GOUVERNEMENT
Liberté
Égalité
Fraternité

Butterfly 2050 : « Dessine ton futur »

Saison 3

Thématique COOPÉRER EN 2050

K-EY, La Microélectronique innovante et sobriété technologique

FRANCE 2030

Concours de février 2025 au 2 juillet 2026

SOMMAIRE

Édito p.4
Bienvenue en 2050 ..... p.6
Les participants p.8

Introduction p.9
Qui sommes-nous ? p.9
« Rétro-chronologie » 2050 à 2025 - Les faits marquants p.10

Partie 1
Présentation de l'univers prospectif p.12
Métier du futur p.18

Partie 2
Mise en narration fictionnelle - Scénario prospectif p.20

Partie 3
Compte-rendu de la phase exploratoire p.26

Annexes p.37
Bibliographie p.53



ÉDITO

Bruno Bonnell
Secrétaire général pour
l'investissement en charge
de France 2030

Ce 02 juillet 2026 a marqué un moment particulier : nous avons découvert les lauréats de la troisième édition du concours Butterfly 2050, cette initiative audacieuse qui invite notre jeunesse à « rapprocher le futur » en imaginant leur France désirable de demain. Cette initiative s'inscrit parfaitement dans la philosophie de France 2030, qui mise sur l'innovation et l'anticipation pour préparer notre pays aux transformations de demain. En mobilisant des profils pluridisciplinaires d'apprenants – designers, ingénieurs, élèves de la voie professionnelle, étudiants de diverses spécialités, auteurs – nous créons les conditions d'une intelligence collective. **Butterfly 2050 est un laboratoire, civique, d'idées, un capteur de signaux faibles, un révélateur des aspirations profondes d'une génération qui héritera des défis que nous façonnons aujourd'hui.**

Après avoir accompagné 151 équipes représentant 511 jeunes issus de toute la France, nous avons départagé les dix équipes finalistes qui ont su transformer leurs visions en scénarios prospectifs concrets. Les défis de 2050 ne connaissent pas les frontières. Ils exigent une vision transversale, une capacité à décloisonner, à croiser les regards et les expertises. Le concours Butterfly 2050 révèle également la richesse de nos territoires. De l'École de design Nantes Atlantique au Lycée Pierre Mendès France de Vitrolles, du lycée Eugène Ionesco d'Issy les Moulineaux à l'Université Reims Champagne-Ardenne, cette diversité géographique et institutionnelle enrichit la réflexion. Chaque région apporte sa sensibilité, ses spécificités, ses innovations. Cette France plurielle dessine ensemble une vision commune de l'avenir.

Au-delà des prix qui furent décernés le 2 juillet 2026, c'est la démarche elle-même qui constitue notre plus belle réussite. **Nous avons créé un espace que la jeunesse a investi et où elle peut exprimer sa créativité, partager ses aspirations, proposer ses solutions.**

« Penser l'avenir avec les jeunes, c'est leur donner le pouvoir de le façonner »

Butterfly 2050 nous enseigne que l'avenir qui se construit, se construit mieux quand on associe toutes les énergies, toutes les intelligences, toutes les générations. Ces 511 jeunes nous montrent le chemin : celui d'une France qui ose imaginer, qui sait innover, qui refuse la fatalité. Une France qui fait confiance à sa jeunesse pour dessiner les futurs désirables.

Le 2 juillet, nous célébrions bien plus que des lauréats : nous célébrions l'avenir que nous construisons ensemble.



RAPPROCHONS LE FUTUR

BIENVENUE EN 2050 !

Dès 2009, dans le prologue de « Viva la Robolution ! », Bruno Bonnell imaginait, à travers le personnage de Balthazar, ce que serait notre futur à l'horizon 2048.

En 2021, cette aspiration croise la confiance du SGPI dans l'engagement et la créativité des jeunes. Le jury de Compétences et métiers d'avenir se voit alors augmenté de membres juniors, afin que les formations soient aussi pensées par ceux à qui elles s'adressent.

En 2023, le concours Butterfly 2050, imaginé par le Secrétaire général pour l'investissement et soutenu par dix ministères, creuse ce sillon. La démarche prospective ouvre aux 15-25 ans un espace pour dessiner la France de 2050 : une France désirable, juste et viable, pensée avec eux, par eux, et pour tous.

En 2025-2026, la troisième édition installe plus fermement encore cette conviction : donner aux jeunes une voix claire et puissante, enthousiaste et sincère, est un chemin nécessaire pour construire le monde d'après.

Les 500 jeunes de cette édition ont été accompagnés par des facilitateurs issus de l'enseignement, du réseau Canopé et des entreprises, ainsi que par des coachs passionnés. En guidant les équipes chrysalides, ils ont montré ce que **peuvent l'intergénérationnel, l'intelligence collective, la science, l'imaginaire et la démarche prospective.**

L'équipe projet a partagé ses convictions et ses valeurs avec ces 151 équipes, tout entière convaincue que la jeunesse sait bâtir autant qu'agir en faveur du bien commun.



« Chaque jeune qui ose imaginer le monde de demain devient, à sa manière, le papillon capable de provoquer le changement. »

***Nathalie BECOULET**,*
Conseillère Formation au SGPI, pilote de Butterfly 2050.



Remerciements à celles et ceux qui imaginent demain

Une saison de Butterfly 2050, c'est d'abord des centaines de jeunes qui acceptent de prendre 2050 très au sérieux, et de le raconter. Aux participantes et participants, à leurs facilitateurs et à leurs établissements : merci pour votre implication, votre énergie et votre audace à faire advenir le monde qui vient. Vous les retrouverez tous page cinquante-quatre, et c'est la page la plus importante de ce livret.

