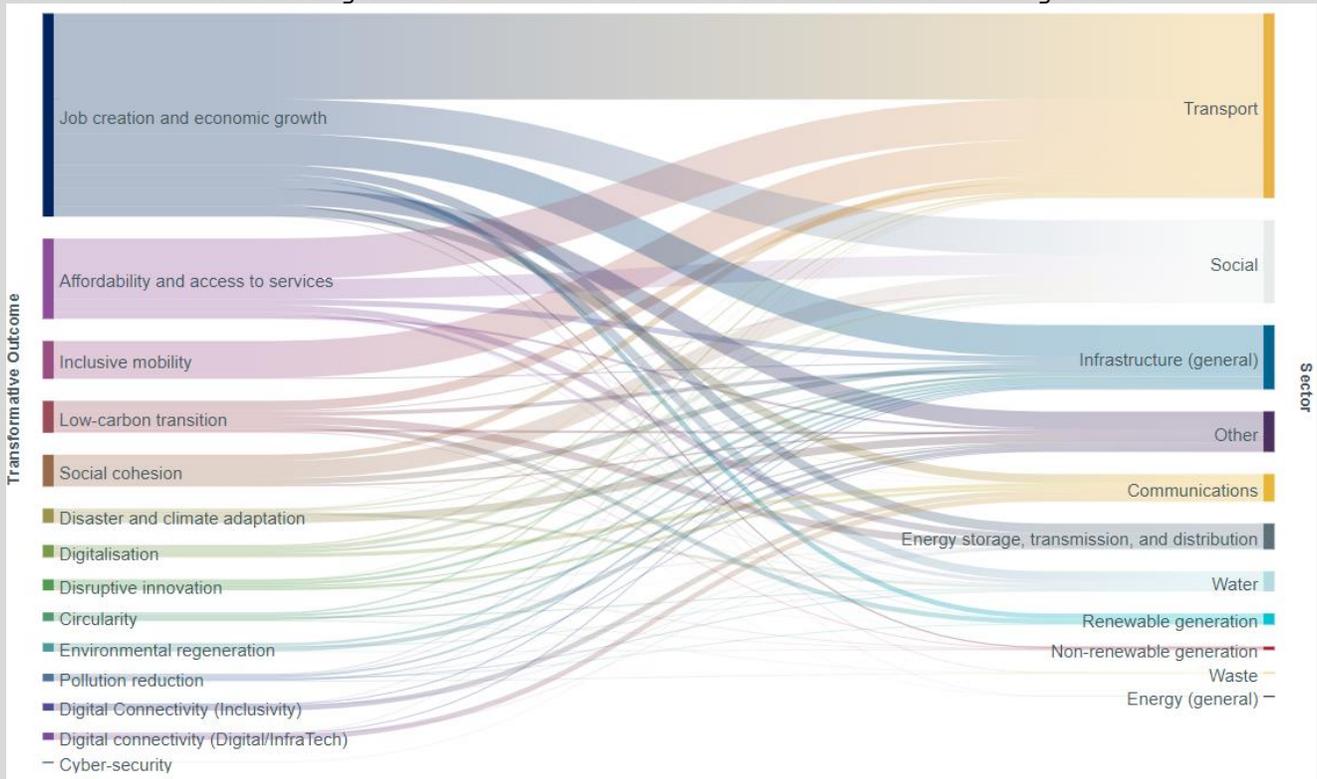


Figure 31: Investissements en infrastructures des pays du G20 et leurs résultats transformatifs, 2022, selon InfraTracker¹¹⁶

¹¹⁵ https://infrastructure-outcomes.github.org/?_gl=1*1wehkl6*_gcl_au*NzQ2NDUyNDIwLjE3MDEwODI3NjA.*_ga*MTc0MzA4MDEwNDUyNDIwLjE3MDEwODI3NjA.*_ga_CDS_SGHEPYJ*MTcwNDgyMDU3NS42LjEuMTcwNDgyMDYwNC4zMS4wLjA

¹¹⁶ Suivant l’outil [Investment Tracker 2022](#) du [Global Infrastructure Hub](#)

4. Un rôle de plus en plus prégnant pour les infrastructures dans la relance économique

Investir dans les travaux colossaux de construction neuve et d'adaptation d'infrastructures existantes aux disruptions environnementales peut contribuer à la relance économique nationale et constituer une opportunité d'affaires pour le secteur privé.

Le principe de base de la relance keynésienne (d'après le nom de l'économiste John Maynard Keynes qui l'a formalisée suivant le krach de 1929) consiste à injecter de l'argent public dans l'économie afin de la redémarrer, en particulier pour sortir de situations de crise ou de récession. L'intervention de l'État dans l'investissement, p.ex. dans de grands travaux d'infrastructure bénéfiques au développement économique¹¹⁷, serait justifié par le fait que celui-ci crée des **emplois et des sources de revenus** à même d'alimenter et stimuler d'autres secteurs par effet ricochet (**effet dit « multiplicateur d'investissement »**).¹¹⁸ Abstraction faite des effets sur les ressources naturelles, le GI Hub confirme l'effet bénéfique des investissements en infrastructures sur la création d'emplois et sur la croissance économique (voir graphique page précédente). Ces effets multiplicateurs varient en fonction du cycle économique et les politiques de relance sont considérées comme étant particulièrement utiles en bas de cycle, lorsque le risque de générer de l'inflation ou des effets d'éviction de l'investissement privé sont moindres¹¹⁹.

La partie historique de cette note illustre un exemple emblématique de politique keynésienne fourni par le Plan Marshall, qui a permis aux États-Unis d'épauler l'Europe dans la reconstruction de ses infrastructures détruites pendant la seconde guerre mondiale et ainsi de relancer son économie.¹²⁰ De fait, les injections de capitaux dues au Plan Marshall ont largement contribué à stimuler la croissance économique d'après-guerre en Europe (période dite des « Trente Glorieuses ») dans son ensemble et pas uniquement dans les secteurs directement touchés par des projets d'investissements publics liés au Plan Marshall.

Plus récemment, de nombreux pays ont appliqué à bon escient des politiques keynésiennes suite au Covid-19 : que ce soit sous forme d'**accroissement des investissements publics**, des dépenses de soutien aux revenus ou des cadeaux fiscaux, de nombreux États ont veillé à doper la demande globale pour éviter tout enlisement de l'activité économique. En Europe, le « Plan de relance pour l'Europe » (*NextGenerationEU, 2 000 mrd*) s'inscrit directement dans cette lignée puisqu'il vise à « réparer les dommages économiques et sociaux causés par la pandémie » en injectant des fonds dans les économies européennes. Dans ce contexte, le plan luxembourgeois de **relance et de résilience** prévoit la mobilisation de 183,1 millions EUR.¹²¹

Au Luxembourg, les investissements publics augmentent et dépassent la moyenne UE en proportion des dépenses publiques (Luxembourg 10%, UE 6% en 2022) et en proportion du PIB (Luxembourg 4%, UE 3% en 2022).¹²² Les dépenses d'investissements essentiels pour l'avenir (formation brute de capital) représentent environ 10% des dépenses publiques nationales¹²³, avec un budget prévisionnel évoluant de près de 3 mrd EUR en 2022 à plus de 4 mrd EUR en 2027.¹²⁴

¹¹⁷ D'autres exemples relèvent d'un rehaussement de la consommation publique, des subventions à l'investissement ou la consommation privée, des aides ou subsides, etc. ou des mesures budgétaires comme une baisse des impôts pour les individus et/ou les entreprises.

¹¹⁸ Le multiplicateur d'investissement peut être défini par « le mécanisme par lequel un investissement autonome engendre au niveau macroéconomique un revenu supérieur au montant de cet investissement ». Voir Brémond et al. (1998), « Dictionnaire de l'essentiel en économie », Editions Liris, Deuxième édition, ISBN 2-909420-30-2.

« Les méta-analyses de la relation entre les investissements dans les infrastructures et la croissance économique ont montré que dans les bonnes conditions — gestion institutionnelle solide, infrastructures bien planifiées, projets liés au climat apportant la plus grande valeur ajoutée —, « l'effet multiplicateur » peut atteindre 1,4 — ce qui signifie qu'une augmentation de 1 % entraînera une croissance du PIB de 1,4 % —, soit nettement plus que les dépenses publiques non liées à l'investissement, qui ont un effet multiplicateur de 0,9. », Belgique, Bureau fédéral du Plan, Rapport Les investissements publics : définition et rôle - REP_CEIPSCOI2023 - 25/01/2024

¹¹⁹ Creel J. et al. (2011), « Petit précis de politique budgétaire par tous les temps », Revue de l'OFCE, v116, pp. 61-88.

¹²⁰ Le Plan Marshall s'écarte quelque peu de la politique keynésienne traditionnelle par sa dimension politique (à savoir la volonté de contenir l'expansion du communisme en Europe). De plus, les capitaux américains ont été transférés sous forme de prêts, remboursables en montant équivalent d'importations de produits américains.

¹²¹ Après révision des allocations, les subventions du Fonds de Relance et de Résilience (FRR) ont été réduites à 82,7 millions d'euros. Voir https://luxembourg.representation.ec.europa.eu/strategie-et-priorites/le-plan-de-relance-pour-leurope-luxembourg-commission-europeenne_fr

¹²² OECD (2023), "Government investment spending", in Government at a Glance, p. 171/234. DOI: <https://doi.org/10.1787/3bb97646-en>

¹²³ Idea, Les dépenses publiques au Luxembourg: Everest ou Kneiff. Document de Travail n°25, Juin 2024, Muriel Bouchet.

¹²⁴ DE STABILITÉITSPROGRAMM 2023, Programme de Stabilité et de Croissance du Grand-Duché de Luxembourg 2023 > 2027, ministères des Finances, avril 2023, p 6/47. <https://gouvernement.lu/dam-assets/documents/actualites/2023/04-avril/25-backes-psc/programme-de-stabilite-et-de-croissance-2023.pdf>

Le gros de ces investissements concerne les secteurs du transport (route, rail, aérien) et de l'environnement et du climat, avec des budgets correspondants qui excèdent ceux de ces 4 voisins : «... étant donné son dynamisme économique et démographique, le Luxembourg a besoin d'investissements publics (dans les transports notamment) singulièrement plus élevés que les pays environnants, qui sont clairement plus « statiques » sur ces deux plans »¹²⁵ Cependant, l'énergie fait partie des secteurs qui affichent une intensité des dépenses publiques inférieure à celle des voisins.¹²⁶

Les dépenses publiques représentent près de 40 milliards d'euros dans le projet de budget 2024. En gros, de ces 40 mrd EUR, 10%, soit 4 mrd, sont prévus pour les investissements publics. De ces 4 mrd d'investissements publics, à nouveau environ 10%, soit 400 mio EUR/an sont alloués aux infrastructures publiques :

+/- 40 mrd EUR/an de dépenses publiques, dont

+/- 4 mrd EUR/an d'investissements publics, dont

+/- 0.4 mrd EUR/an d'investissements en infrastructures publiques

Comme stipulé dans le **Stabilitésprogramm 2023–2027** (voir encadré ci-contre), « en vertu de la loi budgétaire 2023, le gouvernement continue à mettre en œuvre une **politique d'investissement ambitieuse**, axée sur la double transition énergétique et digitale, l'accès au logement ainsi que la mobilité et les **infrastructures publiques**. ». Ainsi, le budget des investissements publics est en rapport avec les coûts estimés de la décarbonation du Luxembourg (1 mrd EUR/an selon le PNEC 2030, 1.5 mrd EUR/an selon l'étude stratégique TIR et la Vision ECO2050¹²⁷).

Il suit des analyses précédentes que ces estimations de coûts de décarbonation sont probablement conservatrices. Vu les pertes physiques et économiques intégrées au changement climatique et à la dégradation de la biodiversité, il serait avisé de les réévaluer régulièrement et de provisionner pour une **augmentation sensible des besoins pour tenir compte de l'ampleur à venir des perturbations environnementales** sur le parc bâti et à bâtir. Si les durées de conception et d'exécution des chantiers sont chroniquement sous-estimées en temps normal, elles tendront à se rallonger avec les incertitudes environnementales et les disruptions des approvisionnements. Pour faire les travaux publics qui s'imposent, « il faut qu'il y ait des entreprises, des hommes et des femmes compétentes, et des matières premières disponibles. [...] Il faudrait aussi pouvoir faire ces travaux sans provoquer une hausse excessive des prix dans les secteurs concernés (et dans un contexte de hausse des taux d'intérêt et de *climate inflation*). Ceci appelle à définir soigneusement dans quoi investir, quelles infrastructures construire et renforcer et auxquelles renoncer. Ces choix politiques à poser auront probablement bien plus d'impact que le montant investi en tant que tel. »¹²⁸

Aussi l'économie luxembourgeoise ne peut pleinement bénéficier des bienfaits d'une politique de relance keynésienne que sous la condition d'une forte **coordination et synchronisation au niveau européen**. En effet, la nature très ouverte liée à la forte dépendance aux importations de l'économie luxembourgeoise entraîne des effets multiplicateurs bien plus faibles que pour de grandes économies intégrées, ce qui dilue inéluctablement les bienfaits d'éventuelles injections de capitaux publics non-coordonnées internationalement sur la croissance économique nationale (p.ex. les fuites de revenus vers les pays voisins par le biais des travailleurs frontaliers réduit mécaniquement l'effet multiplicateur au Luxembourg). A contrario, Haas et Adam (2012) estiment qu'« une politique expansionniste [...] auprès des principaux partenaires économiques (Allemagne, France) [aurait des] effets d'entraînement positifs [...] particulièrement bénéfiques » pour l'économie ouverte du Luxembourg.¹²⁹

Enfin, bien que les gouvernements soient les principaux moteurs d'investissement en infrastructures¹³⁰, la participation du **secteur privé** devient aussi de plus en plus importante face à l'ampleur du défi des transitions. Au Luxembourg, l'accord de coalition 2023–2028 du gouvernement envisage « de recourir à des formes alternatives de financement pour la réalisation de grands projets d'infrastructures, tels que des **partenariats public-privé** et des **fonds**

¹²⁵ Idea, Les dépenses publiques au Luxembourg : Everest ou Kneiff. Document de Travail n°25, Juin 2024, Muriel Bouchet. « Historiquement, la transition énergétique (...) s'est traduit(e) par une forte proportion d'investissements par rapport au PIB – jusqu'à 5-6 % des années 1950 aux années 1970 – qui s'est brutalement arrêtée avec le tournant néolibéral des années 1980. En Belgique, elle n'a jamais dépassé 3 % du PIB depuis lors. » Thomas Dermine, le Grand Continent, 8.4.2024

¹²⁶ Idea blog Vincent Hein, 17.7.2024, <https://www.fondation-idea.lu/2024/07/17/finances-publiques-ou-le-luxembourg-depense-t-il-plus/>

¹²⁷ Vision stratégique ECO2050 pour l'économie luxembourgeoise en 2050, Comparaison des coûts de l'action climatique, p. 118/196, <https://luxstrategie.gouvernement.lu/fr/publicationsbis/rapport-vision-eco2050.html>

¹²⁸ Giuseppe Pagano, professeur de finances publiques à l'Université de Mons, Relancer l'économie grâce à davantage d'investissements publics : est-ce réaliste ? oct. 2020, RTBF La Première

¹²⁹ Voir <https://statistiques.public.lu/dam-assets/catalogue-publications/regards/2012/regards-21-12.pdf>

¹³⁰ Suivant l'outil [Investment Tracker 2022](https://www.gi-hub.org/investment-tracker) du *Global Infrastructure Hub*

citoyens. Il s'agirait d'impliquer davantage les fonds étatiques ainsi que les entreprises dans lesquelles l'État détient des participations dans le financement de la transition durable et digitale ».

STABILITÉITSPROGRAMM 2023, volet investissements et infrastructures publics

« Sur la période 2022-2026, les investissements publics du Luxembourg dépassent la barre des 3 milliards d'euros par an et représentent en moyenne 4,1% du PIB. En vertu des projections, le montant alloué aux investissements publics de l'administration centrale s'établirait à 3.317 millions d'euros en 2023 et se situerait à 3.816 millions d'euros en 2026. Le tableau ci-après présente une ventilation des investissements publics par domaine au niveau de l'administration centrale. La plupart des investissements publics consiste en des projets dotés d'un budget supérieur à 40 millions d'euros.

Catégorie d'investissements publics	2022	2023	2024	2025	2026
	prévisionnel	Budget voté	Pluriannuel	Pluriannuel	Pluriannuel
Environnement et climat	422	530	803	652	572
Infrastructures publiques	215	293	373	407	414
Education	78	115	142	154	137
Logement	200	298	352	382	352
Santé	74	160	176	255	313
Sécurité	105	62	74	123	228
Propriétés immobilières de l'Etat	128	114	122	127	127
Coopération et action humanitaire	314	342	350	365	382
Autres (Culture, Sport, Economie,...)	537	661	538	532	521
Sous-total projets budget > 40 mio. euros	2.073	2.575	2.931	2.996	3.045
Sous-total projets budget < 40 mio. euros	644	742	830	752	771
Total projets d'investissement	2.717	3.317	3.761	3.747	3.816
Total en % du PIB	3,5%	4,1%	4,3%	4,1%	4,0%

Figure 32: Luxembourg STABILITÉITSPROGRAMM 2023, volet investissements et infrastructures publics 2022-2026

Investissements publics 2022- 2066 par catégorie (administration centrale), en mio EUR, Ministère des Finances, STATEC.¹³¹ Les investissements publics en faveur de l'**environnement et du climat** bénéficient de l'enveloppe budgétaire la plus importante, avec environ 3 milliards d'euros pour la période 2022-2026, dont une proportion importante est allouée à l'**électrification du transport public** et à la **transition énergétique**.

Le gouvernement priorise notamment la planification de la mobilité et anticipe les besoins futurs pour aligner le développement du réseau de transports publics à la progression de la demande. Un accent particulier est mis à la **modernisation du réseau ferroviaire** et du parc roulant, ainsi qu'à l'**extension du réseau du tram**.

La transition et l'efficacité énergétiques représentent un pilier essentiel de la stratégie climatique du gouvernement. Ainsi, un **fonds climat et énergie** est dédié à cette cause et près de 50 millions d'euros sont mobilisés pour soutenir l'acquisition de panneaux photovoltaïques.

Pour les investissements dans les **infrastructures publiques** une enveloppe budgétaire d'environ 1,7 milliards d'euros est prévue pour la période 2022 et 2026. Ce budget est destiné à la fois à renforcer les structures essentielles, ainsi qu'à entretenir et augmenter la qualité des infrastructures existantes.

Les fonds correspondants serviront notamment à poursuivre les projets de grande envergure, dont la mise à deux fois trois voies de l'**autoroute A3** ainsi que le développement de **nouvelles constructions à Belval**.

Parmi les projets routiers phares figurent également l'amélioration du réseau national de **pistes cyclables** et le projet du **tram rapide entre Luxembourg et Esch-sur-Alzette**. »

¹³¹ DE STABILITÉITSPROGRAMM 2023, Programme de Stabilité et de Croissance du Grand-Duché de Luxembourg 2023 > 2027, ministères des Finances, avril 2023, p 33/47. <https://gouvernement.lu/dam-assets/documents/actualites/2023/04-avril/25-backes-psc/programme-de-stabilit-et-de-croissance-2023.pdf>

5. Sécurité d’approvisionnement en matériaux de construction

Comme il ressort de l’encadré ci-contre, le Luxembourg est très dépendant de l’importation pour ses matériaux de construction. Sans frontières ouvertes et échanges internationaux, pas de construction au Luxembourg. Par ailleurs, la substitution de matériaux carbonés de construction (verre, acier, alu, plastique, ciment) par des matériaux biosourcés (bois, paille, chanvre, miscanthus...) se heurte à leur disponibilité en proportion par rapport au volume de construction locale. Le bois p. ex. est mis à rude épreuve par le changement climatique, avec au Luxembourg plus que 1 sur 4 arbres en bonne santé.