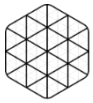
Ce concours ne tiendrait pas sans une équipe projet qui y croit. Merci aux représentants des dix ministères partenaires pour leurs conseils, leur accompagnement et leurs contributions. Merci, pour le SGPI, à Nathalie Bécoulet, architecte pilote du concours, à Olivier Vandard, Maxime Cossart, Marion Dos Reis Silva et Déborah Antoinat, ainsi qu'à l'ensemble des conseillers et contributeurs du Secrétariat général. Merci, pour la Caisse des Dépôts et Consignations, à Michel Deguilhem, Kostas Maltezos, Salomé Lucotte, Catherine Pradal et Noé Guignard. Merci, pour Matrice, à François-Xavier Petit, Simon Guirriec, Irena Dryanova, Claudia Del Prado Sartorius et Coralie Dodds. Merci, pour l'Agence nationale de la recherche, à Daniela Floriani, Anne-Marie Hinault, Maria Tasi, Reine NgoNGue et Louis Pontet

Merci aux alumni des éditions précédentes, Julie Diette, Camille Charron, et tant d'autres, qui prouvent chaque jour que les plus beaux rêves se transforment en réalité. Merci à Lola Marchetti, illustratrice, Ecole Brassart, et l'auteure et metteur en scène et directrice artistique, Rocio Berenguer.

Merci au jury, qui a eu la redoutable responsabilité de départager des projets tous porteurs d'espoir : Bruno Bonnell, Secrétaire général pour l'Investissement ; Laurane Bourgoint, directrice générale d'Eloquentia ; Silène Edgar, autrice ; Sébastien Fechner, producteur et scénariste, Aude Guéneau, directrice générale de Plume ; Franck Lorenzi, haut fonctionnaire et ancien directeur général de la Péniche du cœur ; Audrey Marianne, étudiante en design global et ambassadrice du programme Butterfly 2050 ; Karim Sabba, fondateur de la Paris Creator Week.

Merci enfin à nos partenaires engagés, l'Union des transports publics et ferroviaires et le Campus de Versailles, pour leur générosité, leur vision de l'avenir et leur plein soutien à la jeunesse, avec une mention spéciale au réseau Canopé pour sa puissante capacité à accompagner les innovations.

Bravo à toutes et à tous : c'est ainsi que se construit la France de demain.



MATRICE





ETABLISSEMENTS DES PARTICIPANTS



Introduction

Présentation de l'équipe K-EY

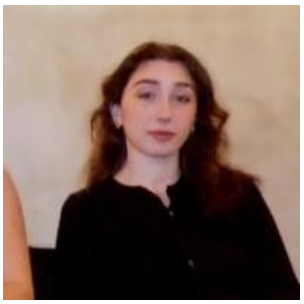
Face aux enjeux complexes de la microélectronique et des semi-conducteurs, nous avons choisi de croiser les regards plutôt que d'en adopter un seul. Entre gestion, sciences, design et ingénierie, notre équipe incarne la conviction que les grandes transformations technologiques ne peuvent s'imaginer sans diversité de pensée.



Chloé DUBOURGUIER
Étudiante à l'EGE / Université Gustave Eiffel



Juliette GREUSARD
Étudiante à l'UFR Sciences et Techniques.



Lisa LUBIN
Étudiante à CY école de Design



Marius YVARD
Étudiant Arts et Métiers / ParisTech

Notre vision pour 2050 : un monde où l'innovation ne rime plus avec surconsommation. Nous croyons qu'il est possible de réconcilier sobriété et progrès technologique de concevoir une microélectronique plus consciente de ses ressources, plus juste dans ses usages, sans renoncer à innover.

Mathilde Anglès, étudiante à l'ENSCI, a apporté à l'équipe une dimension à la fois sensible et informative une façon d'aborder la technique sans jamais perdre de vue l'humain derrière les matériaux et les composants.

Facilitateur : **Quentin CONSIGNY**, LISPEN

« RÉTRO-CHRONOLOGIE » : DE 2050 À 2025

2025-2032

Point de départ

L'Europe réalise moins de 9 % des opérations mondiales de fabrication frontend et ne dispose d'aucune capacité souveraine en encapsulation et test. L'empreinte carbone du numérique français s'établit à 26 MtCO2e. Le Chips Act 1.0 et les 2 milliards d'euros France 2030 dédiés à la sécurisation des matières premières critiques constituent les premières briques d'une autonomie encore embryonnaire.[16] Les tensions géopolitiques entre les États-Unis (Cloud Act, CHIPS Act) et la Chine (traçabilité extraterritoriale des terres rares[1]) et la consommation exponentielle des centres de données d'IA générative agissent comme moteurs de déstabilisation. Le Cycle Solaire 25, au maximum de son activité, expose les infrastructures télécoms aux courants induits par les tempêtes géomagnétiques.[4].