Consommation Intérieure de Matières au Luxembourg

Suivant la définition fournie par l’OCDE¹³², la **Consommation Intérieure de Matières (CIM)** – ou *Domestic Material Consumption (DMC)* – mesure la quantité de matières (en unité de masse, p. ex. kt) utilisée par une économie nationale sur une période donnée : elle correspond ainsi au solde entre (+) les matières premières extraites, récoltées et importées et (-) les matières exportées. Les comptes des flux de matières fournis par la base de données LU’STAT¹³³ permettent de décomposer la CIM du Grand-Duché sur une base annuelle remontant jusqu’en 2000, en chacune de ses composantes d’extraction, d’importation et d’exportation (voir Figure ci-contre).

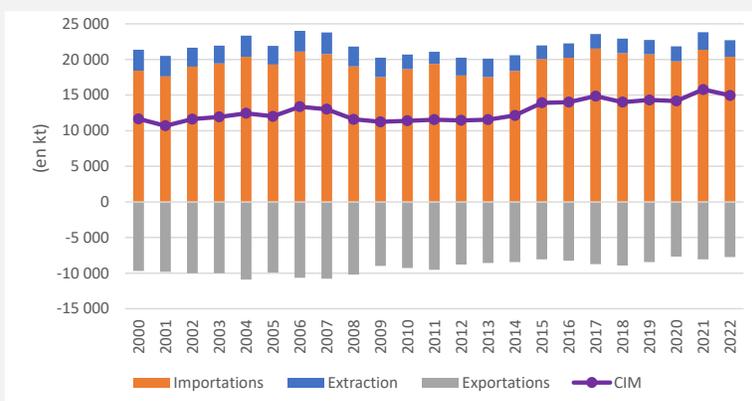


Figure 33: Évolution annuelle de la Consommation Intérieure de Matières (CIM), Luxembourg, 2000 à 2022

De manière générale, il apparaît qu’entre 2000 et 2022, la CIM luxembourgeoise s’est accrue de +28% (passant de 11.657 à 14.955 t), ce qui correspond à un taux de croissance annuel de +1,1%/an¹³⁴, alors qu’à l’échelle européenne, la CIM ralentit.¹³⁵ Cette croissance est essentiellement portée par une augmentation tendancielle des importations et une baisse des exportations – la part des extractions restant marginale dans le solde. De fait, sur l’ensemble de la période considérée, les importations sont 8 fois plus importantes¹³⁶ que les extractions. Ceci met en lumière la grande dépendance de l’économie luxembourgeoise aux importations de matières, que provoque la vigueur du secteur de la construction et l’intensité de la CIM au Luxembourg (pour ce qui des matières premières, un résident en consomme 27 tonnes en 2022, pour une moyenne européenne de 15t¹³⁷), en décalage avec son territoire limité (en surface et ressources).

Plus précisément, la décomposition de la CIM luxembourgeoise en ses constituants principaux (à savoir métaux, minéraux non métalliques, biomasse, produits énergétiques fossiles, déchets pour traitement final, etc.) montre que **59% sont constitués de matériaux métalliques et non-métalliques. Alors que ceux-ci sont essentiels pour la construction des infrastructures, ils sont importés à hauteur de 96% (en 2022).** En effet, les extractions nationales sont essentiellement constituées de biomasse (bois) et seule une faible proportion vient alimenter les besoins nationaux en minéraux non-métalliques (sable et gravier).¹³⁸

¹³² <https://data.oecd.org/materials/material-consumption.htm>. Consulté le 3 janvier 2024

¹³³ Voir les Comptes des flux de matières, sous https://lustat.statec.lu/vis?pg=0&tm=E2703&hc%5bdataflowId%5d=DF_E2703&df%5bds%5d=ds-release&df%5bid%5d=DF_E2703&df%5bag%5d=LU1&df%5bvs%5d=1.2&pd=%2C&dq=A. Consultés le 3 janvier 2024

¹³⁴ À titre de comparaison, la croissance du PIB réel (+77%, taux de +2,6%/an sur la même période) ou de la population (+51%, taux de +1,9%/an) sont plus élevés, celle de l’artificialisation des sols (+23%, taux de +1,0%/an) reste similaire en moyenne.

¹³⁵ https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Material_flow_accounts_and_resource_productivity

¹³⁶ À l’échelle annuelle, cette proportion varie de 6 à 11.

¹³⁷ https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Material_flow_accounts_statistics_-_material_footprints#Material_footprint_of_European_countries. Consulté le 25 janvier 2024

¹³⁸ De nos jours, plus aucune extraction ne concerne les matériaux métalliques (minéraux bruts).

6. Emergence de nouvelles fonctions infrastructurelles : redondance et stockage

Avec les modifications environnementales, la décarbonation et le *phasing out* des énergies fossiles, les infrastructures sont appelées à remplir de nouvelles fonctions : le **stockage stratégique de l'énergie, de l'eau et des matériaux** rares et le **dédoublage de fonctions critiques (redondance infrastructurelle)**.

Comme détaillé dans la Vision ECO2050¹³⁹, la redondance critique, le stockage stratégique et les solutions dédoublées (back-up) sont les leviers incontournables de la résilience infrastructurelle et fonctionnelle :

« La **redondance** fait référence à la capacité de réserve créée à dessein au sein des systèmes afin qu'ils puissent faire face aux perturbations, aux pressions extrêmes ou aux augmentations de la demande. La redondance peut être atteinte par le **dédoublage géographique** d'une infrastructure, la mise en réserve de pièces de rechange ou composants vitaux ou la distribution de fonctions critiques à travers des réseaux physiques ou digitaux. La redondance contribue à la résilience, au même titre que la robustesse, la réparabilité ou l'adaptation de l'infrastructure aux extrêmes climatiques. Les **datacenters** sont de bons exemples de fonctionnement redondant (système de refroidissement dédoublés, groupe électrogène ou batteries de stand-by, fonctionnement on- et *offgrid*, réserve d'eau, etc.). Certains hôpitaux ont des blocs opératoires complètement dédoublés, le second prend le relai si le premier est défaillant (*fault tolerance*). La conception des établissements hospitaliers inclut à priori une duplication des alimentations (eau, électricité etc.) et des solutions de remédiation aux incidents et catastrophes. »

La redondance infrastructurelle et fonctionnelle vise à augmenter la sécurité d'approvisionnement vital, à réduire les vulnérabilités face aux blackouts ou pénuries et, in fine, à assurer la continuation des fonctions essentielles de l'État. Si elle a elle-même un coût, elle permettrait d'avoir une certaine emprise à long terme sur les prix afin de garantir un coût abordable et stable pour les besoins de base en énergie et matière en cas d'augmentation excessive de leurs cours. Il s'agirait de mettre en place des réserves et des **solutions dédoublées** pour rester, en circonstances imprévisibles ou incertaines, en capacité de fournir les produits et services prioritaires à la population.

EXEMPLE : SOLUTIONS DÉDOUBLÉES À SYSTÉMATISER

- Méga- et micro-projets (p.ex. : stockage des énergies variables, barques plus petites pour naviguer en eau basse, etc.)
- Mitigation et adaptation (réduction des émissions/ adaptation aux effets des perturbations environnementales)
- Infrastructures grises et vertes (p.ex. : canalisations et pompes/ plaine d'inondation pour gérer l'eau. Climatization électrique/ ventilation naturelle, etc.)
- Systèmes centralisés et décentralisés (p.ex. : interopérabilité du réseau électrique européen/ PV ou batteries ou citernes d'eau au niveau des habitations)
- Système actif/assisté et passif (p.ex. : stockage en batteries/ stockage géologique ou gravitationnel)
- Savoir-faire moderne et *high-tech* et traditionnel et *low-tech* (robustesse, réparabilité)
- Solutions mécaniques et digitales (pour se prémunir contre les attaques numériques ou coupures d'électricité, etc.)
- Solutions technologiques et comportementales (p.ex. : efficacité des voitures/ réduction de la mobilité contrainte ; offre de technologies plus efficaces/ baisse de la demande de biens et services)



Refroidissement assisté par l'énergie
Source: <https://commission.europa.eu>



Refroidissement bioclimatique, baghirs, Iran
Source: <https://www.flickr.com>



Cheminiées solaires, Cooperation luxembourgeoise au Niger, 2016
Source: LuxDev (2016), construction bioclimatique au Niger

Figure 34: Exemples de solutions infrastructurelles dédoublées ou passives, selon la Vision ECO2050

¹³⁹ Vision ECO2050, <https://luxstrategie.gouvernement.lu/fr/publicationsbis/rapport-vision-eco2050.html>

Pour être *future proof*, les grands travaux d'infrastructures, conçus pour nous mettre à l'abri de chocs, doivent eux-mêmes être à l'abri des chocs : l'IEA appelle les dirigeants à concevoir les grandes infrastructures et sites de sorte qu'ils résistent aux extrêmes climatiques et aux ruptures d'approvisionnement tout en émettant le moins possible. Depuis 5 ans, les stations météorologiques constatent que les vents sont moins forts en été en Europe. Il serait crucial de tester et modéliser les systèmes et infrastructures pour différents scénarios climatiques et pour les conditions météorologiques extrêmes et non médianes, et de provisionner pour des périodes de vents faibles.

Avec la fin des énergies fossiles, la fonction de stockage n'est plus inhérente aux énergies. L'électricité générée par panneaux photovoltaïques ou générateurs éoliens ont besoin d'être stockées pour les périodes sans soleil et sans vent. Si les prix de l'électricité et des terres rares pour batteries montent, l'investissement dans le stockage terrestre (stations de pompage-turbinage) pourrait devenir rentable. En termes de redondance, il faudrait combiner les technologies en fonction de leur efficacité, durée de stockage, coûts et intensité en ressources, y compris, au Luxembourg, en surface et en eau. Différentes techniques possibles de stockage d'énergie peuvent être étudiées.²²² Les solutions gravitationnelles, thermiques ou géologiques ont l'avantage d'utiliser, en plus de solutions technologiques (batteries, *flywheel*, etc.), les opportunités naturelles du territoire, qui dépendent moins de l'importation des métaux rares et chers.²²³

Le stockage (**stockpiling**) de minéraux et matériaux stratégiques est impératif si le continent européen, pauvre en ressources naturelles, veut réussir sa décarbonation et sa réindustrialisation et assurer une meilleure autonomie stratégique face aux autres puissances géopolitiques et partenaires commerciaux. Comme prévu par le *Critical Raw Materials Act*, qui entre en vigueur en mai 2024, un système de réserves nationales de matériaux premières stratégiques devra être mis en place. Les pouvoirs publics sont appelés à créer les conditions pour que les producteurs privés créent des stocks sur site ou de manière délocalisée en Europe.

La pandémie COVID de 2020 nous a appris que ce stockage stratégique doit s'étendre aux équipements médicaux et médicaments de première nécessité, couplés à un système de centrale publique d'achats stratégiques. Par extension, le stockage devra englober les semences agronomiques et le matériel génétique en vue de pouvoir relancer la production alimentaire après un cataclysme climatique.

7. Infrastructures stratégiques et sécurité de planification

En guise de bilan, on peut observer des tendances marquées par une plus grande volonté d'autonomie en approvisionnement stratégique et un nouvel intérêt pour la gouvernance mondiale des ressources stratégiques. Cela peut se manifester par plus de protectionnisme des matières et une relance minière en Europe¹⁴⁰, un besoin de circularité et de sobriété, l'importance de la redondance infrastructurelle et de l'extension du stockage stratégique, le *near-shoring* et la bio-régionalisation, la géo-fragmentation ou la *slowbalisation*, ... "More and more countries have started to protect "strategic" or "critical" industries from foreigners, including transport, energy, communications and high tech, for reasons of rising national security concerns or the protection of national interests".¹⁴¹

Face à l'amplification des vulnérabilités, attentes et dépendances constatées, la nouvelle frontière pour les infrastructures essentielles s'annonce être leur résilience. C'est ce que défend aussi l'OCDE dans sa publication récente intitulée « Des infrastructures pour un avenir résilient face au changement climatique. »¹⁴² L'OCDE plaide pour une planification au service d'infrastructures résilientes et constate que le Luxembourg est en retard en la matière. Parmi ses recommandations de mesures à adopter par les pouvoirs publics en matière d'infrastructures stratégiques figure : la mise à disposition des informations relatives aux risques pour les opérateurs d'infrastructures stratégiques, l'élaboration de normes et de boîtes à outils pour gérer les risques, le développement de capacités spécifiques pour soutenir la continuité des activités, l'obligation pour les premiers intervenants d'avoir un poste opérationnel sur site stratégique, l'incitation en faveur de la résilience des petites entreprises, la communication avec le secteur sur les exigences réglementaires.

Les choix de technologies et d'infrastructures transformatives sont intimement liés. P. ex. l'importation de LNG ou de H₂ vert nécessite d'importantes infrastructures de stockage, compression/décompression et de transport. Faut-il miser sur une extension, un rétrofit ou une nouvelle construction de réseau de gaz en réseau de H₂, sans certitude que le H₂ vert existera en volume, prix et qualité, et à temps ? Idem pour les *Sustainable Aviation Fuels (SAF)*. « Des infrastructures colossales pour un potentiel énergétique limité ? ».¹⁴³

Compte tenu des investissements colossaux en infrastructures qu'entraînent les transitions vers un monde post-fossile, un nouveau type de questions stratégiques s'impose aux planificateurs et décideurs d'aujourd'hui : Comment construire, et reconstruire tous le 30 à 50 ans - quand les générateurs d'énergie renouvelables arrivent en fin de vie, un nouveau système énergétique décarboné, sûr et abordable ? Comment assurer la construction et la maintenance d'infrastructures vitales dans un contexte de raréfaction matérielle, de plafond carbone et de contraintes budgétaires ? Comment adapter les infrastructures aux cybermenaces et extrêmes climatiques ? Faut-il des lignes électriques enfouies pour les protéger de la canicule et des tempêtes, ou aériennes pour les mettre à l'abri des inondations ? Photo-voltaïque, agri-voltaïque, hydro-voltaïque, ou tous à la fois ? Que faire chez soi, et que faire en concertation avec les pays voisins ou de concert en Union européenne ? Dans quelles infrastructures investir aujourd'hui pour ne pas s'exposer au *carbon lock-in* sur des générations résultant en infrastructures échouées ?

La digitalisation est un composant technologique incontournable pour la plupart des nouveaux travaux, tout comme elle génère la création d'infrastructures digitales propres. Les infrastructures digitales de communication produisent et répartissent l'information dans l'espace. Il est donc primordial de penser et planifier les technologies et les infrastructures ensemble.

Sur cette toile de fond et compte tenu du contexte actuel d'inflation, de hauts taux d'intérêt, de récession économique, de tensions géopolitiques et de manque de main d'oeuvre qualifiée, il est essentiel de ne pas se tromper d'infrastructure. L'enjeu consiste à combiner relance économique immédiate et transformation bas carbone à long terme des infrastructures essentielles, en décidant judicieusement, sur base des connaissances d'aujourd'hui, **en quoi investir prioritairement** pour bénéficier des effets multiplicateurs des investissements

¹⁴⁰ cf UE règlement sur les matières premières critiques, 2023. La Commission fixe des objectifs chiffrés à la relance minière d'ici 2030, 10% des matières premières critiques consommées par l'UE annuellement devraient provenir du sous-sol européen, 40% au moins devraient être transformées en Europe et 15% devraient provenir du recyclage. La Commission demande à tous les États Membres d'identifier les potentiels gisements stratégiques sur leur territoire.

¹⁴¹ Pour plus de détails sur ces tendances émergentes, voir le [tableau de mégatendances et signaux faibles](#) ainsi que la Vision stratégique prospective [ECO2050](#), Luxembourg Stratégie, 2023.

¹⁴² OECD, Des infrastructures pour un avenir résilient face au changement climatique, 9.4.2024, <https://doi.org/10.1787/464404b3-fr>

¹⁴³ Antoine Le Bec, Futuribles, Etude H₂, déc. 2023

(emplois, rentrées fiscales...) tout en renforçant la résilience des constructions pour les générations futures. En effet, le contexte de dépassement des limites planétaires et d'insécurité économique globale impose de nouvelles contraintes à la construction, inédites dans l'histoire humaine, mais crée aussi de nouvelles opportunités économiques pour décarboner, repenser, sécuriser et adapter nos infrastructures.

On peut s'attendre à ce que les investissements infrastructurels et la sécurité minérale¹⁴⁴ dont ils dépendent, deviennent de plus en plus coûteux, stratégiques et politiques, avec un horizon de planification qui s'étendra. « Des choix stratégiques s'imposent sur l'allocation des ressources pour une sélection de technologies ». ¹⁴⁵ De même une plus grande **priorisation des usages** (usages à prioriser, usages à interroger, usages à réduire¹⁴⁶) des ressources rares (électricité verte, H2, métaux critiques, terres rares, compétences, sols, surface, eau ...) sera de rigueur, afin d'éviter des conflits d'usage entre acteurs économiques ou pays, et d'assurer préalablement le **bouclage biophysique et énergétique** des investissements.

Il faut un, voire plusieurs siècles pour réorganiser les infrastructures de grande envergure, les villes, les systèmes électriques, les forêts ou l'agriculture. Or les infrastructures que nous héritons sont largement le fruit des énergies fossiles. Sans énergies fossiles denses, pratiques et bon marché, même l'entretien et la réparation de l'existant peut devenir problématique. Les budgets publics et privés en berne, nombreux pays ont du mal à assurer la maintenance et l'entretien de leur vaste **parc d'infrastructures**, ce qui constitue un danger pour les personnes et les biens.¹⁴⁷

Dans un monde fini et avec la fin de l'ère fossile, les infrastructures sont aussi appelées à se transformer. En effet, décarbonation, digitalisation et électrification domineront l'agenda infrastructurel. De nouvelles façons de concevoir et construire, plus économes, à l'épreuve du temps et plus sourcées localement, et de nouvelles compétences (*STEM* et *low tech* allant de pair avec digitalisation et high tech) et innovations sont nécessaires. C'est ce que le GI Hub qualifie d'avenir d'infrastructures durables, déclinées en 15 trajectoires possibles pour le monde entier (voir annexe 4).¹⁴⁸

En dernier chapitre, nous aborderons les bifurcations possibles et les trajectoires plausibles pour les infrastructures essentielles pour l'économie luxembourgeoise d'ici la fin du siècle.

¹⁴⁴ Prospective de l'insécurité minérale. Anticiper la nouvelle ère métallique dans la transition bas carbone, Emmanuel Hache, Revue Futuribles jan-févr 2024, n° 458.

¹⁴⁵ Funding Europe's technology revival, Pawel Sieboda, July 2024

¹⁴⁶ The shift projet, OBSERVATIONS SUR LES PREMIERS DOCUMENTS DE CADRAGE DU SGPE DE LA TRANSITION BAS CARBONE, JUILLET 2023, https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2023/07/Observations-du-Shift-Project-concernant-les-documents-de-cadrage-du-SGPE-soumis-a-la-concertation_Juillet-2023-2.pdf

¹⁴⁷ https://www.ndr.de/fernsehen/sendungen/extra_3/Marode-Infrastruktur-Deutschland-broeckelt,extra21932.html

¹⁴⁸ Infrastructure Outlook (Infratracker),

15 transition pathways : <https://infrastructure-transition.github.org/strategies-and-transition-pathways/>

Infrastructure Future report: https://cdn.github.org/umbraco/media/2980/infrastructure-futures-report_final-v4a_updated-exhibit-5.pdf

III. Prospective 2100 : trajectoires plausibles pour les infrastructures au Luxembourg

1. Incertitudes auxquelles font face les infrastructures au Luxembourg

Après avoir tiré le bilan de près de 200 ans de grands travaux et d'équipement infrastructurel au Luxembourg, puis analysé les mégatendances globales et sous-tendances locales actuelles, nous quittons les certitudes du passé et du présent, pour explorer les incertitudes de l'avenir et entrer ainsi en prospective exploratoire. L'analyse menée et le recours à la vision ECO2050 nous amènent à identifier les questions clefs qui pourraient forger les futures infrastructures du pays. Naturellement ces questions sont complexes et imbriquées, et dépendent aussi de facteurs externes incontrôlables par le Luxembourg.

Pour ce qui est de l'intérêt particulier pour l'avenir des infrastructures au Luxembourg et afin de réduire la complexité posée par le bouquet d'inconnues devant nous, nous retenons schématiquement les **bifurcations** ou disruptions suivantes, organisées en quatre groupes :

- **Risques** ignorés ou sous-évalués (RISK-) ou risques correctement anticipés et ainsi réduits voir évités (RISK+) ¹⁴⁹ ?
 - Succès ou échec de l'adaptation aux menaces biophysiques par la **robustesse** et la **redondance infrastructurelles** ?
 - Protection des infrastructures face aux insécurités économiques et énergétiques, à la cyber-malveillance, à la fuite technologique - ou pas ?
 - Continuation de constructions basées sur les énergies fossiles (**actifs échoués**), dépendance de surcapacités infrastructurelles (*overbuild*) ou d'**Eléphants blancs** surdimensionnés - ou pas ?
 - Continuation de la couverture par les assurances des infrastructures non-résistantes au changement climatique - ou pas ?
- **Economie et démographie: *National building boom or bust?*** ¹⁵⁰
 - Continuation de l'accélération **démographique** ou ralentissement ?
L'évolution démographique du Luxembourg déterminera l'avenir de la construction nationale et doit être suivie de près. Son changement de trajectoire d'un régime (atypique) de très forte augmentation démographique (due à l'immigration) vers un régime de faible augmentation ou stagnation, peut constituer un événement inattendu disruptif, un **cygne noir**. En effet, le système de croissance économique, d'équilibre budgétaire ou de sécurité sociale est calé sur l'augmentation de la population. Au cas où le Luxembourg rejoint les pays à faible croissance démographique (+/- 770 000 habitants en 2050¹⁵¹), une accélération de la construction de logements et d'infrastructures collectives associées aujourd'hui, pourrait résulter en surcapacité et surdimensionnement demain (actifs échoués).
 - Continuation, ralentissement ou augmentation de la **consommation intérieure de matières** (CIM) ?
Quel sera le degré d'autosuffisance en matériaux de construction ? Les activités minières seront relancées pour l'améliorer ? Où en sera la sécurité d'approvisionnement en énergie et eau ?

¹⁴⁹ Bâtiments de demain, hypothèses risques systémiques, Ademe - Futuribles,2023, <https://www.batimentdemain.fr/pdf/cahier-des-hypotheses.pdf>

¹⁵⁰ "Half of the buildings that will be standing in 2060 have not yet been built. Thanks to an expected building boom in the coming decades, Asia and Africa will account for the majority of that new construction", <https://www.unops.org/news-and-stories/insights/decarbonizing-buildings-is-vital-to-climate-action#:~:text=Infrastructure%20is%20responsible%20for%2079,of%20it%20from%20fossil%20fuels>.

¹⁵¹ EU Ageing Report, IGSS 2022, Idea 2023, ECO2050. La natalité est en berne globalement et en zone OCDE. Statec constate que le taux d'accroissance démographique a ralenti de 0,7 point en un an, à 1.7% en 2023., l'un des plus bas de la dernière décennie (où ce taux variait de 2.0 à 2.5%), à l'exception des années de COVID-19, <https://statistiques.public.lu/fr/actualites/2024/stn16-population-2024.html>

- **Saturation territoriale** ? Est-ce que le Luxembourg a encore la place pour de nouvelles infrastructures surfaciques ou avons-nous atteint le **Peak built area** au Luxembourg ? Quid de la concentration du développement aux endroits les plus appropriés et de la réduction de l'artificialisation du sol prévus dans le Programme Directeur d'Aménagement du Territoire (PDAT 2023) ?
- **Compétences** adéquates pour exécuter les constructions ? Est-ce que les STEM, l'ingénierie et la planification de grands travaux, les métiers artisanaux en restauration écologique, constructions énergie-positives, protection digitale ont été enseignés ou recrutés ou pas ? Comment désamorcer la *global knowledge scarcity* and la course aux talents ?¹⁵² Compétition ou coopération entre Etats, régions, entreprises pour les talents et connaissances ?
- **Décentralisation ou centralisation** territoriale¹⁵³ et géopolitique ?
 - Nationalisme et subsidiarité infrastructurales, ou mutualisation et dévolution de grands travaux au niveau européen ?
 - **Protectionnisme** national des ressources, installations et entreprises (*national-owned*) ou détention par des non-nationaux (*foreign-owned*) ?
 - **Cartellisation** globale des matières premières stratégiques, **course** aux ressources critiques et terres rares ou **coopération** internationale et accession de ses ingrédients au statut de biens publics globaux ?¹⁵⁴
 - Utilisation accrue des ressources présentes sur le **territoire** (topographie, matériaux, mines, géothermie...) en mode récupération et du recyclage, *home-shoring* ou *near-shoring*, ou continuation de la dépendance aux importations de ressources rares (sable, calcaire, terres rares et métaux critiques, bois ...) nécessaires à la construction ?
- **Continuité ou rupture technologique** ?
 - Technologies éprouvées (*tried and tested*) et commercialisées, ou rupture d'innovation (*leapfrog technology, Sprung-innovation*, p. ex. *nature-tech, carbon capture, small modular nuclear reactors* ...), ou technologies non-encore inventées, spéculatives ou non-matures (*wildcard technologies*, p. ex. réalité augmentée, rapatriement de ressources spatiales, fusion nucléaire ...) ?
 - Technicisation accélérée, économie algorithmique et high tech ou technologies anciennes revisitées car sobres en ressources ? (p. ex. extension du transport ferroviaire, renaissance des voies navigables et des ascenseurs à bateaux, émergence et mise à échelle des solutions fondées sur la nature, doublement des systèmes automatisés et digitaux par des systèmes passifs, analogues et low tech...) ?

¹⁵² Business Finland, Potential Future disruptions

¹⁵³ Interreg Northwest Europe

¹⁵⁴ Emmanuel Hache, Futuribles, février 2023

2. Cinq trajectoires plausibles pour les infrastructures économiques au Luxembourg à horizon 2100

Sur base des bifurcations esquissées au chapitre précédent, nous allons maintenant dégager des trajectoires hypothétiques plausibles de l'évolution des infrastructures économiques au Luxembourg à horizon de la fin du siècle. Il s'agit des 5 trajectoires plausibles suivantes :

- Trajectoire T1 : **Technosphère nationale circulaire et adaptée aux extrêmes climatiques**
- Trajectoire T2 : **Mutualisation de méga-infrastructures en Europe**
- Trajectoire T3 : **Virtualisation des infrastructures**
- Trajectoire T4 : ***Carbon lock-in*, éléphants blancs et infrastructures échoués**
- Trajectoire T5 : **Micro-infrastructures décentralisées et résilience locale**

Pour le cas du Luxembourg et suivant l'analyse menée dans les pages précédentes, le pays pourrait emprunter une trajectoire isolée ou plusieurs trajectoires ou éléments de trajectoires, combinés, d'avenir infrastructurel. La séparation en 5 trajectoires bien nettes est une représentation simplifiée des possibilités bien plus imbriquées et superposées. Cette façon de faire vise à aider la compréhension et la communication.

Chaque trajectoire nécessite un fort apport en **recherche&développement**. A des degrés divers, chacune est donc basée sur l'innovation, qu'elle soit sociale, digitale ou écologique, et devra être appréciée pour ses capacités de résilience face aux disruptions diverses, écosystémiques, cybernétiques, cognitives ou sociales... Dans les pages suivantes, les 5 trajectoires et leurs déclinaisons technologiques possibles seront décrites en plus de détails.

T1. Technosphère circulaire et adaptée aux extrêmes climatiques

Dans cette hypothèse, le tissu bâti serait considéré de stock acquis ayant atteint son plafond, notion parfois décrite sous le terme **peak infrastructure**.¹⁵⁵ La prise nette de terre et de matériaux vierges est minimisée, voire progressivement éliminée. La biodiversité est rétablie grâce à la renaturation.

On parle dorénavant de **technosphère**, la somme des objets manufacturiers et matériaux artificiels, des machines, réseaux et infrastructures et des systèmes sociaux-économiques construits par l'Homme au courant des siècles derniers, en opposition à la **biosphère**, la vie organique et la masse de ce que la nature produit. Depuis 2020, il est estimé que, avec un poids cumulé de 30 billions de tonnes, la technosphère *man-made* pèse plus que la biosphère¹⁵⁶.

Les prix des matières premières ont augmenté face aux perturbations logistiques liée au redémarrage de l'économie mondiale suite à la crise sanitaire COVID. Les entreprises font face à une forte hausse des prix du fret, de difficultés de recrutement et de compétences. Les besoins en matières premières critiques (métaux et terres rares, microchips, ...) pour la transition énergétique augmentent. La décarbonation du ciment, son recyclage par broyage et réutilisation s'avèrent chers et difficiles. Les crises de l'eau et de la biodiversité s'amplifient, bien que rarement médiatisées en lien avec le secteur de la construction. Au Luxembourg plus qu'ailleurs, le parc bâti existant est en réalité peu occupé et les habitations sont en moyenne surdimensionnées. A cela s'ajoute que le pays est contraint par le manque de place pour les déchets inertes et terres d'excavation issus des chantiers de construction, une contrainte qui pèse lourd sur le budget de construction et sur l'environnement. Tous ces facteurs plaident en faveur de l'application des principes de l'**économie circulaire**¹⁵⁷ en construction, y compris pour ce qui est des infrastructures critiques.

Ainsi, à l'aide des chercheurs, ingénieurs, artisans et usagers, un vaste programme d'entretien, de réaffectation et d'extension de la durée de vie des constructions existantes sera déployé. De vieilles techniques sont revisitées et mise à échelle. Le développement du **béton cyclopéen** fait ses débuts.¹⁵⁸ Le mot d'ordre est : redimensionner et réduire, rénover et surélever, assainir et entretenir, déconstruire pour reconstruire, rallonger la durée de vie, reconverter et réaffecter cette technosphère, sans l'étendre davantage dans l'espace et sans augmenter l'apport de matériaux nouveaux, faits à grands frais environnementaux (acier, aluminium, verre, ciment, plastique...) ou importés de loin, creusant le bilan carbone et la dépendance extérieure du pays.

Exemples de technologies, compétences ou procédés potentiellement à l'œuvre dans cette trajectoire, inspirés de la cascade des 5 R de l'économie circulaire¹⁵⁹ :

Refuser et réduire les besoins de construction neuve :

- Réévaluation du bien fondé et de la taille des constructions,
- Multifonctionnalité, construction modulaire, mutualisation et densification des bâtiments et infrastructures existantes,
- Reconversion des friches industrielles,
- Déconstruction et démantèlement d'infrastructures obsolètes ou échouées,
- Désartificialisation de surfaces, en récupérer les matériaux et les destiner à de nouvelles affectations.

¹⁵⁵ PEAK INFRASTRUCTURE OR IS THERE STILL ROOM FOR GROWTH? EDHEC INFRA&PRIVATE ASSETS, 2023

¹⁵⁶ <https://courier.unesco.org/en/articles/unbearable-burden-technosphere>
<https://phys.org/news/2016-11-earth-technosphere-trillion-tons.html>
<https://theconversation.com/the-materials-used-by-humans-now-weigh-more-than-all-life-on-earth-heres-four-graphs-that-reveal-our-staggering-impact-on-the-planet-206720>

Steffen, W., Crutzen, P. J., & McNeill, J. R. (2007). The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature? *Ambio*, 36(8), 614–621. <http://www.jstor.org/stable/25547826>

¹⁵⁷ Stratégie économie circulaire Luxembourg, Ministère de l'Economie, 2021. <https://economie-circulaire.public.lu/fr/circular-economy.html>

¹⁵⁸ Non-armé, le béton cyclopéen est fait de morceaux de pierre et de mortier naturel. <https://actu.epfl.ch/news/retrouver-un-savoir-oublie-pour-fabriquer-un-beton/>

¹⁵⁹ R1 - **refuser** tous les produits à usage unique ; éviter ce dont nous n'avons pas besoin et **réduire** la consommation de biens;

R2 - **réutiliser** (**réparer, réusiner, réemployer, reconditionner**) tout ce qui peut l'être ;

R3 - **rallonger** la durée de vie des produits, **rendre robuste et réparable** ;

R4 - **recycler** tout ce qui ne peut pas être évité ou réutilisé ;

R5 - **régénérer** et **restituer** les écosystèmes sources des matières premières ; « **rendre à la terre** », composter tous les déchets organiques (rot en anglais).

Réutiliser l'existant et réaffecter les infrastructures fossiles :

- Prospection géologique dans les sols et sous-sols, réouverture de mines primaires et création de mines secondaires¹⁶⁰,
- Archéo-métallurgie – exploitation des crassiers à la recherche de métaux rares enfouis,
- *Urban mining* : Récupération de matériaux issus de la déconstruction tout en préservant le patrimoine architectural bâti,
- Réaffectation de mines pour extraction et stockage de chaleur (basse température) en vue d'alimenter des usines ou des réseaux urbains de chaleur ou pour le stockage d'eau¹⁶¹, de CO₂, d'énergie intermittente (stockage gravitationnel ou pompage turbinage),
- Rénovation énergétique du parc existant,
- Rétrofit de barrages hydroélectriques en stations de transfert d'énergie par pompage-turbinage (STEP), réhausse des murs de barrages,
- Réaffectation ou reconversion d'infrastructures « fossiles » :
 - Rétrofit des réseaux de gaz naturel existants en réseau de biogaz/H₂ vert/CO₂/chaleur... ;
 - Upgrade des *legacy grids* pour permettre l'extension de la pénétration de l'électricité intermittente dans le réseau ;
 - Reconversion d'actifs fossiles échoués (stations d'essences, aéroports régionaux, pistes de carting, circuit F1 ... ?) ou d'actifs et de branches économiques ne résistants pas au changement climatique (industrie agro-alimentaire, industrie des sports d'hiver, golfs, tourisme aquatique, ... ?)

Recycler ce qui ne peut pas être évité ou réutilisé :

- Une **refonte complète du système de recyclage**, non plus fondé sur l'atteinte d'une part maximale de quantité recyclée dans une grande quantité de déchets produits (le Luxembourg est parmi les champions de déchets/cap produit¹⁶²), mais sur une diminution (drastique dans le cas du Luxembourg) des quantités absolues de déchets produites tout en maintenant un fort objectif de recyclage du résidu de ces déchets produits. L'objectif est bien la réduction du volume absolu de déchets générés et le recours exclusif au recyclage de ce qui n'a pu être évité. Les réflexes à adopter sont : réfléchir par deux fois avant de démolir, garder en fonctionnement le plus longtemps possible, investir dans la maintenance, innover pour rallonger la durée de vie ...¹⁶³. Pour des constructions neuves qui ne peuvent pas être évitées, les apports matériels non-essentiels sont réduits et les parts récupérées et réutilisées avant mise au rebut augmentées. Une manifestation de cette refonte pourrait être le passage d'une industrie de fabrication de neuf, à une **industrie du mining de la technosphère** existante, p. ex. en démantelant et recyclant la première génération de panneaux photovoltaïques ou éoliennes arrivant maintenant en fin de vie, pour y sourcer les matériaux pour faire éclore la 2^{ème} génération.

En appliquant ces mesures, la technosphère deviendrait stable et ne s'étendrait plus dans l'espace. Un parc infrastructurel qui ne grandit plus en surface est plus facile à maintenir et à adapter aux intempéries et disruptions environnementales qu'un tissu bâti en constante extension. Ce qui nous amène à la 2^{ème} caractéristique de cette trajectoire, l'**adaptation des constructions aux effets destructeurs du changement climatique**.

La stratégie gouvernementale en cours pour l'adaptation aux effets du changement climatique au Luxembourg vise à réduire la vulnérabilité des infrastructures critiques face aux aléas climatiques afin d'éviter perturbations et défaillance.¹⁶⁴ Aux pressions climatiques s'ajoutent les impératifs de décarbonation de l'appareil productif et la raréfaction et le renchérissement des ressources naturelles. Les infrastructures critiques et grands

¹⁶⁰ « Valorisation des ressources métalliques contenues dans les minerais », SystExt, Rapport Mine secondaire et Recyclage, 4 mai 2024

¹⁶¹ Etude Université de Liège sur le potentiel des mines de schistes BE/LU

¹⁶² <https://www.europarl.europa.eu/topics/fr/article/20180328STO00751/gestion-des-dechets-dans-l-ue-faits-et-chiffres-infographie>

¹⁶³ Le soin des choses, Jérôme Denis, David Pontille, Ed. La Découverte 2023.

¹⁶⁴ MECDD (2018), Stratégie et plan d'action pour l'adaptation aux effets du changement climatique au Luxembourg 2018-2023. p.61-63

investissements économiques devront s'adapter à ces différentes contraintes, afin de continuer à assurer le fonctionnement de l'Etat, le développement économique et la protection de la population.

Pour ce faire, la criticité physique des infrastructures p. r. à la chaleur, la sécheresse, les vents, les inondations, est analysée en phase de conception pour dériver des programmations architecturales plus robustes face aux aléas météorologiques et hydrologiques imprévisibles. Une attention particulière est portée à l'adaptation d'infrastructures jugées vitales. Pour économiser des moyens et multiplier les co-bénéfices, l'on mise de plus en plus sur les **solutions basées sur la nature**,¹⁶⁵ car elles contribuent à la réhabilitation de la biodiversité. Ceci correspond en effet au dernier R de la cascade des 5 R de l'économie circulaire évoquée plus haut, celui concerné par la régénération des milieux. **Les infrastructures ainsi adaptées du futur stockent du carbone et de l'eau et produisent plus d'énergie que ce qu'elles ne consomment.**

Exemples de technologies, compétences ou procédés impliqués dans l'adaptation des infrastructures d'ici la fin du siècle¹⁶⁶:

- Protection des actifs contre l'excès d'eau, d'humidité, de chaleur, de froid, de vent ... ;
 - Redimensionnement et surélévation d'ouvrages (routes surélevées, voies fluviales approfondies, bâtiments sur pilotis ...)
 - Grandes infrastructures « vertes et bleues » de protection des constructions contre l'eau (plaines d'inondations, digues végétées, *sponge cities*, zones humides réhabilitées, ...), contre la chaleur (arbres et espaces verts urbains, corridors d'air frais, bio-climatisation ...), ou contre les glissements de terrain, les coulées boueuses (afforestation, fertilité du sol, pentes en terrasse, ...) ou le gonflement -retrait des argiles,
- Déploiement de la *Duebelstrossescheet*¹⁶⁷: redondance des infrastructures vitales, duplication de fonctions essentielles et capacités tampon en cas de blackout ou de catastrophes, fonctionnement on et off-grid, solutions mécaniques et digitales qui se compensent, ...
- Nouvelles infrastructures pour l'adaptation de la production alimentaire : stockage inter-saisonnier d'eau, systèmes d'irrigation agricole, viticole et maraîchère à p. des eaux grises¹⁶⁸, murs à arbres fruitiers, *urban farming* (PDAT), agro-foresterie, culture de légumineuses, ...;



Figure 35: Exemple de protection des actifs par des solutions basées sur la nature, selon la Vision ECO2050¹⁶⁹

¹⁶⁵ A once-in-a-generation opportunity: How green infrastructure saves lives and livelihoods, EDWIN LAU | JUNE 09, 2021 <https://blogs.worldbank.org/ppps/once-generation-opportunity-how-green-infrastructure-saves-lives-and-livelihoods>

¹⁶⁶ Le Luxembourg en 2050, territoire décarboné, circulaire et résilient, P. Junker, 2020, p. 119 et 145

¹⁶⁷ P. ex. Station de production d'eau potable, Esch sur Sûre, qui présente 2 filières indépendantes : « Pour des raisons de sécurité d'approvisionnement, la capacité de traitement nominale de 110'000 m3 par jour est répartie en 2 filières, séparées respectivement par des murs et des portes coupe-feu, d'une capacité de 55'000 m3 par jour chacune. Ainsi, en cas d'incident majeur mettant hors service une des 2 filières pour une longue durée, la 2ème restera en parfait état de fonctionnement et assurera, avec la capacité de la solution de recharge du SEBES, l'approvisionnement en eau destinée à la consommation humaine du réseau de distribution des membres du SEBES. La nouvelle station de prise d'eau servant au transfert de l'eau du barrage vers la station de traitement, sera également conçue de façon à prélever de l'eau brute directement à partir de la Sûre. Ceci permettra au SEBES de maintenir une production d'eau potable en situation de vidange du réservoir. » https://environnement.public.lu/fr/actualites/2015/10/02_sebes.html

¹⁶⁸ projet Réut, Ministère Agriculture France, 2023.