2032-2038

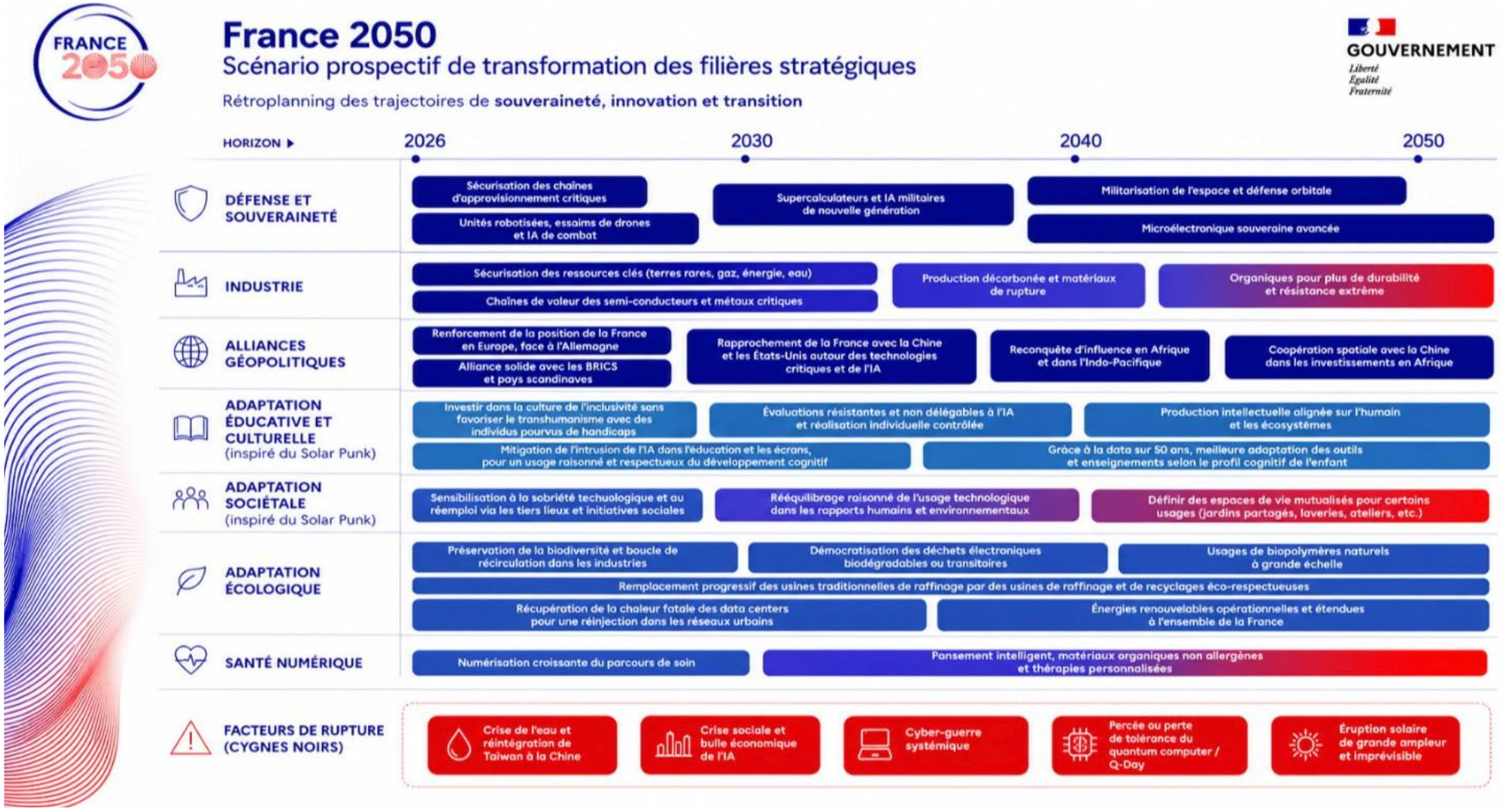
Accélérations et ruptures

La loi européenne sur la sobriété numérique (2033) interdit l'obsolescence logicielle planifiée, instaure une garantie de réparabilité de 15 ans sur les puces grand public et impose le couplage thermique direct des data centers aux RCU. L'industrie informatique européenne opère un basculement complet vers les architectures chiplets UCIe 2.0. En 2039-2042, la démonstration d'un calculateur quantique tolérant aux pannes déclenche une migration obligatoire vers les standards cryptographiques post-quantiques (CRYSTALS-Kyber et CRYSTALS-Dilithium), nécessitant une refonte physique accélérée des puces de sécurité réseau.

2038-2050

4 Stabilisation du nouveau système

En 2047, l'infrastructure européenne de recyclage franchit le seuil de 70 % d'autonomie en terres rares lourdes et métaux de procédé (Valorema + Caremag à Lacq). Les ATRN sont opérationnelles dans 85 % des métropoles européennes. L'empreinte carbone du numérique français se stabilise à 13 MtCO2e, soit une baisse de 50 % par rapport à 2019.


FRANCE 2050
France 2050
Scénario prospectif de transformation des filières stratégiques
Rétroplanning des trajectoires de souveraineté, innovation et transition
GOUVERNEMENT
Liberté
Égalité
Fraternité
HORIZON ▸
2026
2030
2040
2050
DÉFENSE ET SOUVERAINETÉ
Sécurisation des chaînes d'approvisionnement critiques
Unités robotisées, essaims de drones et IA de combat
Supercalculateurs et IA militaires de nouvelle génération
Militarisation de l'espace et défense orbitale
Microélectronique souveraine avancée
INDUSTRIE
Sécurisation des ressources clés (terres rares, gaz, énergie, eau)
Chaînes de valeur des semi-conducteurs et métaux critiques
Production décarbonée et matériaux de rupture
Organiques pour plus de durabilité et résistance extrême
ALLIANCES GÉOPOLITIQUES
Renforcement de la position de la France en Europe, face à l'Allemagne
Alliance solide avec les BRICS et pays scandinaves
Rapprochement de la France avec la Chine et les États-Unis autour des technologies critiques et de l'IA
Reconquête d'influence en Afrique et dans l'Indo-Pacifique
Coopération spatiale avec la Chine dans les investissements en Afrique
ADAPTATION ÉDUCATIVE ET CULTURELLE
(inspiré du Solar Punk)
Investir dans la culture de l'inclusivité sans favoriser le transhumanisme avec des individus pourvus de handicaps
Évaluations résistantes et non délégables à l'IA et réalisation individuelle contrôlée
Production intellectuelle alignée sur l'humain et les écosystèmes
Mitigation de l'intrusion de l'IA dans l'éducation et les écrans, pour un usage raisonné et respectueux du développement cognitif
Grâce à la data sur 50 ans, meilleure adaptation des outils et enseignements selon le profil cognitif de l'enfant
ADAPTATION SOCIÉTALE
(inspiré du Solar Punk)
Sensibilisation à la sobriété techuologique et au réemploi via les tiers lieux et initiatives sociales
Rééquilibrage raisonné de l'usage technologique dans les rapports humains et environnementaux
Définir des espaces de vie mutualisés pour certains usages (jardins partagés, laveries, ateliers, etc.)
ADAPTATION ÉCOLOGIQUE
Préservation de la biodiversité et boucle de récirculation dans les industries
Démocratisation des déchets électroniques biodégradables ou transitoires
Usages de biopolymères naturels à grande échelle
Remplacement progressif des usines traditionnelles de raffinage par des usines de raffinage et de recyclages éco-respectueuses
Récupération de la chaleur fatale des data centers pour une réinjection dans les réseaux urbains
Énergies renouvelables opérationnelles et étendues à l'ensemble de la France
SANTÉ NUMÉRIQUE
Numérisation croissante du parcours de soin
Pansement intelligent, matériaux organiques non allergènes et thérapies personnalisées
FACTEURS DE RUPTURE (CYGNES NOIRS)
Crise de l'eau et réintégration de Taïwan à la Chine
Crise sociale et bulle économique de l'IA
Cyber-guerre systémique
Percée ou perte de tolérance du quantum computer / Q-Day
Éruption solaire de grande ampleur et imprévisible