¹⁶⁹ Vision ECO2050, <https://luxstrategie.gouvernement.lu/fr/publicationsbis/rapport-vision-eco2050.html>

The Dutch water defences industry, a public good and a business case

NL Delta plan for achieving flood protection, freshwater availability and spatial adaptation goals by 2050. Delta Fund 2021-2034, EUR 19 billion

Delta Commissioner Peter Glas:

"The time for freedom of action is over: we need to speed up to keep our delta safe and liveable."

"The urgency is increasing, due to the changing climate. Such investments are especially crucial now to sustainably foster our economy and to enhance the resilience of our society. With Covid, we have experienced, more than ever before, how important it is for our vital sectors such as health care, IT, and the power, gas and drinking water supply, to continue to operate during a crisis. Measures to climate-proof vital and vulnerable functions must be intensified."

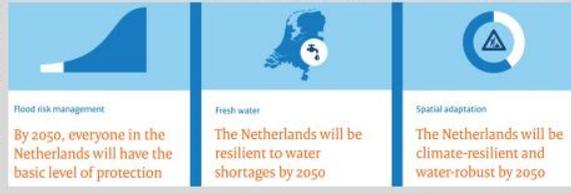


Figure 36: Exemple de *clean tech* devenu produit et savoir-faire d'exportation, selon la Vision ECO2050¹⁷⁰

¹⁷⁰ Vision ECO2050, <https://luxstrategie.gouvernement.lu/fr/publicationsbis/rapport-vision-eco2050.html>

T2. Mutualisation et massification de méga-infrastructures en Grande Région et en Europe

Dans cette hypothèse, un building boom est en route pour réaliser le « net zero ». La transition énergétique devient **le plus grand projet de construction dans l'histoire** des pays industrialisés, après la mise en place initiale, pendant 200 ans, de la technosphère et sa reconstruction après la 2ème guerre mondiale.

L'interdépendance entre infrastructures critiques s'accroît à travers l'Europe. Les grandes infrastructures existantes et nouvelles seront modernisées, étendues, adaptées et construites de concert avec les pays limitrophes (« Grande Région ») ou au niveau du continent, voire au-delà des frontières européennes. Sont principalement visées les infrastructures publiques stratégiques et critiques pour la génération, la gestion et le stockage d'énergie, d'eau et de matériaux. Elles seront d'office conçues pour résister aux extrêmes climatiques et aux attaques malveillantes (voir trajectoires précédente et suivante).

La construction de larges structures peut être prohibitive en termes de ressources et coûts. Pour des raisons économique, stratégique, géopolitique ou spatiale et vu les contraintes matérielles et financières des Etats pris individuellement, construire grand et répartir les travaux sur plusieurs pays promet une minimisation des coûts.¹⁷¹

Grâce aux économies d'échelle résultant de la mise en commun aux meilleurs endroits ou de manière pan-européenne, aux innovations en matière de substitution de matériaux de construction basés sur les énergies fossiles, à l'efficacité dans les procédés de construction, l'Europe et ses Etats membres retrouveraient une certaine marge de manœuvre en matière d'indépendance énergétique et matérielle. « **Do something big** » est aussi une réponse à la hauteur des défis de transition. Pour dépasser les logiques nationales en matière d'infrastructures critiques, un grand programme pan-européen de planification et d'investissement en infrastructures vitales mutualisés, du type **Plan Marshall** post-fossile, sera ainsi déroulé.

Actuellement le Luxembourg est peu concerné par les grands projets européens de raccordement énergétique, fluvial ou ferroviaire (voir fig. 38 CINEA *Projects of Common Interest* page suivante).

Exemples de technologies, compétences ou procédés impliqués dans cette trajectoire qui pourraient être d'intérêt pour le Luxembourg d'ici 2100 :

Infrastructures transeuropéennes d'énergie

- **Gestion énergétique en consortium de pays en fonction de leur dotation naturelle** : p.ex. génération en parc éolien en mer ou par *concentrated solar power* dans le désert, financés par des pays enclavés ou peu ensoleillés ; stockage d'énergie sur différentes durées, stockage gravitationnel d'énergie en mines ; stockage d'eau et géothermie profonde (5 000 m) selon les gisements transfrontaliers, capture et stockage technologique et naturelle de CO₂ en fonction des conditions géologiques et écologiques¹⁷² ; stockage en station de pompage-turbinage selon la topographie (voir encadrés pages 33 et 72/100 et fig. 37).

¹⁷¹ <https://www.bruegel.org/policy-brief/unity-power-power-unity-why-eu-needs-more-integrated-electricity-markets>

Sharing backup capacity reduces the total back-up investment need: A major benefit of integration would be the reduction in demand for backup capacities, which are needed to ensure secure electricity supply during periods with low availability of variable renewable electricity generation. Compared to isolated markets, an integrated energy market would need 19% less back-up capacity in 2030, with our estimates suggesting this could reach savings of more than 50 gigawatts of back-up generation capacity in 2050. Hence, the amount of back-up capacity needed in a system dominated by renewable generation will be much lower if EU countries cooperate in the dimensioning and the provision of such a system.

¹⁷² L'accord de coalition 2023 -2028 prévoit que « le potentiel des technologies Carbon Capture and Utilisation (CCU) et Carbon Capture and Storage (CCS) sera évalué dans l'optique de soutenir leur développement à l'étranger pour la décarbonation de quelques secteurs très spécifiques, comme l'industrie du ciment. Le cas échéant, une infrastructure de transport de CO₂ adéquate sera développée. »

- **Marché unique européen de l'énergie et « Euro Supergrid »**¹⁷³ : renforcement et interconnexion du réseau (bidirectionnel) de transport d'électricité, construction de lignes électriques à haute tension pour lier les centres de production massive et rentable de renouvelables (p. ex. éolien en Europe du Nord, solaire en Europe du Sud, ...) aux centres de consommation densément peuplés. (voir carte ci-contre¹⁷⁴).

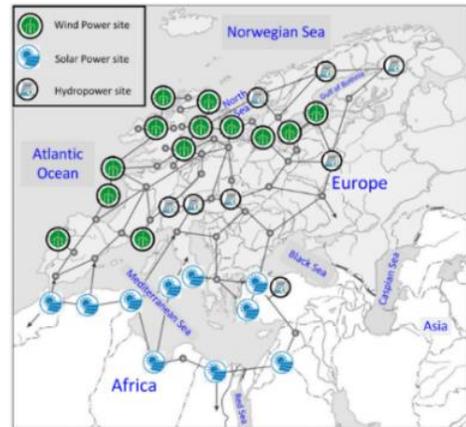


Figure 37: A conceptual plan of a European supergrid linking renewable energy projects

- **European H₂ backbone**: réseau européen de gaz bas carbone, tel que le biogaz ou H₂ vert, avec, pour le Luxembourg, une liaison Anvers – Liège – Luxembourg ou un raccord au H₂Kernnetz allemand¹⁷⁵ via le projet régional MosaHYc entre la Saar, le Grand Est et le Luxembourg consistant en un îlot local de transport d'H₂ vert pour l'industrie lourde
- Augmentation de **taille et de longévité** des équipements connexes : grandes centrales de production d'électricité et de chaleur ; éoliennes XXL (à structure Tour Eiffel, plus haut que 300m), *heat-highways*, grandes unités d'électrolyse, de convertisseur, de batterie (*Grossbatteriespeichen*), méga-pompes à chaleur (*Riesenwärmepumpen*), y compris fluviales ...

Infrastructures transeuropéennes de transport

- Bateaux cargo propulsés par voile et alimentés par photovoltaïque, hydrofoil ou catamaran, extension et interconnexion européennes des voies navigables avec installation d'un réseau fluvial de *battery swap*
- Raccordement du Luxembourg au réseau continental de trains de marchandises et trains de nuit et aux voies fluviales de grand gabarit
- Réseautage de stations de recharge électrique pour camions en remplacement des stations de services,
- Déconstruction ou réaffectation d'aéroports sous-régionaux non-compétitifs et offres alternatives de transport en train/bus pour vols à courte distance¹⁷⁶

Le Green Deal, nouveau « Plan Marshall post-fossile », sans le Luxembourg ?

Le « Green Deal » (plan vert) de l'UE, un catalyseur important pour la réalisation des objectifs de décarbonation de l'Union pour 2030 et 2050, prévoient un grand nombre d'initiatives pour réaliser ces infrastructures et réseautages essentiels : Les **réseaux transeuropéens d'énergie** (RTE-E) sont une politique axée sur l'interconnexion des infrastructures énergétiques des pays de l'UE. Dans le cadre de cette politique, onze corridors prioritaires et trois domaines thématiques prioritaires ont été identifiés. Les **projets d'intérêt commun (PIC)** et les **projets d'intérêt mutuel (PIM)** sont des projets d'infrastructures énergétiques reliant les

¹⁷³ Supergrid Super Solution – The Key to Solving the Energy Crisis and Decarbonising Europe, Eddie O'Connor, Kevin O'Sullivan, 23 Feb, 2023. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-07-28/video-global-supergrids-could-be-the-future-of-energy-if-we-let-it>

¹⁷⁴ Imdadullah; Alamri, B.; Hossain, M.A.; Asghar, M.S.J. Electric Power Network Interconnection: A Review on Current Status, Future Prospects and Research Direction. *Electronics* 2021, 10, 2179. <https://doi.org/10.3390/electronics10172179>

¹⁷⁵ Wasserstoff-Kernnetz, BMWZ Presentation 14.1.2023, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/wasserstoff.html>
Habeck kündigt fast 10.000 km langes Wasserstoffnetz an, Kosten 20 Mrd EUR, für den Transport von bis zu 270 TWh in 2032. https://fnb-gas.de/wp-content/uploads/2023/11/2023-11-14_Wasserstoff-Kernnetz_Karte-1.png

¹⁷⁶ La Grande Région dispose de 7 aéroports répartis dans les différentes entités et qui évoluent à 2 vitesses. Ainsi, en dix ans, l'aéroport de Charleroi a triplé son nombre de passagers et l'aéroport de Luxembourg-Findel l'a doublé. A contrario, les petits aéroports ont tendance à stagner voire à diminuer fortement, à l'image de l'aéroport de Metz-Nancy-Lorraine, Liège ou Sarrebruck. Les aéroports de la Grande Région sont confrontés à une rude concurrence interne et externe, avec la proximité des plus grands aéroports internationaux d'Europe. https://www.sig-gr.eu/fr/cartes-thematiques/transports/Infrastructures/transport_personnes_echelle_supraregionale.html

pays de l'UE entre eux (PIC) et avec des pays tiers (PIM).¹⁷⁷ La carte ci-contre montre les PIC continentaux planifiés. Aucun ne concerne actuellement directement le Luxembourg.

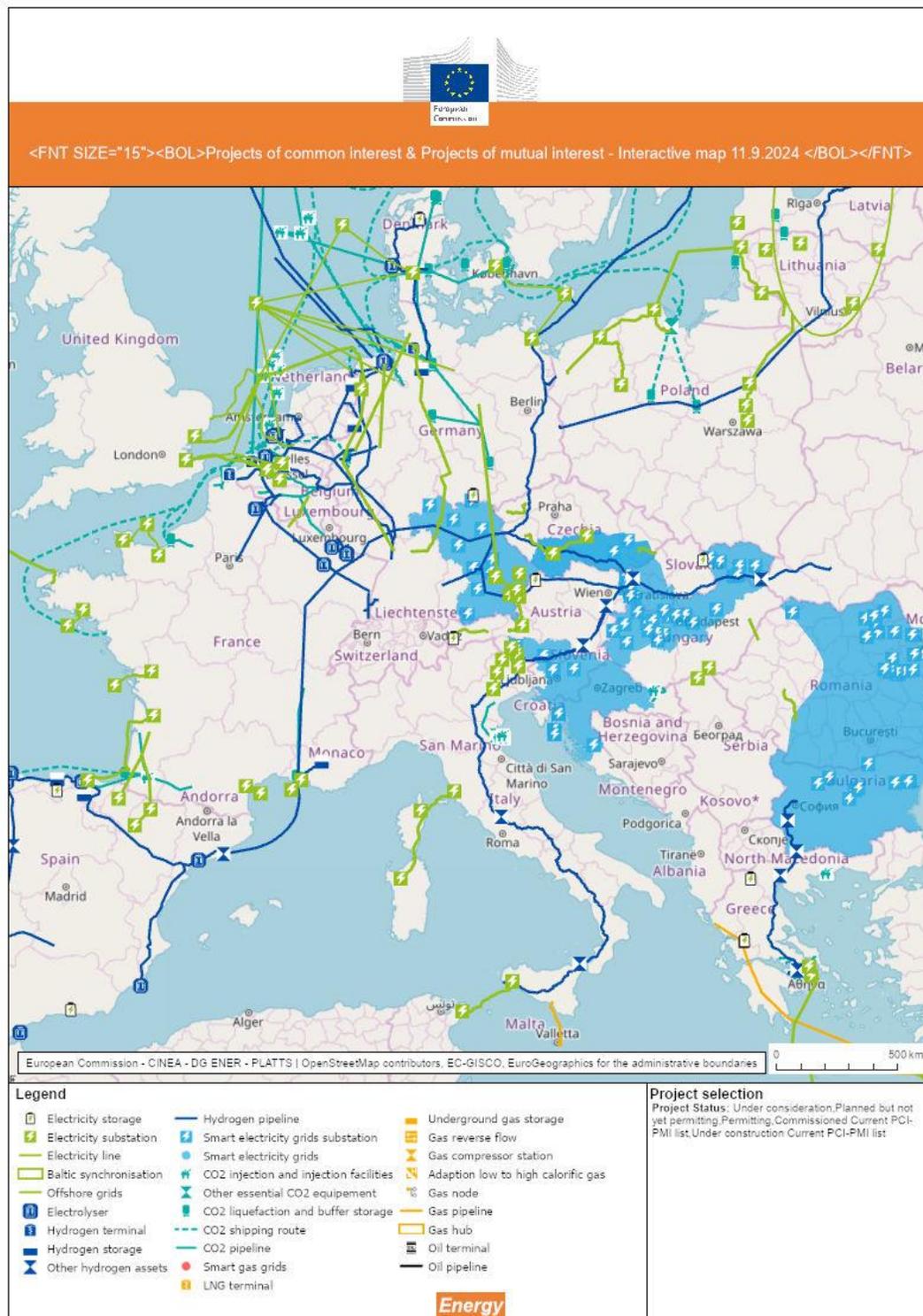


Figure 38: Interactive map of Projects of common interest & Projects of mutual interest, EU CINEA¹⁷⁸

¹⁷⁷ https://cinea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility/energy-infrastructure-connecting-europe-facility-0/energy-infrastructure_en accédé en avril 2024

¹⁷⁸ https://ec.europa.eu/energy/infrastructure/transparency_platform/map-viewer/main.html accédé le 11 sept. 2024

Le Luxembourg n'est pas directement impliqué dans les IPCEI. Il est indirectement associé à un IPCEI par sa participation financière au **projet MoSaHyc** (*Moselle Sarre Hydrogène Conversion*). Porté par les opérateurs de réseaux de distribution Creos-Allemagne et de transport GRTgaz (France) en coopération avec le groupe énergétique Encevo (Luxembourg), ce projet a comme ambition d'être un projet européen et transfrontalier pionnier dans la Grande Région englobant la Sarre, le Grand Est et le Luxembourg, en offrant une première infrastructure servant de modèle pour le transport transfrontalier de l'hydrogène vert (voir carte ci-contre).

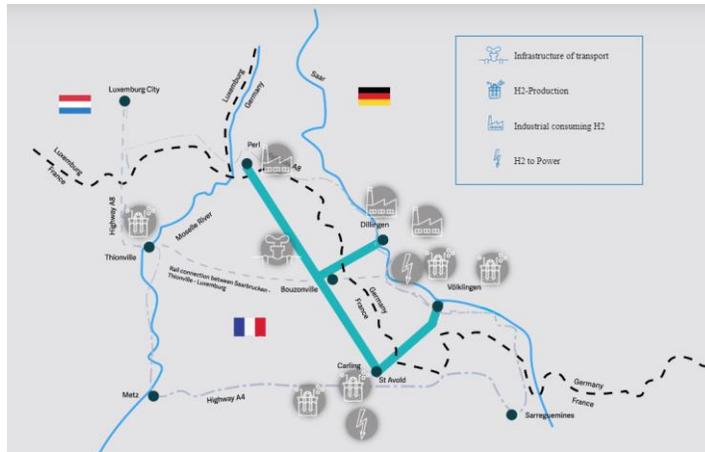
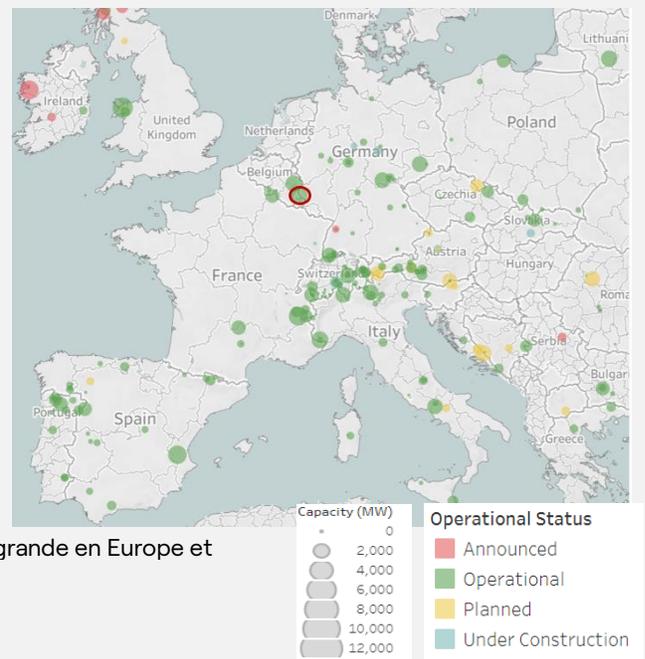


Figure 41: Projets Hydrogène en Grande Région¹⁸⁴

D'autres technologies éprouvées pourraient connaître un renouveau en Europe, tel que les stations de transfert d'énergie par pompage-turbinage (voir encadré ci-contre et p. 33/100) ou les canaux pour le transport bas carbone de fret.