Présentation de l'univers prospectif

PITCH DU SCENARIO

La microélectronique des communs

En 2026, l'Europe réalise moins de **9 %** des opérations mondiales de fabrication front-end et ne dispose que depuis très récemment d'une capacité souveraine en encapsulation et test (OSAT). Dans un contexte de guerre des normes entre les arsenaux législatifs américain (CHIPS Act, Cloud Act, AI Bill of Rights) et chinois (GAII, traçabilité extraterritoriale des terres rares et interdiction d'usages hybrides des métaux), [1] l'Europe tente une troisième voie fondée sur la sobriété et la circularité industrielle.

L'empreinte carbone du numérique français s'établit à 26 millions de tonnes d'équivalent carbone (MtCO2e), dans un monde où l'ADEME prévoit +3 °C d'ici 2050 [2] et où une seule unité de production avancée consomme entre 10 et 57 millions de litres d'eau ultra-pure par jour.

[3] En 2029, une sécheresse d'une intensité historique frappe Taïwan, réduisant les précipitations de 40 % pendant huit mois consécutifs. L'État coupe l'approvisionnement en eau des fonderies TSMC au profit des populations civiles : la production de puces avancées (sous-7 nm) s'effondre de 60 % pendant trois mois, générant + de 500 milliards de dollars de pertes et paralysant les chaînes occidentales. Ce choc déclenche en Europe une transition planifiée vers la sobriété numérique distribuée, soutenue par le lancement du European Chips Act 2.0.

La loi européenne sur la sobriété numérique (2033) impose un basculement complet vers les nœuds technologiques matures (28 à 65 nm), la standardisation des architectures hétérogènes de type chiplets (norme UCIe 2.0) et le couplage thermique obligatoire des centres de données aux réseaux de chaleur urbains (RCU).

En 2050, ce scénario garantit une réduction de 50 % de l'empreinte carbone sectorielle et une autonomie circulaire de 70 % sur les métaux stratégiques.

Ce scénario est **ambivalent**. Il est désirable pour sa soutenabilité écologique et sa justice d'accès, mais **exigeant par ses contraintes** de rationnement et d'adaptation climatique permanente. Il bénéficie à l'ensemble des citoyens et des territoires, au détriment des oligopoles technologiques mondiaux et de l'obsolescence programmée. Ses valeurs : **communs, réparabilité, décentralisation démocratique, sobriété matérielle.**

CONTEXTE

_ Monde global et esthétique Solar Punk

Le monde de 2050 s'est adapté à une hausse thermique stabilisée à +3 °C au niveau européen, marquée par des canicules régulières dépassant 44 °C.[2] Face aux aléas climatiques extrêmes et au risque de tempête solaire la NASA avait établi dès 2025 une corrélation entre le Cycle Solaire 25 et la chute de satellites du réseau Starlink[4]. L'Europe a renoncé à l'illusion de la dématérialisation totale pour bâtir des infrastructures physiques résilientes et décentralisées.

La technologie numérique n'est plus un outil de consommation jetable, mais une infrastructure sobre gérée collectivement comme un bien commun. Cette transformation s'incarne dans l'esthétique Solar Punk avec des architectures urbaines intégrant la flore locale, formes organiques inspirées de l'Art Nouveau, vitraux photovoltaïques et structures biomorphiques en bois local. La philosophie s'appuie sur un parallèle fort avec les mouvements Luddites et les corporations de métiers médiévales, s'opposant à l'aliénation par l'automatisation industrielle au profit d'une maîtrise communautaire du geste technique.[5] Ce rejet culturel de la délégation inconditionnelle aux algorithmes trouve un fondement empirique dans les travaux de Gerlich (2026), qui démontrent que la délégation non encadrée à l'IA entraîne une baisse mesurable de la qualité du raisonnement.[6]

_ Économie circulaire et consommation

Le modèle économique de la microélectronique a abandonné la recherche de volumes et l'obsolescence programmée pour se concentrer sur l'économie circulaire de proximité. La valeur réside désormais dans la maintenance, la réparabilité et la valorisation industrielle des Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE). L'usine Caremag (filiale de Carester, plateforme Induslacq) traite 2 000 tonnes d'aimants permanents en fin de vie et 5 000 tonnes de concentrés miniers par an, réduisant de 60 % les émissions de CO2e et diminuant la consommation d'eau de 98 % par rapport aux méthodes extractives primaires. La Belgique et la France avaient été pionnières dans le recyclage des semi-conducteurs dès 2025.[7]

Les habitudes de consommation suivent les principes de sobriété de Philippe Bihouix. La possession individuelle d'appareils neufs a laissé place à une culture du reconditionné et du DIY. Pour les classes moyennes et populaires, le « Luxe Communal » s'incarne dans des espaces partagés de quartier : buanderies équipées de lave-linge professionnels ultra-robustes conçus pour durer cinquante ans, dômes de cuisson collectifs à haute inertie thermique. Ces infrastructures partagées réduisent considérablement la demande globale en puces électroniques tout en créant du lien social.

_ Gouvernance et décentralisation démocratique

La gouvernance s'articule autour de la cohésion territoriale et de la décentralisation démocratique. Les Agences Territoriales des Ressources Numériques (ATRN) régulent la puissance de calcul comme un service public soumis à des quotas délibérés lors d'assemblées citoyennes locales, retirant le contrôle des infrastructures numériques des oligopoles mondiaux pour le placer sous contrôle public. Cette réappropriation prend corps dans deux piliers du quotidien urbain : les tiers-lieux d'échange de quartier mêlent détentes culturelles, cafés citoyens et comptoirs de réemploi, tandis que les Académies du Climat de quartier abritent des Repair Cafés hebdomadaires gratuits où des experts forment les habitants au diagnostic électronique, à la soudure et au codage sur matériel libre.

_ Environnements

Les environnements urbains de 2050 portent les stigmates d'une hausse de +3 °C au niveau européen : canicules régulières à 45 °C, cours d'eau enregistrant des étiages critiques à 18 % de leur capacité historique. Les façades des édifices publics et tertiaires sont recouvertes de films polymères passifs (PDMS/D-PA) exploitant le refroidissement radiatif passif pour faire baisser localement les températures de 10 °C sans consommer d'électricité.

Les serveurs d'infrastructure locale sont logés dans des chaudières numériques immergées en huile diélectrique biodégradable, installées dans les sous-sols des bâtiments publics (gymnases, Ehpad, piscines municipales), directement connectées aux RCU. La chaudière numérique QBx de la société Qarnot, d'une capacité de 3,2 kW, héberge 12 processeurs d'infrastructure : la chaleur dégagée, récupérée à 95 % en boucle fermée, chauffe l'eau chaude sanitaire à 60 °C sans dépense d'énergie de refroidissement.

_ Mode de vie

Travail. L'activité technique s'est structurée autour de coopératives régionales de services publics d'infrastructures à l'image de la CRAFN en Rhône-Alpes. Les ingénieurs effectuent une semaine de 32 heures, rémunérés en unités coopératives (UC) indexées sur la performance d'atténuation carbone et le bénéfice social réel apporté aux territoires

Consommation. Tout équipement électronique est lié à un Passeport Matériel Numérique. La durée de vie d'un terminal personnel atteint en moyenne 9 ans (contre 3,5 ans en 2025). L'acquisition d'un nouvel appareil implique la restitution obligatoire de l'ancien dans la filière de démantèlement Valorema.

Mobilité. Les déplacements longue distance sont soumis à un budget carbone annuel individuel strict. Les téléconférences s'effectuent en basse résolution graphique par défaut. La logistique locale s'appuie sur des réseaux de trains de proximité, des vélos-cargos et des véhicules électriques légers alimentés par des batteries SiC.

_ Normes et règles

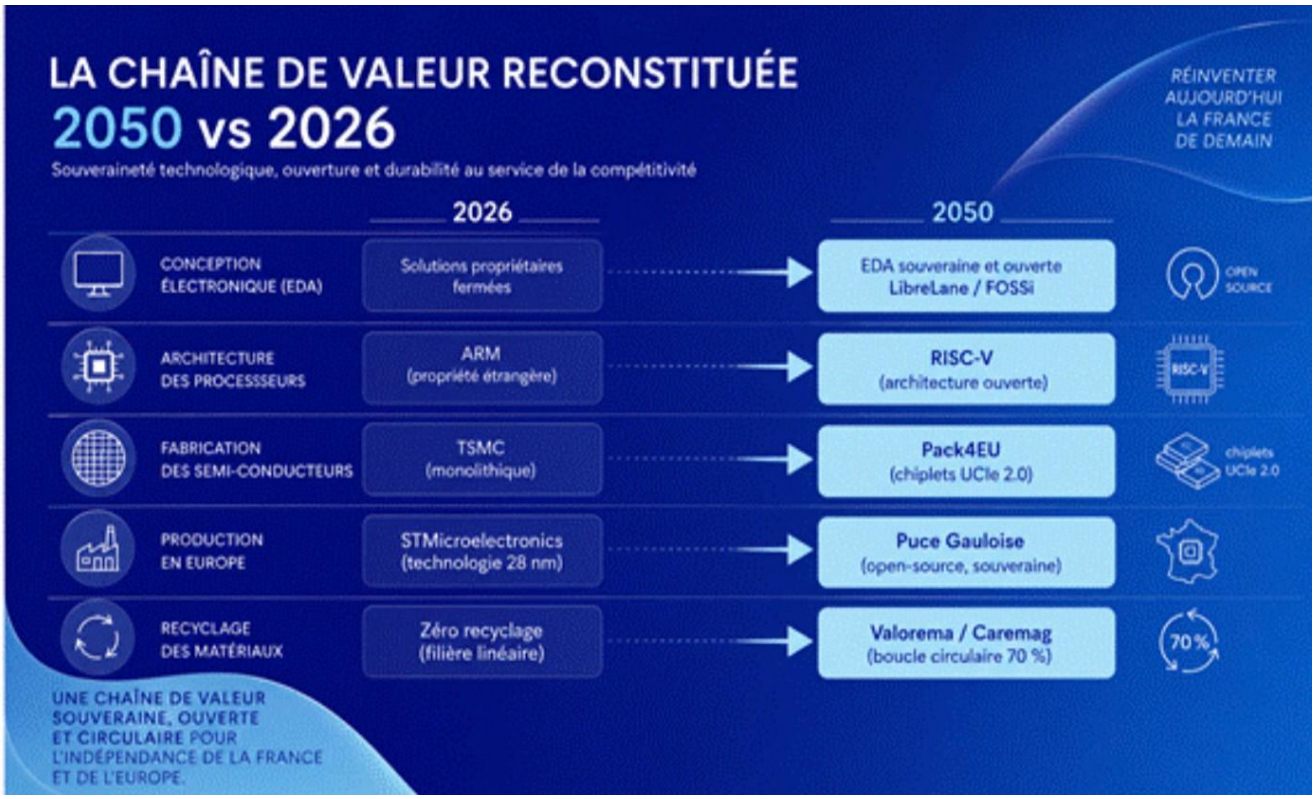
Les interdictions structurent le marché : importation de terminaux sans Passeport Matériel Numérique (délit grave contre les ressources communes), entraînement de modèles d'IA consommant plus de 10 téraflops sans autorisation explicite de l'ATRN locale, obsolescence programmée qualifiée de délit industriel majeur. Les obligations couvrent le couplage thermique obligatoire pour toute infrastructure numérique de plus de 200 kW (Loi 2033), la responsabilité élargie des producteurs (REP) à un taux minimal de 70 % de circularité, et l'arbitrage démocratique des budgets de calcul par les ATRN.