Les stations de transfert d'énergie par pompage-turbinage (STEP), un renouveau dans le cadre de la transition énergétique ?¹⁸⁵

- La Tamega Giga Battery Hydroelectric Power Plant, une des plus grandes centrales développées en Europe dans les dernières 25 années, a été inaugurée en 2022. Située au nord du Portugal, elle a une capacité de 1 150 MW (similaire à la SEO à Vianden) et est ainsi un élément clé dans la stratégie de décarbonation du Portugal¹⁸⁶. Les coûts de ce projet gigantesque se sont élevés à 1,5 milliards EUR.¹⁸⁷
- Les régions de croissance sont actuellement l'Asie et l'Afrique. En Europe, surtout le Portugal, la Suisse et la Turquie investissent dans cette méthode de stockage d'énergie facilitant une meilleure pénétration des énergies intermittentes dans le réseau.
- La carte ci-contre montre la capacité des stations existantes, en planification, annoncées et en construction.
- La station à **Vianden** (encerclé en rouge) est une des plus grande en Europe et occupe une place stratégique en Europe centrale.¹⁸⁸



¹⁸⁴ Source : <https://grande-region-hydrogen.eu/fr/grande-region-hydrogen-map-francais/>

¹⁸⁵ Les stations de transfert d'énergie par pompage-turbinage (STEP) sont aussi appelées centrales à accumulation par pompage. World Hydropower Outlook 2030, Rapport : <https://indd.adobe.com/view/92d02b04-975f-4556-9cfe-ce90cd2cb0dc>

¹⁸⁶ [Roadmap for carbon neutrality 2050](#), p.31

¹⁸⁷ Plus d'informations sur le projet, voir [Iberdola](#) (entreprise en charge du projet) et ce [reportage](#) apparu dans les médias allemands.

¹⁸⁸ Carte : <https://www.hydropower.org/hydropower-pumped-storage-tool>

Croire aux voies navigables : Un exemple proche du Luxembourg de mise à l'échelle d'infrastructures transeuropéennes de transport est l'élargissement du gabarit de l'imposant **Canal Albert**, artère économique de 130 km reliant depuis 1939 les bassins de la Meuse et de l'Escaut, pour rallier la zone industrielle de Liège au port maritime d'Anvers (voir encadré ci-contre). Pour augmenter sa capacité en passage de marchandises, 62 ponts seront réhaussés pour un budget est. de 240 mio EUR et une durée de construction s'étalant de 2014 à 2022. Un exemple à suivre dans la perspective du futur canal Seine-Nord¹⁸⁹ et de l'extension des canaux à grand gabarit comme alternative au transport aérien et routier de marchandises ?

On ne peut s'empêcher de penser au projet abandonné du **Canal de l'Ourthe à la Moselle** (voir fig. 10) qui aurait pu relier le port de Mertert à celui d'Anvers, diversifiant et raccourcissant de la sorte l'accès du Luxembourg à la Mer du Nord.

« Toutes les entités de la Grande Région recommandent le report modal des poids lourds vers le transport fluvial et ferroviaire. Or, trois routes fluviales traversent les différentes entités de la Grande Région à l'exception du Luxembourg. De même, aucune continuité fluviale à grand gabarit, du Luxembourg vers la mer méditerranéenne n'est assurée. »¹⁹⁰

Upgrading d'un canal européen clé : le canal Albert en Belgique¹⁹¹

- The Albert Canal is the most important inland waterway in Belgium. It transports nearly 40 million tons of goods and connects the Port of Antwerp and the Scheldt with the Port of Liège and the Meuse river. To improve its navigability, the Flemish Region in Belgium government decided to upgrade it as a major shipping route by **lifting 62 bridges** to enable the transit of vessels transporting 4 layers of containers. Other significant works include the widening of the Albert canal under certain bridges and near Antwerp, so that pushed convoys of up to 10,000 tons can navigate smoothly all along the waterway.
- Through two separate [Connecting Europe Facility](#) for Transport (CEF) projects, the EU supported the lifting of 20 of these bridges as well as a large part of the widening of the waterway. Bridges ensure road, rail, pedestrian, cycling and even tramway traffic over the Albert Canal (as seen in the picture).
- This major project is expected to boost inland waterway transport, increasing its efficiency and modal share, thereby reducing the climate impact of freight transport.



Le pont Theunis sur le canal Albert à Anvers

La situation du Luxembourg n'est pas plus enviable pour ce qui est de son raccordement au Réseau Transeuropéen de Transport (RTE-T) ferroviaire :

« Les connexions ferroviaires de la Grande Région avec les grandes métropoles européennes sont en perte de vitesse. La mise à grande vitesse sur l'axe Bruxelles-Namur-Luxembourg-Strasbourg-Bâle (ex-projet EurocapRail) n'a toujours pas vu le jour. La liaison Bruxelles-Bâle via le Luxembourg a même été totalement supprimée en 2016 au profit d'un itinéraire plus performant via Paris ne passant plus par le Luxembourg. L'axe nord d'une autre liaison TGV/ICE majeure reliant Paris-Frankfurt via Sarrebruck, Kaiserslautern et Mannheim est menacé par une perte d'importance. (Il existe un) déficit entre la Lorraine et la Rhénanie-Palatinat avec l'absence de liaison performante Luxembourg - Cologne ou Luxembourg - Frankfurt notamment. »¹⁹²

¹⁸⁹ La liaison fluviale Seine - Escaut est inscrite sur la liste des projets prioritaires du réseau trans-européen de transport (RTE-T) et constitue un des projets majeurs du réseau central, identifié comme un goulet d'étranglement du corridor Mer du Nord - Méditerranée. Source : https://www.canal-seine-nord-europe.fr/?doing_wp_cron=1714904624.0451519489288330078125

¹⁹⁰ Transport de marchandises en 2018: échelle suprarégionale, Système d'information géographique de la Grande Région, https://www.sig-gr.eu/fr/cartes-thematiques/transports/Infrastructures/transport_marchandises_echelle_supraregionale.html

¹⁹¹ https://cinea.ec.europa.eu/featured-projects/upgrading-key-european-canal_en

¹⁹² Ibid. note de bas de page 162

T3. Virtualisation des infrastructures

Quelle que soit la trajectoire, la construction et la numérisation sont intimement liées. Aux fins du présent exercice d'imagination de trajectoires infrastructurelles possibles à horizon 2100, la trajectoire T3 isole théoriquement cet aspect et le pousse à l'extrême. D'après l'adage « the biggest hotelchain has no rooms (Booking), the biggest retailer has no shops (Amazon), the biggest taxi company has no cars (Uber) »¹⁹³, la trajectoire entrevoit une **virtualisation et numérisation** des infrastructures, sans que l'on puisse toujours prévoir leur impact sur le volume des constructions à réaliser.

Ceci est un monde où la virtualisation des constructions sur terre est fort influencée par les technologies explorées pour les domaines spatial et de la défense. C'est aussi un monde où l'enthousiasme pour l'intelligence artificielle ne s'estompe pas face à ces besoins colossaux en énergie et en eau.

Plusieurs façons de « virtualiser » les infrastructures, et les services ou produits qu'elles hébergent ou génèrent, peuvent être imaginées :

- En lieu et place de l'objet physique et de la propriété, l'infrastructure de l'avenir propose des services et des fonctions. Le besoin pour de nouvelles constructions s'en trouverait réduit. Ainsi la voiture personnelle est remplacée par le service de mobilité¹⁹⁴. La fabrique virtuelle est intégrée dans un système de *manufacturing as a service (MaaS)*¹⁹⁵,
- La présence physique n'est plus nécessaire pour effectuer une prestation. Le télétravail, les téléconférences, la télémédecine réduisent ainsi le besoin en surfaces construites. Le **remote tourism** (voir encadré ci-contre) réduit le recours aux avions,

Remote tourism in Iceland: The future of tourism and the end of tourist infrastructure?¹⁹⁶

In just six weeks, 700,000 'visit' the Faroes – over six times the number of in-person visitors for the whole of 2019

New Remote Tourism tool gives curious tourists that much-needed dose of escapism during lockdown, with 1,000+ joining virtual tours



- La production physique (p.ex. une turbine générant de l'électricité) est secondée par une « production » digitale (software optimisant les flux d'électricité dans un système énergétique distribué)¹⁹⁷. Ainsi l'électricité économisée par une articulation optimale entre offre intermittente et demande adaptable dans le temps est considérée comme une nouvelle source d'électricité,
- Les infrastructures physiques et digitales sont superposées pour devenir *smart*: « **Smart infrastructure solutions overlay data management, sense making and decision making onto physical infrastructure and**

¹⁹³ Hans van der Loo, Conférence Luxembourg Stratégie, 26 sept 2023

¹⁹⁴ Ex. : carpool and ridesharing companies, bicycle-sharing systems programs, scooter-sharing systems and carsharing services as well as on-demand "pop-up" bus services, self-driving cars, ...

¹⁹⁵ Manufacturing as a Service (MaaS) is a distributed system of production in which resources (including data and software) are offered as services, allowing manufacturers to access distributed providers to implement their manufacturing processes. MaaS allows to manufacture "on demand" a large choice of customised products, with high flexibility and short lead time, by using distributed facilities as a service and exploiting unused production capacities, also by rapid re-purposing of manufacturing machines. The objective will be achieved through platforms for fast data exchange and seamless, data-driven, standards-based automation of inter-company processes beyond the factory boundaries. <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/horizon-cl4-2024-twin-transition-01-03>

¹⁹⁶ <https://visitfaroeislands.com/en/about1/marketing-development-campaigns/remote-tourism>

¹⁹⁷ Par infrastructures virtuelles, on entend « separating physical hardware from an operating system into a virtual environment. With virtual infrastructure, we can remove the inefficiencies of physical hardware, such as physical space, cost, and maintenance. Virtual infrastructure retains the benefits of physical resources but transfers them to software to make virtual resources more accessible and flexible. Virtualization is the process of creating a software-based (virtual) version of something, whether it be computing, storage, networking or application." <https://sysgen.ca/what-is-virtual-infrastructure/>

connect them all together by communication ».¹⁹⁸ Un logiciel, appelé hyperviseur, est installé sur une machine physique. Il dissocie les ressources de la machine qui sont ensuite mises à la disposition d'environnements virtuels, les machines virtuelles. La virtualisation est l'une des options qui permettent de créer des clouds,

- Virtualisation dans le sens de la **dématérialisation** p. ex le remplacement de tâches manuelles par des flux numériques de travail, la conversion de documents papier en fichiers électroniques, la signature électronique dépersonnalisée et l'élimination du besoin d'imprimer, les services en ligne ou les moyens de paiement dématérialisés,
- Les infrastructures ne sont plus *place-bound* mais « **hors-sol** » : elles s'implantent là où le coût de leurs intrants sont les plus bas. P. ex des data centers se concentrent dans les bassins du *shale gas* aux Etats Unis. Ces infrastructures sont conçues, simulées, réalisées et gérées par le numérique et à distance. Elles sont réalisées en orbite ou sur d'autres planètes.

Pour certains, la digitalisation et ses promesses de dématérialisation, de gains d'efficacité et de temps, de confort et d'indépendance et de cohésion territoriale (éradication des « déserts digitaux ruraux ») est le *enabler* par excellence de la transition énergétique et infrastructurelle est un garant de reprise de la productivité.

Pour d'autres, c'est oublier son empreinte énergétique, matérielle et carbone, l'effet rebond et les effets du digital sur les capacités des humains à maintenir les systèmes vitaux en fonctionnement sans assistance externe.

Une opportunité p. ex de la numérisation dans les infrastructures consiste à exploiter les données générées par les bâtiments connectés. Les Virtual Power Plants accèdent aux données personnelles granulaires de chaque consommateur, minute pour minute, 24H/7. On estime qu'en général, 95 % des **données** produites ne sont jamais utilisées. Les données sont souvent cloisonnées dans différents fichiers, formats et systèmes, et ne sont pas faciles d'accès. En conséquence, les organisations risquent de prendre des décisions mal informées, car elles manquent de visibilité et d'informations. Au fil du temps, cette situation peut entraîner des problèmes de maintenance, tels que la corrosion, le manque d'énergie et de gestion environnementale et, dans le pire des cas, des risques pour la santé et la sécurité. Favoriser la numérisation serait donc essentiel pour décarboner l'industrie et les constructions. Les organisations pourraient tirer parti des solutions et des données numériques pour créer une meilleure infrastructure.

Cependant, la technicisation et la domotique augmentent les dépenses énergétiques et matérielle et l'aliénation de l'utilisateur.¹⁹⁹ Une simple conversation avec ChatGPT, composée de 10 à 50 questions, requiert 500 ml d'eau de refroidissement.²⁰⁰ La digitalisation s'accompagne d'une croissance de l'extraction minière de terres rares et métaux critiques pour la fabrication des équipements digitaux. Aux Etats Unis, les besoins en énergie de l'intelligence artificielle risquent de provoquer un report du *pushing-out* du charbon²⁰¹ ou une mainmise de cette technologie sur l'énergie nucléaire.²⁰²

Dans le bâtiment, la réparation manuelle directe n'est plus possible dans les systèmes virtuels. C'est aussi avec la technicisation et complexification digitale accrue des bâtiments et équipements que les promoteurs immobiliers et industriels font leurs marges.²⁰³

Dans cette trajectoire, le pari est fait de **ne pas adapter les infrastructures aux changements** des conditions climatiques et écosystémiques, mais de miser sur un système de prédiction et d'alerte précoce assisté par l'IA et les satellites de télédétection. Les populations recevront des alertes électroniques de catastrophes pour se mettre à l'abri et les bâtiments exposés seront sacrifiés, puis reconstruits.

¹⁹⁸ L'infrastructure intelligente fait référence à l'intégration de technologies avancées, d'analyses de données et de connectivité dans divers composants de l'infrastructure physique pour améliorer l'efficacité, la résilience et la durabilité. Ce concept s'étend au-delà des bâtiments individuels pour englober des systèmes d'infrastructures à plus grande échelle tels que les réseaux de transport, les services publics, les systèmes de communication, etc. <https://www.sciencedirect.com/topics/social-sciences/smart-infrastructure>

¹⁹⁹ France Stratégie, Anne Faure, Conférence Luxembourg Stratégie, 2022

²⁰⁰ OECD, *How much water does AI consume? The public deserves to know*, 2023

²⁰¹ AI's thirst for electricity risks slowing US coal phaseout, Financial Times, 30.5.24

²⁰² *Why the Future of AI Is Nuclear*, Built in, 4.6.2024. Future data centres may have built-in nuclear reactors, BBC, fév 2024

²⁰³ Albane Gaspard, Ademe-CSTB-Futuribles, Le bâtiment de demain, 2023

Exemples de technologies, compétences ou procédés impliqués dans cette trajectoire d'ici à 2100 :

- **Smart infrastructures, smart cities, smart demand management et smart grid** interconnectés (régulation physique de la stabilité et flexibilité du réseau électrique complétée par l'agencement digital de l'offre et de la demande).²⁰⁴ Des équipements connexes sont les *digital twins* pour la simulation d'infrastructures, le *wireless EV charging*, *autonomous supply platforms*, *autonomous driving*, 5G, 6G etc, les réseaux de fibre optique, de câbles sous-marins pour connectivité intercontinentale à large bande, ... ;



Figure 42: Wireless EV charging under development (2023)¹

- **Virtual power plant**²⁰⁵, un réseau de logiciels regroupant les points individuels de production et de stockage d'énergie en un seul grand réservoir d'électricité. Une centrale électrique virtuelle tire partie des systèmes interactifs de communication et de gestion de l'énergie pour optimiser et coordonner la répartition de la production distribuée, des charges interruptibles, des systèmes de stockage d'énergie et des stations de commutation de batteries, afin de les intégrer en tant qu'entité d'échange d'énergie avec le marché de l'électricité.

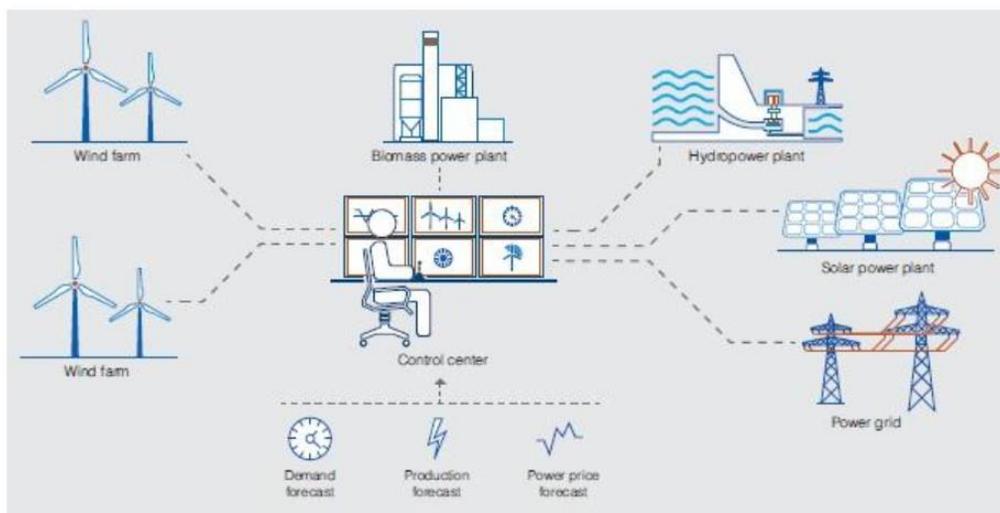


Figure 43: Schéma d'une centrale électrique virtuelle (Virtual Power Plant, VPP)²⁰⁶

- **Fabriques intelligentes, MaaS, Industrie 4.0 et l'Internet des objets industriels (IoT)**, composés d'infrastructures, de machines, de produits en cours de fabrication, finis ou en cours d'utilisation, et de collaborateurs, fournisseurs, clients, connectés²⁰⁷. L'IoT industriel est un système comprenant des capteurs intelligents, des machines, des outils, des plates-formes logicielles, des serveurs cloud et des applications. Des capteurs intelligents sont déployés à chaque étape de la fabrication pour des applications spécifiques. Ces réseaux de capteurs envoient en continu des données à la passerelle IoT (agissant comme un hub entre les appareils IoT et le serveur cloud) qui reçoit et transmet les données au serveur d'applications cloud pour traitement et analyse.

²⁰⁴ "We have created algorithms that can optimally schedule distributed energy resources within the grid – this includes making decisions on when to use onsite generators, how to operate storage devices, and when to call upon demand response technologies, all in response to the economics of using such resources and their physical constraints", Anuradha Annaswamy on building smart infrastructures and designing intelligent systems that could transform the way we travel and consume energy. Mary Beth Gallagher | Department of Mechanical Engineering MIT, January 24, 2022, <https://news.mit.edu/2022/3q-anuradha-annaswamy-building-smart-infrastructures-0124>

²⁰⁵ Energiepark Reiden SA. <https://energiepark.lu/nos-projets-r-d>

²⁰⁶ <https://www.next-kraftwerke.be/knowledge-hub/virtual-power-plant-vpp>

²⁰⁷ The Shift Project, Note d'analyse, Impact environnemental du numérique, 03/2021

Internet of Things Uses By Industry



Figure 44: Internet of Things uses by industry.²⁰⁸

- **Solutions digitales issues de la défense et de la sécurité, appliquées aux infrastructures²⁰⁹:**
 - *Computer vision for immersive scenarios, autonomous systems for sensing, thinking and decision-making in infrastructure planning and execution, automated damage identification, failure detection and remote testing*
 - *Development of agile systems combining data sources (sensors, satellite or drone earth observation ...) for improved adaptability (topography, weather, human behaviour, cyber-attack ...) and precision in understanding real-world conditions and complex settings of building sites.*
 - *Self-healing satellites, self-replicating, additive, composite or light-weight building materials resulting from data-driven computational modelling of materials and processes,*
 - *Light-weight design and 3D assembly of building components,*
 - Infrastructures de **cyber-résilience**, systèmes de protection des infrastructures face aux cyber-attaques.