_ Éléments concrets marquants

La crise d'étiage de la Saône (juillet 2047). Le débit de la Saône s'effondre à 18 % de sa moyenne historique. Pour éviter l'évaporation et le réchauffement artificiel de l'eau, l'ATRN de Lyon coupe instantanément les serveurs municipaux non prioritaires et réduit la bande passante de divertissement de 40 %, préservant l'alimentation en eau potable des hôpitaux.

Le tableau d'allocation du Budget de Calcul. Affiché dans le hall de la mairie du 8e arrondissement de Lyon : 50

% de la capacité affectée aux fonctions d'intérêt vital (santé, traitement de l'eau, alertes climatiques), 30 % aux fonctions essentielles (logistique, enseignement) et 20 % au confort individuel et au divertissement.



INNOVATIONS ENVISAGÉES

_ Sobriété de la puce et des algorithmes

Le paysage technologique de 2050 a abandonné la course à la miniaturisation extrême du silicium. L'industrie s'est tournée vers une approche modulaire : l'assemblage de chiplets standardisés, démontables et hautement réparables, basés sur l'architecture ouverte RISC-V et interconnectés selon la norme UCIe 2.0. Pour s'affranchir des suites logicielles d'EDA propriétaires, l'écosystème s'appuie sur le flux de conception automatisé LibreLane (FOSSi Foun-dation), qui traduit les descriptions logiques RTL Verilog en fichiers GDSII prêts pour la fabrication.[8] Deux leviers assurent la sobriété algorithmique. L'élagage systématique (pruning) des réseaux de neurones, éliminant plus de 90 % des connexions redondantes et combiné à une quantification en entiers de 4 ou 8 bits divise la consommation d'inférence par un facteur mille. Le calcul en mémoire (Compute-in-Memory), démontré par la puce neuromorphique NeuRRAM,[9] supprime les pertes énergétiques liées au transfert permanent de données entre mémoire et processeur. Les métamatériaux constituent une troisième voie technologique, issue des recherches de l'Institut FEMTO-ST à Besançon. [10] Fondés non pas sur la composition chimique des matériaux, mais sur leur architecture interne et leur géométrie, ils permettent de gérer la dissipation thermique des puces, de filtrer les signaux électromagnétiques et d'améliorer les performances des antennes intégrées sans ajouter de composants passifs supplémentaires, une logique de « sobriété par le design de la matière » complémentaire à l'approche chiplets. [10] Des métasurfaces architecturées sont dorénavant déposées directement sur les substrats des chiplets, réduisant leur empreinte matérielle tout en améliorant leur efficacité énergétique.

Pour l'électronique de proximité, deux filières de memristors organiques ont émergé. Les memristors biodégradables au miel (Université d'État de Washington[11]), dont les groupes hydroxyle du fructose et du glucose guident la migration ionique pour former des filaments conducteurs réversibles imitant la plasticité synaptique, et les transistors électrochimiques à base de chitosan de crustacés, biodégradables et adaptés aux capteurs environnementaux de quartier.

À l'échelle locale, des « gélurgistes de quartier » fabriquent des semi-conducteurs tridimensionnels à partir d'hydrogels double réseau (PEDOT:PSS/PVA/PAA) à température ambiante, selon les travaux des Universités de Hong Kong et de Toronto.[12] Ces puces affichent une résolution d'écriture de 100 um, une élongation à la rupture de 300 % et une biocompatibilité parfaite pour les capteurs agricoles ou médicaux de quartier. Des portes logiques entièrement imprimées en 3D sans semi-conducteur classique, utilisant des filaments polymère enrichis de nanoparticules de cuivre (MIT, 2024[13]), complètent cette panoplie de fabrication distribuée, avec des micro-su-percondensateurs en verre fabriqués par laser ultrabrège (KTH, 2024[14]) pour leur alimentation. La souveraineté technologique populaire prend corps à travers le mouvement cyberdeck : ordinateurs portables personnalisés, assemblés localement à partir de composants de récupération et de boîtiers biosourcés, fonctionnant hors cloud, alimentés par panneaux solaires pliables et interconnectés via des protocoles radio libres (Meshtastic, Reticulum).[5] Enfin, les interconnexions physiques utilisent l'ordinateur optique (photonique sur silicium) plutôt que des câbles métalliques, garantissant une immunité totale aux courants induits par les tempêtes géomagnétiques, une menace documentée depuis le pic d'activité du Cycle Solaire 25 en 2025.[4]

_ Environnement

La préservation de la ressource en eau est devenue un enjeu central de la microélectronique. Les fonderies locales recyclent au moins 85 % de l'eau ultra-pure nécessaire aux procédés (taux R ≥ 85 %), réduisant de 50 % leurs prélèvements en eau douce et protégeant les nappes phréatiques. La prolifération des déchets électroniques est enrayée par l'adoption généralisée de dispositifs biodégradables (chitosan, amidon, cellulose) qui se désintègrent naturellement sans relâcher de métaux lourds. La chaleur fatale des infrastructures informatiques, récupérée à 95 % par immersion en huile diélectrique biodégradable, est directement injectée dans les réseaux de chaleur urbains (RCU) pour alimenter les services publics locaux.