²⁰⁸ Source : <https://bignerdranch.com/blog/what-the-internet-of-things-means-for-your-business/>

²⁰⁹ Ministère de l'Économie, Direction de la Défense, FNR, Luxinnovation Call for R&D projects in the area of dual-use defence solutions, infrastructure, industry, mobility, 15 avril 2024

T4. Infrastructures échouées et carbone verrouillé

Selon la trajectoire 4, le Luxembourg ne réussit pas à décarboner ses infrastructures, qui restent dépendantes des énergies fossiles, perdent en valeur et échouent (« stranded assets »).

A l'heure actuelle, les gouvernements, dans leur ensemble, prévoient toujours de produire plus du double de la quantité de combustibles fossiles en 2030 par rapport à ce qui serait compatible avec une limitation du réchauffement à 1,5°C. La persistance de l'écart de production mondiale met en péril une transition énergétique bien gérée et équitable.²¹⁰

« Le verrouillage carbone (*carbon lock-in*) fait référence à l'ensemble des **technologies, des infrastructures, des institutions et des normes** qui sont incohérentes ou incompatibles avec un avenir à faibles émissions de carbone et qui limitent les progrès vers cet objectif. Il s'agit d'un processus par lequel les barrières sociales, politiques et techniques à la décarbonation interagissent pour créer une inertie favorisant le développement des énergies fossiles. D'autres sources de blocage sont institutionnelles, comme la reconduite ou mise en place de subventions pour la production et la consommation de combustibles fossiles, la dépendance des dépenses publiques vis-à-vis de la production et de la vente de combustibles fossiles à travers la génération de taxes et de redevances ou les accords d'investissement internationaux qui permettent aux investisseurs étrangers de poursuivre un gouvernement lorsque de nouvelles politiques et règles sont instituées qui affectent leurs bénéficiaires. Le risque de verrouillage du carbone peut également provenir de facteurs culturels ou comportementaux, tels que la préférence pour les voitures particulières pour le transport. »²¹¹ On pense notamment à la relance récente de centrales à charbon ou au gaz en Allemagne.

L'échec d'infrastructures peut concerner les systèmes haut-carbone, tout comme les systèmes bas-carbone. Sans stockage ou back up pour les périodes de *Dunkelflaute*, sans renforcement du réseau et flexibilisation de l'offre et de la demande, les énergies renouvelables intermittentes peuvent se retrouver échouées et *curtailed*. Pour ne pas les perdre, elles sont injectées dans le réseau à perte provoquant des prix négatifs. Ce phénomène est amplifié si une surcapacité de renouvelables a été installée pour compenser leur intermittence et leur moindre densité énergétique comparée aux énergies nucléaires ou fossiles.

Le graphique ci-contre montre l'intensité carbone de certaines infrastructures et technologies énergétiques et leur durée de vie type. Cette métrique permet d'appréhender le degré de verrouillage carbone sur le long terme.

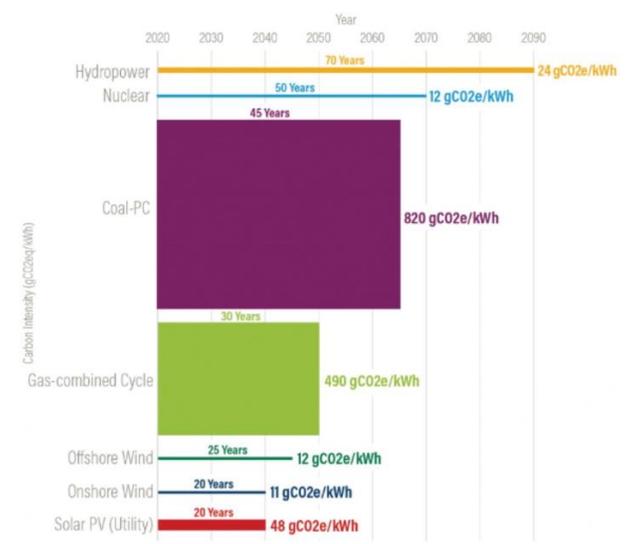


Figure 45: Émissions sur l'ensemble du cycle de vie et durée de vie typique des infrastructures et des équipements²¹²

²¹⁰ <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/explainers/what-are-stranded-assets/> ; <https://productiongap.org/2023report/>

²¹¹ Stockholm Environment Institute <https://www.sei.org/features/qa-what-is-carbon-lock-in/>

²¹² World Resources Institute <https://climateinstitute.ca/locking-out-carbon-lock-in-part-1/#:~:text=At%20first%20glance%2C%20carbon%20lock,years%20or%20decades%20to%20come.>

Nombreuses technologies invoquées pour devenir neutre en carbone n’existent pas encore ou ne sont pas matures ou à échelle (H₂, Carbon Capture and Storage (CCS), fusion, ...). Cette incertitude freine les investissements. D’autres technologies présumées « de transition » entre régimes haut- et régimes bas-carbone, telles que le charbon, le gaz ou l’énergie nucléaire, peuvent devenir définitives. La bureaucratie est un autre frein au démarrage ou à l’achèvement de nouvelles infrastructures, dont certaines risquent de rester en rade.

Il est aussi incertain si les prix des renouvelables restent bas à moyen terme. Les risques de transition et de régulation rendent cette perspective peu vraisemblable. Une note interne au FMI met en garde contre « a decreasing likelihood of continuous cost reduction in renewable energies. Factors of a reversal of the renewable energy cost reduction and an **upward pressure on the cost of renewable** energy technologies include higher interest rates, supply chain disruptions, permitting lags, higher prices for critical materials, semi-conductors and bulk material like steel and cement, transmission capacity and grid stability ». La note identifie une résistance des legacy industries: « Carbon lock-in sets the stage for further hurdles on the path to a low carbon-economy. Dominant industries and coalitions (such as fossil fuels and other carbon-intensive sectors) have powerful incentives to intensify their efforts to protect the value of their assets against measures perceived as “stranding” them ».²¹³

Sont concernés toutes les infrastructures liées directement aux énergies fossiles et tous les investissements dans ces énergies, que ce soit de la part d’investisseurs privés ou publics, de banques et de la **place financière** ou des **fonds de pensions**, avec des pertes de revenus qui s’étendront sur les salariés, les fournisseurs et les bénéficiaires de transferts sociaux. En fin de compte, les pertes sont supportées par les gouvernements.²¹⁴ (voir graph. ci-contre)

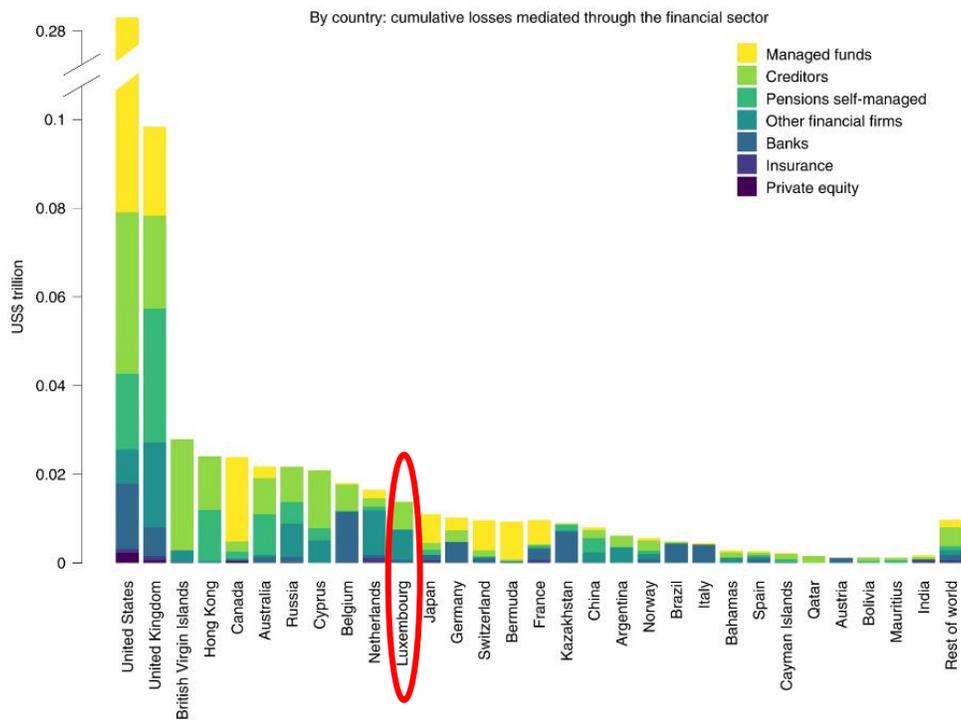


Figure 46: Stranded fossil-fuel assets translate to major losses for investors in advanced economies. Cumulative losses by listed companies and in financial markets.²¹⁵ (le Luxembourg encerclé en rouge)

²¹³ IMF Staff Climate Note 2023/003, Energy Transition and geoeconomic fragmentation – implications for climate scenario design, 2023
²¹⁴ “to get an idea of the scale, global estimates of potential stranded fossil fuel assets amount to at least \$1 trillion. In 2022 Semieniuk et al. estimated that around \$1.4 trillion in oil and gas assets globally are at risk of becoming stranded. “(There exists) a strong exposure of non-bank financial institutions, in particular pension funds, to stranded-asset risk. One key concern for supervisors should be that these are less regulated than banks, with lower understanding of contagion potential within the financial system”, Semieniuk, G., Holden, P.B., Mercure, J.F. et al. Stranded fossil-fuel assets translate to major losses for investors in advanced economies. Nat. Clim. Chang. 12, 532–538 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01356-y>
²¹⁵ Semieniuk, G., Holden, P.B., Mercure, J.F. et al. Stranded fossil-fuel assets translate to major losses for investors in advanced economies. Nat. Clim. Chang. 12, 532–538 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01356-y>

En Europe, les secteurs de la construction et de l'énergie sont les plus exposés au blocage de leurs actifs.²¹⁶ Le Luxembourg se trouve dans la favorable situation de ne pas avoir d'extraction d'hydrocarbures ou de grandes centrales à charbon ou au gaz sur son territoire.²¹⁷ Par contre le budget public est très dépendant des rentrées fiscales issues de la vente de carburant fossile, un actif à terme échoué.²¹⁸ Avec cet actif, viennent des infrastructures et des emplois connexes.

L'horizon temporel de la prospective étant lointain, et dans l'hypothèse d'un échec de la décarbonation des *hard-to-abate-sectors* d'ici à 2100, le périmètre des actifs échoués s'étendrait à l'aviation, aux aéroports et au secteur touristique aérien et à toute construction ou machine basée sur les énergies fossiles (« *infrastructures produced from fossil reserves* »). Un paramètre à observer dans ce contexte est la quantité, la qualité et le prix de l'hydrogène vert annoncé pour être disponible rapidement. Une définition exhaustive engloberait toutes les infrastructures non-adaptées aux dommages potentiels et prévisibles émanant du changement climatique et tout actif lié à la combustion de biomasse sans garantie de séquestration dans le temps du carbone émis par sa combustion. Qui sait, peut-être l'IA échoue par sa phénoménale boulimie en données à lui ingurgiter, quitte à devoir les créer ex-nihilo ou de façon synthétique ?

Exemples de technologies, compétences ou procédés impliqués dans cette trajectoire :

- Passoires énergétiques et toutes constructions surdimensionnées, non-adaptées en terme climatiques, non-efficientes en termes énergétiques, foncières et matérielles,
- Centrales ou chaudières au gaz, fuel, charbon,
- Autoroutes et parkings pour voitures thermiques et infrastructures associés (stations d'essence...)
- Infrastructures d'importation, de distribution et d'entreposage d'énergies fossiles (bateaux, ports, entreposage, pipelines, ...)
- Infrastructures aéroportuaires, en cas d'échec des *Sustainable Aviation Fuels* (SAF) ou de l'injection de 35% H₂ vert dans les carburants aériens,
- Non-raccordement du Luxembourg aux réseaux transeuropéens d'énergie et de transports bas carbone (ferroviaire-fret, ferroviaire passager en trains de nuit, fret fluvial), enfermant la logistique nationale dans une trajectoire de mouvements et d'échanges internationaux intenses en carbone (aérien, routier) (voir trajectoire T2)
- Infrastructures associées à l'hydrogène (compresseurs, pipelines, bateaux, ...), en cas d'échec de H₂ vert ou de H₂ porté par les subsides et à haute intensité carbone,
- Infrastructures de géo-ingénierie en général et de CCS ou *Direct Air Capture* (DAC) en particulier, où cas où elles sont inefficaces dans la lutte contre le changement climatique.²¹⁹



Figure 47: Decommissioned rig platforms, which had been hauled to a Scottish harbor, await transport to scrapyards in 2018.²²⁰

²¹⁶ Stranded assets and renewables, How the energy transition affects the value of energy reserves, buildings and capital stock, Irena 2017

²¹⁷ Europe's stranded assets: Mapped, Politico juin 2020. <https://www.politico.eu/article/stranded-assets-europe-mapped-energy-climate/>

²¹⁸ "Governments that are highly dependent on revenue from fossil fuels are likely to be the most significantly affected, and delayed action will potentially make the process of adjustment difficult. The ability to borrow from capital markets could be curtailed, with credit rating downgrades occurring as the implication of fiscal impacts becomes clearer. In contrast, timely action to diversify the tax base should reduce the risk of fiscal shocks, Stranded assets and renewables, How the energy transition affects the value of energy reserves, buildings and capital stock, Irena 2017

²¹⁹ L'accord de coalition 2023 -2028 prévoit que « le potentiel des technologies Carbon Capture and Utilisation (CCU) et Carbon Capture and Storage (CCS) sera évalué dans l'optique de soutenir leur développement à l'étranger pour la décarbonation de quelques secteurs très spécifiques, comme l'industrie du ciment. Le cas échéant, une infrastructure de transport de CO₂ adéquate sera développée. »

²²⁰ Jeff J Mitchell/Getty Images, <https://e360.yale.edu/features/as-north-sea-oil-wanes-removing-abandoned-rigs-stirs-controversy>

T5. Micro-infrastructures décentralisées et résilience locale

La trajectoire 5 projette l'avènement de micro-infrastructures décentralisées. L'objectif est la résilience entrepreneuriale, communale et communautaire locale par une prise en main par les entités décentralisées, communes, entreprises privées ou organisations citoyennes de leur approvisionnement élémentaire et infrastructures de base (*Daseinsvorsorge*).

Les **ressources présentes sur le territoire** (compétences et savoir-faire, eau, soleil, vent, topographie, sols et minerais, biomasse, géothermie...) sont conjuguées localement pour assurer une meilleure autonomie et efficacité énergétique, alimentaire, hydrique ou matérielle au bénéfice des communautés résidentes et des entreprises. Ceci peut se faire en dépit des initiatives nationales ou européennes, lentes et chères à mettre en oeuvre, ou en complément à celles-ci, *on-grid* ou *off-grid*. Ces infrastructures et réseaux sont par conséquent petits en taille et étendu. Les micro-structures peuvent se combiner aux mégaprojets ou fonctionner en *stand-alone*. Elles sont souvent accompagnées par la mise en place d'une gouvernance locale de préparation et de remédiation.

Cette trajectoire cumule des éléments déjà présents dans certaines des trajectoires précédentes : circularité, adaptation aux aléas climatiques, virtualisation, digitalisation, autonomie, innovation. L'aboutissement de cette trajectoire serait des systèmes locaux autonomes d'approvisionnement de base fondés sur les principes de l'auto-détermination, du travail collectif, des biens communs, de la fermeture des cycles bio-régionaux (nutriments, eau, carbone, biomasse...).

Ces micro-infrastructures décentralisées permettent aux firmes et communautés de se remettre (*bounce back*) rapidement après une disruption, telle qu'une coupure de courant, contamination, tempêtes.... Si une région est coupée du reste du pays suite à un désastre, elle peut fonctionner en mode isolé, le temps de rétablir les communications.

L'accord de coalition « Lëtzebuerg fir d'Zukunft stäerken » 2023-2028 du gouvernement du Luxembourg vise l'auto-production, -consommation et -stockage décentralisés d'énergie et la mise en place d'un **fonds citoyen** afin de contribuer au financement de projets dans le cadre de la transition vers les énergies renouvelables. Les aides étatiques continueront à être orientées de manière à favoriser l'autoconsommation de l'énergie produite, tant au niveau individuel que collectif ou de l'entreprise.

Exemples de technologies, compétences ou procédés impliqués dans cette trajectoire pour le Luxembourg d'ici à 2100 :

- **Systèmes électriques distribués** (voir graphique ci-contre): production, consommation, flexibilisation et stockage énergétiques locaux et décentralisés (régional ou communal) d'électricité afin décharger de l'électricité directement entre les ménages et les entreprises (prosumers – consumers) résidents dans la région, tout en contribuant à la stabilité du réseau centralisé.

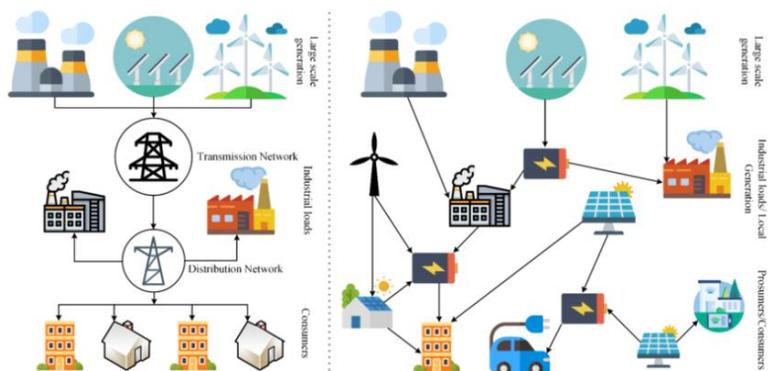


Figure 48: Distributed power systems (as opposed to centralised power systems)²²¹

²²¹ Market Design for Peer-to-Peer Energy Trading in a Distribution Network with High Penetration of Distributed Energy Resources, 2019

- **Stratégie de flexibilité énergétique décentralisée** (voir graphique ci-contre): La part croissante des énergies renouvelables dans nos réseaux électriques demande plus de flexibilité et de stockage d'énergie. Plus de flexibilité de stockage peut être obtenue, entre autres, avec une solution décentralisée qui consiste dans le couplage régional de plusieurs secteurs et vecteurs par la réalisation de microstructures. La stabilisation du réseau électrique peut aussi être assurée par de la flexibilité au niveau des consommateurs (pompes à chaleur et batteries domestiques, chargement de voitures électriques, stockage gravitaire de l'énergie en citerne d'eau sur le toit des bâtiments ...), de l'industrie et des commerces, grâce à l'équilibrage digital de l'offre et de la demande.