_ Objets et technologies marquants

La puce open-source «Gauloise » de 28 nm, conçue sous licence libre par un consortium public européen et gravée par STMicroelectronics, équipe 90 % des appareils d'usage courant. Facilement réparable, robuste, d'une durée de vie

garantie de 20 ans, elle repose sur des liaisons hétérogènes par chiplets standardisés. Les écrans graphiques énergivores ont disparu des espaces publics, remplacés par des interfaces haptiques à substitution sensorielle (Tactons) : 16 micro-vibreurs piézoélectriques portés sur tissu souple, transmettant des informations complexes par vibrations modulées (80-300 Hz), pilotés par des microcontrôleurs LilyPad Arduino basse tension (3,3 V). Les archives publiques froides sont conservées dans des cartouches d'ADN synthétique d'une densité de 1 pétaoctet par gramme, sans aucune consommation électrique passive.

ACTEURS

_ Acteurs dominants

Les Agences Territoriales des Ressources Numériques (ATRN) veillent au respect des budgets biophysiques régionaux. Les Coopératives Régionales de Flux Numériques (CRAFN) assurent la maintenance opérationnelle des parcs de calcul décentralisés. L'Observatoire Européen du Bilan Matière Numérique supervise l'allocation et les flux physiques de métaux précieux à l'échelle du continent. Les consortiums Pack4EU fédérant STMicroelectronics (Grenoble-Crolles), l'IRT Nanoelec et la ligne industrielle SiPack de Synergie Cad Group, consolident l'autonomie industrielle sur la découpe, le test et l'assemblage de chiplets, là où Thales, Radiall et Foxconn avaient posé la première pierre d'une OSAT européenne souveraine dès 2027.[7]

_ Nouveaux acteurs

Le contexte biophysique a suscité l'émergence de nouveaux profils professionnels : gélurgistes de quartier, médiateurs d'arbitrage computationnel, cartographes de chaleur fatale, hydrométallurgistes de précision. Deux métiers structurent particulièrement cet écosystème.

Profil	Cadre institutionnel	Pouvoir Mission	Concepts normatifs	Outils
Juris-Limithèque de la République (JLR)	Haut magistrat (Ministères, préfectures, ATRN)	Veto budgétaire et algorithmique Cartographie des frontières normatives (SIG-J) Suspension d'IA publiques non conformes	Préjudice écologique (Art.1246-1252 Code civil) : rescrits des frontières Budget Vert frontière : Non-discrimination	Audits d'algorithmes boîtes noires rescrits de cadastre normatif national
Médecin éco-architecte des fluides cliniques	Praticien hospitalier et chercheur de quartier	Conception clinique passive 3D d'implants organiques	Ergonomie biophilique zéro métal lourd refroidissement passif	Hydrogels double réseau puces neuromorphiques locales revêtements passifs

Tableau 1. Profils professionnels émergents à l'horizon 2050.
Le JLR cumule deux fonctions complémentaires : la cartographie des frontières normatives (zones de souveraineté numérique, rescrits de frontière entre juridictions algorithmiques) et le veto biophysique sur les décisions publiques contraires aux limites planétaires, s'appuyant sur le droit du préjudice écologique.[15]

_ Acteurs en déclin

Les grands oligopoles du cloud centralisé et de l'IA hyperscaler sont en déclin prononcé, dans l'impossibilité de maintenir des infrastructures de several dizaines de mégawatts face aux crises énergétiques et aux contraintes carbones. Les constructeurs de terminaux propriétaires à renouvellement rapide ont été exclus du marché par l'obligation réglementaire du Passeport Matériel Numérique. Les États-nations à gouvernance centralisée ont vu leur influence se fragmenter au profit des régions, des métropoles et des agences de bassin de flux.

TENSIONS MAJEURES ET EVALUATION DU SCENARIO

_ Tensions

Souveraineté industrielle et coût de la sobriété. La volonté initiale de financer des fonderies avancées sous-5 nm sur le sol européen s'est heurtée à l'impossibilité d'absorber leur empreinte carbone et hydrique en période de stress climatique. La tension a été résolue par un arbitrage stratégique : l'Europe a concentré ses capitaux sur la fabrication de puces matures (28 à 65 nm) couvrant 90 % des besoins sociétaux, et applique une doctrine d'indispensabilité réciproque (échange de brevets ASML et substrats Soitec) pour importer sous quota les puces de pointe strictement requises pour ses fonctions souveraines.

Innovation quantique critique et rusticité du quotidien. L'allocation massive de ressources vers le calcul quantique cryogénique (environ 10 millikelvins) est entrée en conflit direct avec le besoin de simplifier, standardiser et réparer localement les systèmes numériques ordinaires. La boucle de régulation est fonctionnelle : le quantique est strictement limité à quelques hubs gérant des simulations d'intérêt public majeur, tandis que les terminaux civils adoptent des technologies neuromorphiques légères et réparables.

Justice d'accès et rareté des matériaux. L'obligation morale de fournir des terminaux aux populations fragiles se heurte à la réduction obligatoire de la production matérielle, faisant risquer une exclusion numérique des zones rurales. La réponse passe par des tarifs sociaux d'accès au calcul garantis par les ATRN, des ateliers d'insertion pour le tri des DEEE et des puces organiques biodégradables au chitosan pour équiper les terminaux ruraux.

Délégation algorithmique et maîtrise humaine. Les travaux de Gerlich (2026) ont démontré que la délégation non encadrée à l'IA entraîne une baisse mesurable de la qualité du raisonnement.[6] Relayés par les alertes de la CNIL sur l'automatisation des discriminations, ces résultats ont rendu politiquement possible le mandat du JLR et ont alimenté culturellement le mouvement cyberdeck en réponse à la « froideur algorithmique » des systèmes publics automatisés.[15]

_ Évaluation du scénario

Sur le plan écologique, ce scénario garantit une réduction de plus de 50 % de l'empreinte carbone sectorielle, une diminution de 50 % des prélèvements d'eau douce dans les fonderies par boucles de recirculation fermées, et un recyclage de 70 % des terres rares magnétiques par Caremag. L'électronique organique transitoire au chitosan limite la prolifération de déchets persistants, permettant aux puces de se biodégrader naturellement sans relâcher de composants toxiques.