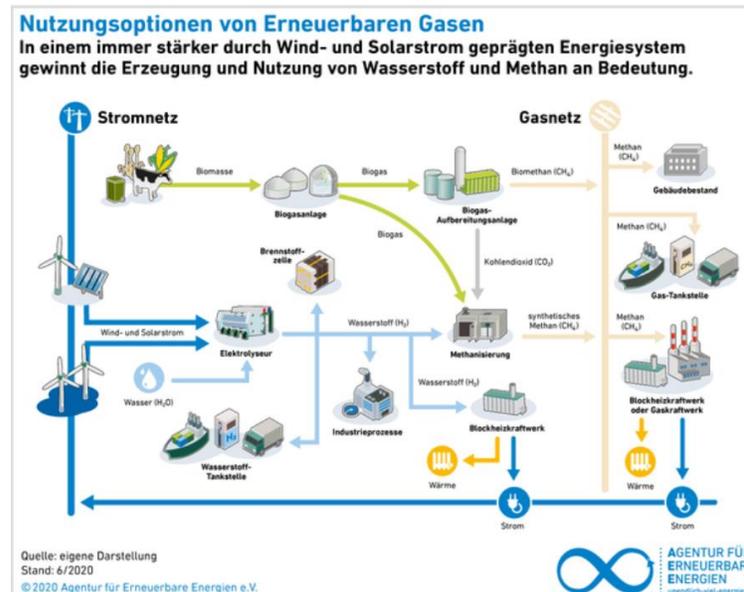


Figure 49: Nutzungsoptionen von erneuerbaren Gasen²²²

- **Nano-grids** pour petite entreprise commerciale avec une charge inférieure à 1 MW. Les nano-réseaux sont la mise en œuvre de ressources énergétiques distribuées à une échelle plus petite que les micro-réseaux traditionnels. Les nano-réseaux échappent aux limitations et aux fardeaux des sociétés de services publics et du réseau. Ils réalisent des économies d'énergie en tant que principale source d'énergie et continuent de fonctionner malgré les catastrophes naturelles ou les interruptions de service, permettant ainsi aux entreprises de répondre aux attentes et à la demande des clients.²²³

- Création de **micro-réseaux et de DAO** – Decentralised autonomous organisations pour la gestion locale d'électricité et la possibilité de *peer-to-peer energy trading*. Le *Energy Living Lab* du LIST teste actuellement les batteries gérées en communauté (voir ci-contre)

5 community-oriented batteries are being currently deployed



LIST

- Réalisation de petites centrales hydro-électriques (« Klein(st)wasserwerke ») et de petits STEP. Barques plus petites et peu profondes pour naviguer en eau basse en cas de sécheresse,
- Gestion forestière en commun, travaux saisonniers collectifs, pépinières et scieries en régie communale, boucheries et épicerias mobiles,

Mohsen Khorasany, Monash University (Australia)

²²² <https://www.unendlich-viel-energie.de/themen/strom/sektorenkopplung-mit-erneuerbaren-gasen-universal-energietraeger>

²²³ <https://gridironenergy.com/introducing-the-nanogrid-what-it-is-and-why-its-the-perfect-fit/>

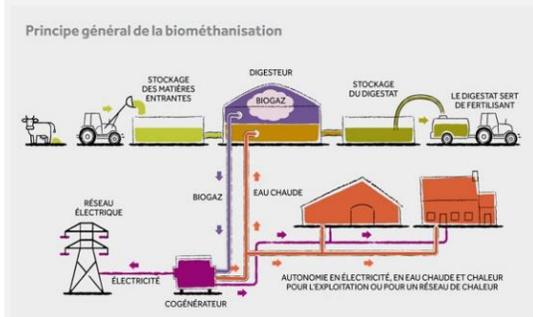
- Remise en état des systèmes médiévaux d'irrigation pour lutter contre la sécheresse avec création de communautés d'irrigants²²⁴

Illustrations d'un système intégré décentralisé d'énergie-matière

La **ferme du Faascht**, située en Lorraine belge, utilise la biométhanisation pour produire de l'énergie renouvelable et des fertilisants naturels. Avec ces intrants, elle produit du lait, de la viande bovine et des tomates locales suivant une logique d'économie circulaire.²²⁵



Les solutions décentralisées en place consistent dans la (I) la biométhanisation, (II) une serre autosuffisante et (III) le recyclage des biodéchets.



²²⁴ Sandrine Morel, Le Monde, 30 nov 2022.

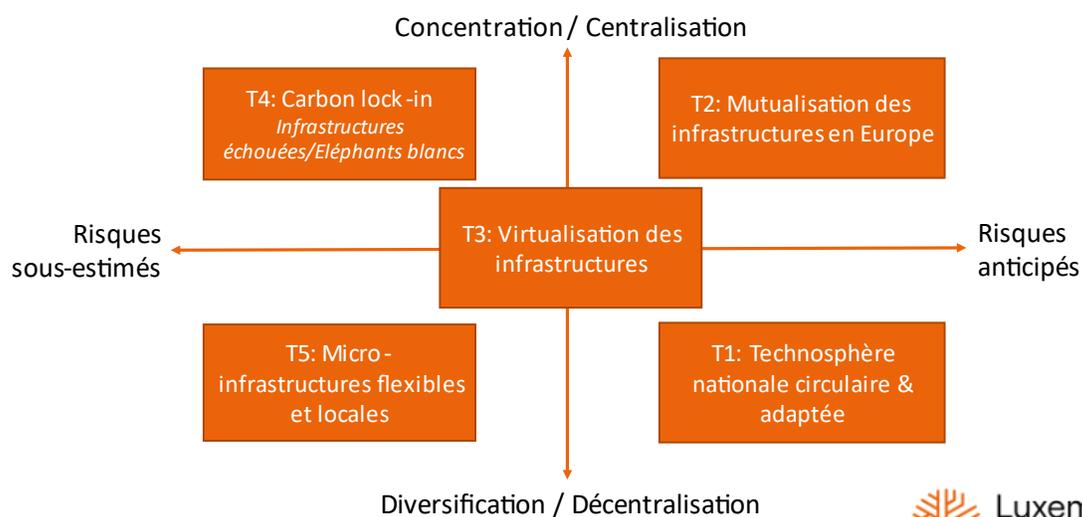
²²⁵ <https://fermedufaascht.be/>

3. Matrice des 5 trajectoires de transition infrastructurelle pour le Luxembourg

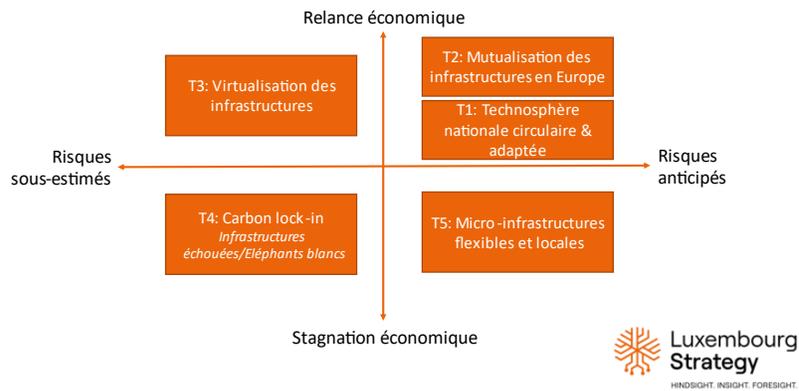
En combinant ces cinq trajectoires avec les groupes de bifurcations (risque, économie-démographie, territoire, technologie) identifiées préalablement, on peut rendre explicite leur comportement en fonction des circonstances qui se manifesteraient. En arrangeant deux bifurcations sur une matrice (axe x : variable risques ; axe y : variable économique et démographique ou variable territoriale ou variable technologique ou variable géopolitique), le positionnement et la signification des 5 trajectoires changent, comme illustré dans les 4 exemples de matrices ci-contre.

Dans l'exemple premier ci-contre, les axes représentent les deux bifurcations « risques anticipés/risques non-anticipés » et « centralisation/décentralisation ». La trajectoire T1 *Technosphère nationale circulaire et adaptée* serait robuste et adéquate dans un contexte d'anticipation des risques systémiques et d'affirmation de l'autorité centrale voire de subsidiarité (suffisance ?) nationale. La trajectoire T2 *Do something big* en Europe demande une planification supra-nationale et une coopération public-privé fortes, se heurtant aux prérogatives nationales. La trajectoire T4 *Infrastructures carbonées et échouées* sous-estimerait les risques et se manifesteraient par des grandes installations centralisées et non-régulées. Le localisme T5 promet plus de flexibilité, agilité et autonomie, mais risque de finir en îlots disparates vulnérables. Dans les 4 trajectoires, la digitalisation des infrastructures (T3) va de soi, à des doses variables en fonction de l'hypothèse.

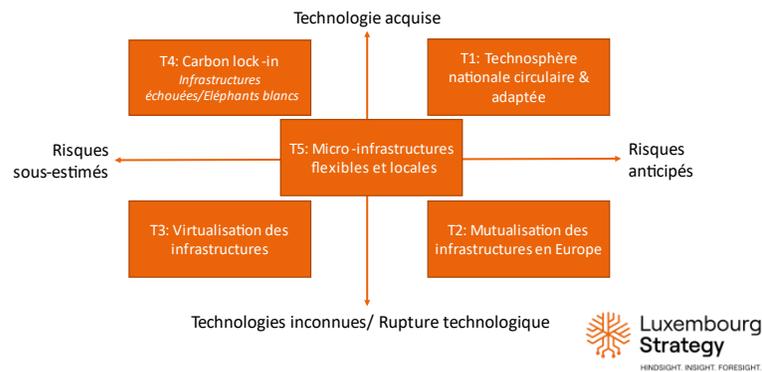
5 trajectoires de développement possible d'infrastructures pour l'économie du Luxembourg



Variante 1: 5 trajectoires de développement possible d'infrastructures pour l'économie du Luxembourg (Économie)



Variante 2: 5 trajectoires de développement possible d'infrastructures pour l'économie du Luxembourg (Technologie)



Variante 3: 5 trajectoires de développement possible d'infrastructures pour l'économie du Luxembourg (Géopolitique)

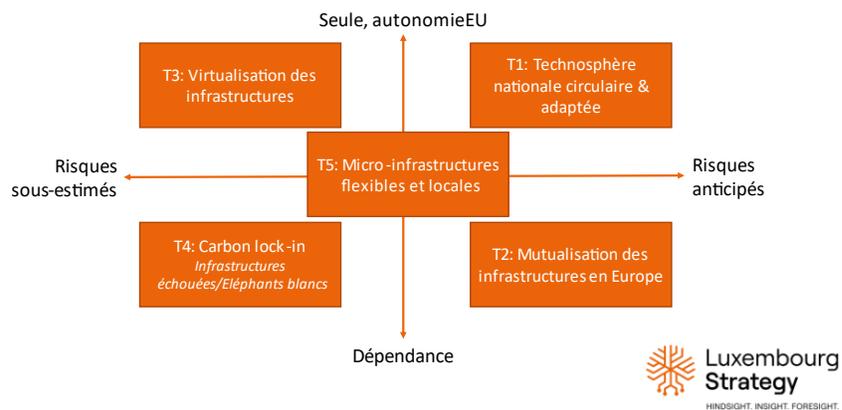


Figure 50: Matrices d'interprétation des 5 trajectoires pour les infrastructures du Luxembourg d'ici 2100 en fonction des variables et bifurcations sous étude

IV. Annexes

Annexe 1 – Tableau détaillé des coûts des infrastructures

Annexe 2 – Aperçu de réalisations de grands travaux nationaux essentiels à l'économie (1945 – 2023)

Annexe 3 – Aperçu de la programmation de grandes infrastructures essentielles à l'économie (2023 – 2040)

Annexe 4 – *Transition pathways for sustainable infrastructure and the climate transition*

Annexe 5 – *Global infrastructure assets and related vulnerability to hazards*

Annexe 6 – Repères bibliographiques

Annexe 1 : Tableau détaillé des coûts d'infrastructures nationales majeures

Les données référées ci-contre sont à l'origine de la fig. 9 *Comparaison du budget théorique des grands travaux réalisés versus événements Black Swan et grands travaux à venir* au Luxembourg.

No.	Événement / Projet	Type	Coûts	en % du Budget 2023	Source
1	1937 - Findel (M)	Infrastructure réalisée	793 000 000€	3.0%	suivant méthode de calcul: budget « théorique » dans l'année 2023 (voir Chapitre III 2 B)
2	1953 - Barrage et SEBES (M)	Infrastructure réalisée	3 660 000 000€	14.0%	suivant méthode de calcul: budget « théorique » dans l'année 2023 (voir Chapitre III 2 B)
3	1956 - Canal Moselle et port (M)	Infrastructure réalisée	164 000 000€	0.6%	suivant méthode de calcul: budget « théorique » dans l'année 2023 (voir Chapitre III 2 B)
4	1958 - SEO (M)	Infrastructure réalisée	945 000 000€	3.6%	suivant méthode de calcul: budget « théorique » dans l'année 2023 (voir Chapitre III 2 B)
5	1997 - Autoroute A7	Infrastructure réalisée	2 280 000 000€	8.7%	suivant méthode de calcul: budget « théorique » dans l'année 2023 (voir Chapitre III 2 B)
6	2014 - Tramway et Fun.	Infrastructure réalisée	935 000 000€	3.6%	suivant méthode de calcul: budget « théorique » dans l'année 2023 (voir Chapitre III 2 B)
7	2014 - Terminal intermodal	Infrastructure réalisée	393 000 000€	1.5%	suivant méthode de calcul: budget « théorique » dans l'année 2023 (voir Chapitre III 2 B)
8	2020 - Pandémie Covid-19	Événements "Black Swan"	5 500 000 000€	21.0%	suivant explications de la Ministre des finances
9	2021 - Inondations	Événements "Black Swan"	164 000 000€	0.6%	suivant déclaration de la Ministre des finances
10	2022 - Solidaritéitpak 2.0	Événements "Black Swan"	2 500 000 000€	9.5%	suivant explications de la Ministre des finances
11	2023 - PNEC	Projet	8 400 000 000€	32.0%	suivant calcul STATEC (2023), Simulation de la transition énergétique de l'économie luxembourgeoise
12	2028 - Réseau 380 kV	Projet	209 000 000€	0.8%	suivant communication CREOS
13	2030 - Infra. de sécurisation de l'eau	Projet	842 000 000€	3.2%	suivant communications des communes
14	2035 - Tram, rapide et Corridor multim.	Projet	3 000 000 000€	11.4%	suivant conférence de presse du 13 septembre 2023 du Ministère de la mobilité et des travaux publics

Sources :

No. 8 : [suivant explications de la Ministre des finances](#)

No. 9 : [suivant déclaration de la Ministre des finances](#)

No. 10 : [suivant explications de la Ministre des finances](#)

No. 11 : [suivant calcul STATEC \(2023\), Simulation de la transition énergétique de l'économie luxembourgeoise](#)

No. 12 : [suivant communication CREOS](#)

No. 13 : [suivant communication Ville de Lux.](#), [SIDESt \(Grevenmacher\)](#), [SIDESt \(Uebersyren\)](#), [SIDEN](#), [SEBES](#)

No. 14 : [suivant conférence de presse du 13 septembre 2023 du Ministère de la mobilité et des travaux publics](#)

Annexe 2 – Aperçu de réalisations de grands travaux nationaux d’après-guerre à nos jours (1945 –2023)

(Les projets figurant dans le plan Marshall sont classifiés avec un (M))



Aéroport Findel – 1952 (M)

Utilisation commerciale avec 2 pistes et hangar

Lieu : Luxembourg-Ville (Findel)

Décision de construction : Loi du 19 mars 1937 concernant la construction d'un aéroport et la réglementation de la circulation aérienne

Budget : 10 000 000 francs

en % du budget 1937 : 3.0 %

budget « théorique » 2023 : 793 000 000 EUR

Durée du projet : 15 ans

Type : Projet national

Fait marquant : Travaux interrompus pendant la 2^{ème} guerre mondiale

Canalisation de la Moselle et Port de Mertert – 1964 (M)

Lieu : Rivière frontalière Moselle et Mertert

Décision de construction : Convention franco-germano-luxembourgeoise du 27 octobre 1956

Budget : Canalisation – 102 000 000 DM
(dont 2 000 000 DM LU et 50 000 000 DM FR et DE)

Port – 5 000 000 francs

en % du budget 1956 : 0.6 %

budget « théorique » 2023 : 164 000 000 EUR

Durée du projet : 8 ans

Type : Projet international avec FR et DE

Fait marquant : 2 000 000 m³ de terre ont été déplacé et 10 000 m² de palplanches utilisées



Centrale hydroélectrique (SEO) – 1964 (M)



Lieu : Stolzembourg

Décision de construction : Staatsvertrag über die Errichtung von Wasserkraftanlagen an der Our vom 10. Juli 1958

Budget : 200 000 000 francs

en % du budget 1958 : 3.6 %

budget « théorique » 2023 : 945 000 000 EUR

Durée du projet : 6 ans

Type : Projet international avec DE

Fait marquant : Bassin de rétention d'une capacité de 5 500 000 m³. Un des plus grands STEP d'Europe

Barrage et station de traitement des eaux (SEBES) – 1969 (M)

Lieu : Esch-sur-Sûre

Décision de construction : Loi du 24 juin 1953 autorisant le Gouv. à réaliser l'aménagement hydro-électrique de la Haute-Sûre

Budget : Barrage 200 000 000 francs et SEBES 400 000 000 francs

(50% Etat et 50% Syndicat des communes)

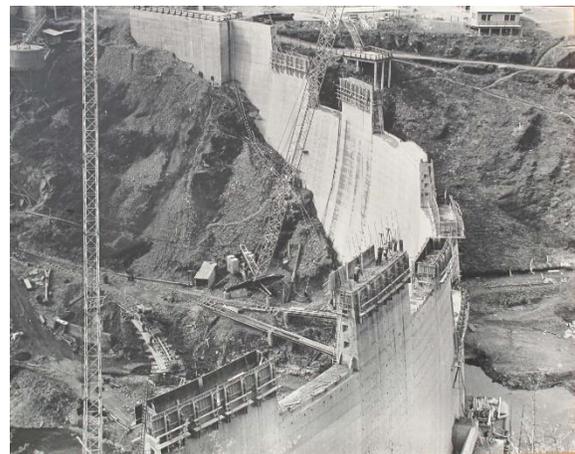
en % du budget 1953 : 14.0 %

budget « théorique » 2023 : 3 666 000 000 EUR

Durée du projet : 16 ans

Type : Projet national

Fait marquant : Capacité de 60 000 000 m³ d'eau, hauteur du barrage 47 m, épaisseur en bas de 4,5 m et au sommet de 1,5 m



Autoroute A7 "Nordstrooss"- 2015



Lieu : Luxembourg-Ville <-> Schieren

Décision de construction : Loi du 27 juillet 1997 autorisant le Gouvernement à procéder à la construction d'une route reliant Luxembourg à Ettelbruck

Budget : 14 800 000 000 francs

en % du budget 1997 : 8.7 %

budget « théorique » 2023 : 2 280 000 000 EUR

Durée du projet : 18 ans

Type : Projet national

Fait marquant : Après de longs débats, sélection de la « Ostvariante » ; Longueur de 24.8 km dont 8 km de tunnel

Terminal intermodal - 2017

Lieu : Bettembourg

Décision de construction : Loi du 27 août 2014 modifiant la loi modifiée du 10 mai 1995 relative à la gestion de l'infrastructure ferroviaire

Budget : 221 000 000 EUR

en % du budget 2014 : 1.5 %

budget « théorique » 2023 : 393 000 000 EUR

Durée du projet : 3 ans

Type : Projet national

Fait marquant : 800.000 m³ de matériaux ont été terrassés et 500.000 tonnes de matériaux ont été apportés pour finaliser la mise à niveau du terrain



Tramway et Funiculaire – 2017

Tronçon A



Lieu : Luxembourg-Ville

Décision de construction : Loi du 24 juillet 2014 portant sur la construction d'une ligne de tramway à Luxembourg entre la Gare centrale et le Circuit de la Foire Internationale au Kirchberg.

Budget : Tram 430 780 000 EUR et Funiculaire 96 000 000 EUR

en % du budget 2014 : 3.6 %

budget « théorique » 2023 : 935 000 000 EUR

Durée du projet : 9 ans (en cours)

Type : Projet national

Fait marquant : Réseau actuel de 16 km ; le 1^{er} tramway à Luxembourg-Ville a fermé définitivement en 1964, celui de la Minette en 1956

Annexe 3 – Aperçu de la programmation en cours de grandes infrastructures essentielles à l'économie (2023 – 2040)

Réseau électrique 380kV – 2028

Lieu : Bertrange <-> Trèves (DE)

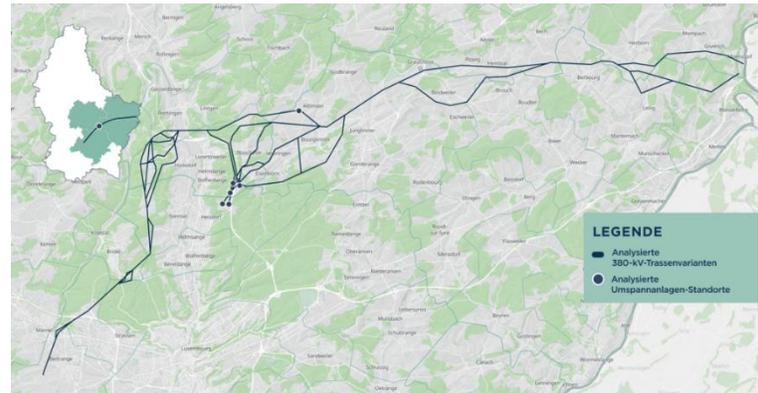
Décision de construction : Creos Projet 380

Budget : 209 000 000 EUR

Durée du projet : 5 ans

Type : Projet national

Fait marquant : Construction en plusieurs étapes



Extension de la station d'épuration des eaux usées de Beggen – 2030

Lieu : Beggen

Décision de construction : Loi du 15 juillet 2022 autorisant le Gouvernement à participer au financement des travaux nécessaires à l'extension de la station d'épuration de Luxembourg-Beggen

Budget : 295 000 000 EUR (dont participation gov. de 118 000 000 EUR)

Durée du projet : 8 ans

Type : Projet national (Ville de Luxembourg)

Fait marquant : Capacité de 450 000 équivalents-habitants pour couvrir les besoins de la Ville de Luxembourg à l'horizon de 2047.



Tramway rapide et corridor multimodal - 2035

Lieu : Luxembourg <-> Esch-sur-Alzette

Décision de construction : Conférence de presse du 13 septembre 2023 du Ministère de la Mobilité et des Travaux publics

Budget : 3 000 000 000 EUR

(960 000 000 EUR Tram rapide et 1 800 000 000 corridor multimodal)

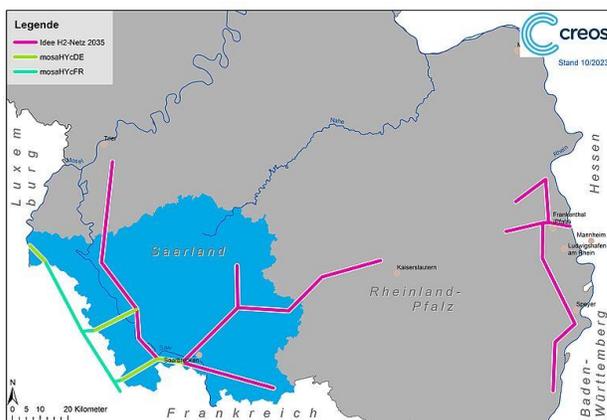
Durée du projet : 7 ans

Type : Projet national

Fait marquant : Réseau du Tramway rapide de 18.7 km



Réseau hydrogène vert mosaHYc - 2040



Lieu : Luxembourg <-> Perl (AL)

Décision de construction : Creos Wasserstoff-Positionspapier de mars 2023

Budget : +100 000 000 EUR

Durée du projet : -

Type : Projet international avec DE et FR

Fait marquant : Reconversion de 70 km d'infrastructure de transport de gaz existante et construction de 30 km de pipelines d'hydrogène vert, capacité de 120.000 m³/h. Le raccordement avec le Luxembourg n'est pas encore déterminé.

Annexe 4 : Examples of 15 transition pathways towards sustainable infrastructure (Source: [Global Infrastructure Hub](#))

Infrastructure decarbonisation and mitigation strategies

These strategies reduce or eliminate carbon dioxide emissions and other greenhouse gases to create positive impacts on the environment, human health, and the economy.

Infrastructure transition pathways for decarbonisation and mitigation

Transition pathway	Definitions and outcomes	Sectors
Increase the share of renewable energy	<p>Increasing renewable energy generation to decarbonise the energy sector, and transforming the electrical grid to support this transition</p> <p>Transformative outcomes: Low-carbon transition; pollution reduction; job creation and economic growth</p>	<p>Sectors where investment is needed (in order of greatest need):</p>
Increase the share of low-emissions transport	<p>Increasing the uptake of zero-emissions vehicles, public transport, and active mobility to reduce fossil fuel combustion and tailpipe emissions</p> <p>Transformative outcomes: Low-carbon transition; pollution reduction; job creation and economic growth</p>	<p>Sectors where investment is needed (in order of greatest need):</p>
Increase technological carbon removal	<p>Deploying carbon-capture technology to capture and store or re-use carbon dioxide emitted from large-point sources</p> <p>Transformative outcomes: Low-carbon transition; pollution reduction; job creation and economic growth</p>	<p>Sectors where investment is needed (in order of greatest need):</p>
Manage the phase-down of high-emissions energy	<p>Managing the phase-down of high-emissions energy such as coal-fired power generation to reduce the energy sector's emissions intensity</p> <p>Transformative outcomes: Low-carbon transition; pollution reduction; job creation and economic growth</p>	<p>Sectors where investment is needed (in order of greatest need):</p>
Increase the operational efficiency of buildings	<p>Retrofitting, modernising, and sustainably operating buildings to optimise and reduce energy and water use</p> <p>Transformative outcomes: Low-carbon transition; pollution reduction; digital connectivity; job creation and economic growth</p>	<p>Sectors where investment is needed (in order of greatest need):</p>
Reduce the carbon intensity of steel and cement production	<p>Using renewable energy, low-emissions fuels, or other greenhouse gas mitigation measures to reduce the emissions of steel and cement manufacturing, and reduce the embodied carbon of infrastructure</p> <p>Transformative outcomes: Low-carbon transition; pollution reduction; job creation and economic growth</p>	<p>Sectors where investment is needed (in order of greatest need):</p>

Infrastructure resilience and adaptation strategies

These strategies help protect infrastructure, and the communities they serve, from the impacts of climate change.

Infrastructure transition pathways for resilience

Transition pathway	Definitions and outcomes	Sectors
Increase resilience through structural interventions	<p>Building new physical structures, or changing the structure of existing infrastructure, to protect communities and the infrastructure itself against shocks and stresses</p> <p>Transformative outcomes: Disaster and climate change adaptation; social cohesion; job creation and economic growth</p>	<p>Sectors where investment is needed (in order of greatest need):</p> 
Increase resilience through ongoing risk management	<p>Actively managing, maintaining, and monitoring infrastructure to (a) detect, predict, and reduce the risk of failure and (b) improve its ability to respond to, and recover from, shocks and stresses</p> <p>Transformative outcomes: Disaster and climate change adaptation; social cohesion; job creation and economic growth</p>	<p>Sectors where investment is needed (in order of greatest need):</p> 
Restore land and water ecosystems	<p>Implementing nature-based solutions to restore and protect ecosystems in response to challenges such as climate change</p> <p>Transformative outcomes: Disaster and climate change adaptation; environmental regeneration; social cohesion; job creation and economic growth</p>	<p>Sectors where investment is needed (in order of greatest need):</p> 
Increase circularity and minimise raw material use	<p>Re-using, recycling, and recovering waste to minimise the use of critical materials across the infrastructure lifecycle to ensure critical material supply reliability and resilience</p> <p>Transformative outcomes: Circularity; environmental regeneration; pollution reduction; job creation and economic growth</p>	<p>Sectors where investment is needed (in order of greatest need):</p> 

Strategies to increase the positive social impact of infrastructure

These strategies make infrastructure and infrastructure services more accessible, affordable, and to deliver a better standard of operation for all people.

Infrastructure transition pathways that deliver social impact

Transition pathway	Definitions and outcomes	Sectors
Increase universal access to infrastructure	<p>Removing obstacles and barriers to infrastructure and infrastructure services to increase connectivity and inclusivity across communities</p> <p>Transformative outcomes: Affordability and access to services; job creation and economic growth; digital connectivity; digitalisation; social cohesion; disruptive innovation; inclusive mobility</p>	<p>Sectors where investment is needed (in order of greatest need):</p> 
Increase the affordability of infrastructure services	<p>Introducing policy measures and incentives to support the cost of infrastructure services</p> <p>Transformative outcomes: Affordability and access to services; job creation and economic growth; digital connectivity; digitalisation; inclusive mobility</p>	<p>Sectors where investment is needed (in order of greatest need):</p> 
Improve the standard of operation of infrastructure	<p>Upgrading and maintaining infrastructure to improve the standard of operation of infrastructure</p> <p>Transformative outcomes: Circularity; cyber-security; digital connectivity; digitalisation; pollution reduction; disaster and climate adaptation; social cohesion; disruptive innovation; job creation and economic growth; low-carbon transition</p>	<p>Sectors where investment is needed (in order of greatest need):</p> 

Infrastructure transition pathways that amplify the other pathways

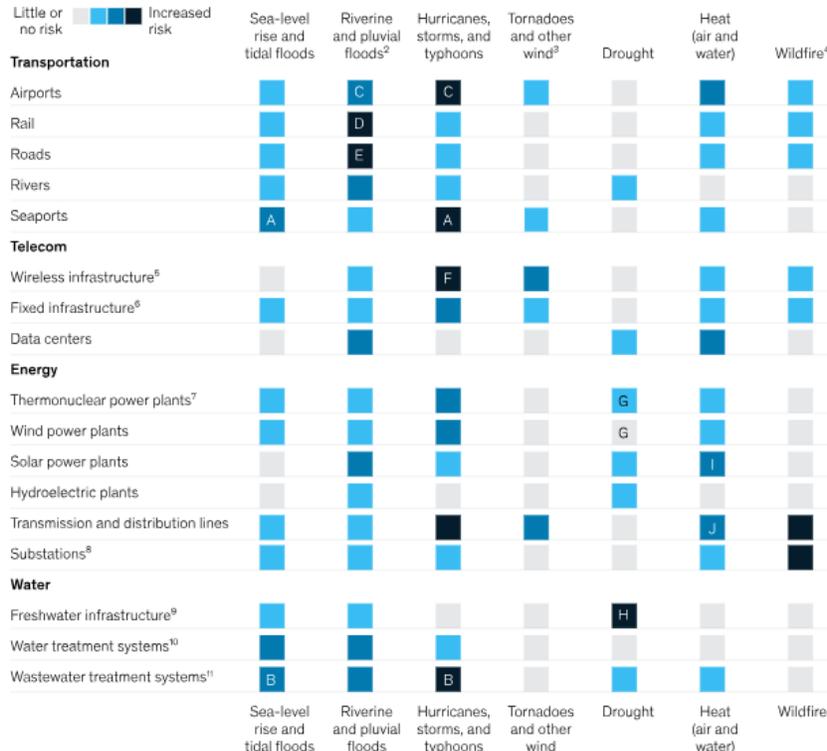
Transition pathway	Definitions and outcomes	Sectors
Scale up the adoption of InfraTech	<p>Applying new or innovative technology (material, machine, or digital) to infrastructure, to create a step-change in decarbonisation, resilience, or social impact and make it more cost-effective to build and operate</p> <p>Transformative outcomes: Disruptive innovation; digitalisation; low-carbon transition; pollution reduction; disaster and climate adaptation; social cohesion; job creation and economic growth</p>	<p>Sectors where investment is needed (in order of greatest need):</p> 
Increase the digitalisation of services	<p>Digitalising infrastructure and related government services to improve connectivity, efficiency, and quality of service from infrastructure</p> <p>Transformative outcomes: Digitalisation; disaster and climate adaptation; digital connectivity; disruptive innovation; job creation and economic growth</p>	<p>Sectors where investment is needed (in order of greatest need):</p> 

Annexe 5 - Global infrastructure assets and related vulnerability to hazards

En 2020, McKinsey note dans son étude « Will-infrastructure-bend-or-break-under-climate-stress »²²⁶ que les risques physiques résultent de l'exposition aux effets du changement climatique en fonction de leur probabilité et sévérité pour différents types d'infrastructures. Elle conclut que les actifs ont des vulnérabilités très spécifiques, et qu'au moins un élément de chaque type d'infrastructure est à haut risque de pertes et dommages :

Global infrastructure assets have highly specific vulnerability to hazards: At least one element in each type of infrastructure system sees high risk.

Risk, (defined as potential future losses resulting from exposure to climate hazards)¹



A. Seaports, by definition, are exposed to coastal flooding risks. Seaports are often resistant and can easily adjust to small sea-level rise. Powerful hurricanes, however, remain a substantial risk. In 2005, Hurricane Katrina destroyed ~30% of the Port of New Orleans.

B. Wastewater treatment plants often adjoin bodies of water and are highly exposed to sea-level rise and hurricane storm surge. In 2012, Hurricane Sandy released 11 billion gallons of sewage, contaminating freshwater systems.

C. Airports near water have an increased risk of precipitation flooding and hurricane storm surge. 25% of the world's 100 busiest airports are less than 10 meters above sea level, and 12—including hubs serving Shanghai, Rome, San Francisco, and New York—are less than 5 meters. Only a few meters of flooding are necessary to cause disruption.

D. Rail is at risk of service interruption from flooding. Particularly, disruption to signal assets can significantly affect rail reliability. 7% inundation from the UK's signaling assets would disrupt 40% of passenger journeys. Damage can occur from erosion, shifting sensitive track alignments.

E. Roads require significant flood depths and/or flows to suffer major physical damage, but incur ~30% speed limitations from 0.05 meter inundation and can become impassable at 0.3 meter. Compounding effects of road closures can increase average travel time in flooded cities 10–55%.

F. Cell phone towers are at risk from high wind speeds. In 2018, Hurricane Maria winds of up to 175 miles per hour (mph) downed 90+% of towers in Puerto Rico. Risks are more moderate at lower wind speeds, with ~25% of towers downed by ~80 mph winds during Hurricane Sandy.

G. Wind power plants are highly resistant to drought; thermoelectric power plants, which regularly use water for cooling (seen in >99% of US plants), are at risk during significant shortages.

H. Freshwater infrastructure and associated supplies are highly vulnerable to drought impact, as seen when Cape Town narrowly averted running out of drinking water in 2018.

I. Solar panels can lose efficiency through heat, estimated at 0.1–0.5% lost per °C increase.

J. Transmission and distribution suffer 2 compounding risks from heat. Rising temperatures drive air conditioning use, increasing load. Concurrently, heat reduces grid efficiency.

¹Losses are defined as asset interruption, damage, or destruction. ²Pluvial flooding is flooding caused by extreme precipitation, independent of the actions of rivers and seas. ³Including both rain and wind impacts. ⁴Wildfire is a derivative risk primarily driven by drought. ⁵Base substations and radio towers. ⁶Including above- and below-ground cable. ⁷Including nuclear, gas, and oil. ⁸Including large power transformers. ⁹Reservoirs, wells, and aquifers. ¹⁰Plants, desalination, and distribution. ¹¹Plants and distribution. Source: Dawson et al., 2016; Federal Communications Commission, 2016; Mobile Association, 2018; New York Times, 2006; Pablo, 2005; Praelenato, 2019; Pyatkova, 2019; Xi, 2016; McKinsey Global Institute analysis.

Annexe 6 – Repères bibliographiques

Contexte luxembourgeois

BARTHEL, Charles et KIRPS, Josée

Terres rouges – Histoire de la sidérurgie luxembourgeoise, volume 2, 2010

FELTES, Paul

L'électrification du Luxembourg, Genèse et développement de la CEGEDEL, 2003

LE GOUVERNEMENT DU GRAND-DUCHE DE LUXEMBOURG

À propos de l'histoire du Luxembourg, Service information et presse, 2022

LE GOUVERNEMENT DU GRAND-DUCHE DE LUXEMBOURG

Les gouvernements du Grand-Duché de Luxembourg depuis 1848, Service information et presse, 2011

LE GOUVERNEMENT DU GRAND-DUCHE DE LUXEMBOURG

Le Grand-Duché de Luxembourg et le Plan Marshall

dans: Bulletin d'information, numéro 2, 1949

MAQUOI, René

L'épopée de la poutrelle Grey, 2018

SCHOLER, Sally

Die Gründung der Société électrique de l'Our und ihre Rolle als europäisches Gemeinschaftswerk

dans: Zeitschrift für Luxemburger Geschichte Heft 2, 2012

SCHROEDER, Jos

Der Wiederaufbau im Großherzogtum Luxemburg

dans: Bulletin d'information, numéro 10, 1946

OTTELE, Jean-Marie, www.industrie.lu

Infrastructures

EDHEC Infrastructure Institute

The Infrastructure Company Classification Standard (TICCS), 2022

MELLOUET, Sarah

De cette notion d'essentiel..., Fondation Idea, décryptage numéro 9, 2020

MOLITOR, Georges, et JAEGER François

Les infrastructures : facteur de croissance et résultat du développement économique

dans : L'économie luxembourgeoise au 20e siècle, 1999, p. 463-482

OECD Working Papers on Public Governance

OECD Infrastructure Governance Indicators, conceptual framework, design, methodology and primary results, 2023

SCHMIT, Paul

Les infrastructures de transport : "Um Wé zum éwég grösse Felkerbond"

dans : Le Conseil d'Etat face à l'évolution de la société luxembourgeoise, 2006, p.33 – 118

VAN LAAK, Dirk

Alles im Fluss : die Lebensadern unserer Gesellschaft – Geschichte und Zukunft der Infrastruktur, 2018

Le futur des infrastructures

ADEME Agence de la transition écologique
Imaginons ensemble – Les bâtiments de demain, 2020

EDHEC Infrastructure Institute
Highway to Hell, Climate risks will cost hundreds of billions to investors in infrastructure before 2050, 2023

GLOBAL INFRASTRUCTURE HUB
Infrastructure futures – The impact of megatrends on the infrastructure industry, 2020

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DU CLIMAT ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE
Stratégie et plan d'action pour l'adaptation aux effets du changement climatique au Luxembourg 2018-2023, 2018

OECD Public Governance policy papers
Building resilience: New strategies for strengthening infrastructure resilience and maintenance, 2021

OECD Des infrastructures pour un avenir résilient face au changement climatique, published 9.4.2024,
<https://doi.org/10.1787/464404b3-fr>

STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE (SEI)
Impacts and risks from climate change on trade infrastructure, 2023

Disclaimer

Les opinions exprimées dans cette publication sont celles des auteurs et ne correspondent pas nécessairement à celles du ministère de l'Économie ou du gouvernement.

Pour toute requête ou suggestion, contactez

Pascale Junker
Conseiller Mégatendances
Ministère de l'Économie
19-21, Boulevard Royal, L-2449 Luxembourg

Luxembourg, sept. 2024