Sur le plan de la justice, l'introduction d'un budget territorial de calcul sous l'égide des ATRN rétablit l'équité d'accès en garantissant la priorité aux services de soins, d'éducation et de surveillance écologique. Cependant, les métropoles historiquement bien équipées conservent un avantage structurel, faisant craindre des fractures territoriales persistantes. Les risques résiduels incluent les effets rebond de l'Edge AI, la vulnérabilité des hubs quantiques face aux cyberattaques, et l'arbitraire bureaucratique lors des délibérations d'assemblée.

Métier du futur

Métier : Juris-Limithèque de la République (JLR)

_ Description générale

Le Juris-Limithèque de la République (JLR), c'est un haut magistrat de l'administration. Un expert, à la fois en droit de l'environnement et en éthique du numérique. Son poste est placé tout en haut de la pyramide décisionnelle : ministères, préfectures, grandes régions.

Son rôle ? Servir de garde-fou humain et juridique face à une administration qui tourne de plus en plus avec des IA. L'idée, c'est de s'assurer que les choix publics respectent les limites de la planète (les fameuses « frontières biophysiques ») tout en restant justes socialement.

Pour ça, il a un vrai pouvoir : un veto qui bloque, et même le droit de réécrire les algorithmes de l'État ou de revoir les grands projets d'aménagement.

_ Besoin auquel il répond

En 2050, la France gère ses services publics et ses crises avec des IA d'optimisation ultra-performantes. Mais le vrai danger, ce n'est plus la lenteur administrative : c'est la "*froideur algorithmique*".

Imaginez des systèmes capables de couper l'eau ou l'électricité à des populations entières, simplement parce qu'un calcul mathématique le justifie. Ou de valider des infrastructures uniquement sur leur rentabilité à court terme. Le JLR vient justement combler ce vide éthique : il réinjecte du **bon sens juridique**, de l'empathie humaine et une vision à long terme là où la machine ne voit que des données.

Ce métier répond à quatre urgences concrètes de la société de 2050 :

Atténuation (réduction des gaz à effet de serre) : il pose des verrous juridiques pour empêcher tout projet ou investissement public qui ferait dérailler notre trajectoire vers la neutralité carbone.

Adaptation (face aux aléas climatiques) : lors des crises (canicules, submersions), il arbitre pour protéger en priorité les plus vulnérables et garantir le fonctionnement des infrastructures essentielles.

Sobriété (gestion des ressources) : il surveille la comptabilité biophysique de l'État, pour que l'administration ne consomme jamais plus de matières ou d'eau que ce que les écosystèmes locaux peuvent régénérer.

Restauration du vivant (biodiversité, sols) : il utilise la commande publique comme levier, obligeant l'État à réparer, désimperméabiliser et réensauvager les milieux abîmés par l'activité humaine.

_ Missions principales

Le Juris-Limithèque de la République, c'est un peu le gardien des zones floues du droit. Là où les règles s'effilochent ou se chevauchent, c'est lui qui veille sur ces dernières.

Son boulot repose sur trois grandes missions :

Protéger les frontières du droit : Pas question de laisser s'installer des zones de non-droit ou un bazar juridique où plusieurs souverainetés se marcheraient sur les pieds, que ce soit dans le monde physique, numérique ou même conceptuel.

Trancher les conflits dans les zones limites : Quand plusieurs systèmes juridiques (national, extraterritorial, algorithmique) se frottent les uns aux autres, ou quand un soi-disant « vide juridique » menace de faire tache, c'est lui qui dit quelle règle s'applique.

Tenir à jour le Cadastre Normatif National : En gros, il cartographie en direct jusqu'où s'étend l'autorité de l'État, et il note précisément où passent les lignes de démarcation entre les différentes juridictions.

_ Activités concrètes :

Au quotidien, le JLR ne passe pas ses journées à théoriser dans un bureau. Il s'agit d'un vrai opérateur de terrain, ce dernier bosse dans les institutions. Ses missions se concrétisent par des actions bien précises :

Cartographie et traçage

- Il pose des bornes normatives : ça veut dire qu'il délimite, physiquement ou

numériquement, où s'appliquent les lois d'exception, les zones franches ou les espaces avec des règles spéciales (comme les zones portuaires ou les clusters de serveurs souverains).

- **Il met à jour le SIG-J (le Système d'Information Géographique Juridique) :** il intègre les nouvelles lois et traités dans la carte juridique de la République, histoire de visualiser où les compétences se chevauchent.

Instruction et arbitrage

- **Rédaction des rescrits de frontière** : parce qu'un litige a éclaté dans une zone grise par exemple, un drone étranger qui traverse une zone entre deux médias, ou le statut d'un actif numérique transfrontalier.
- **Patrouilles juridictionnelles** : on audite les contrats d'externalisation publique et les protocoles internationaux pour vérifier qu'on ne cède pas, sans le vouloir, un bout de souveraineté à cause d'une simple erreur de formulation.

Gestion de crise

Confinement juridique : Si une grosse faille apparaît dans la loi, on peut rédiger des arrêtés de "mise en quarantaine normative" pour figer la situation en attendant que le législateur intervienne.

_ Référentiel des compétences

Domaine	Compétence spécifique	Niveau requis
Droit public & Souveraineté	Maîtrise approfondie de la théorie de l'État, du droit international public et des régimes d'exception.	Expert / Doctrine
Topographie Normative	Capacité à modéliser des conflits de lois dans l'espace et le temps (analyse vectorielle des textes).	Avancé
Technologie & Algorithmes	Compréhension des architectures réseaux et des smart-contracts (frontières numériques).	Maîtrise opérationnelle
Rédaction légistique	Formuler des clauses de réserve de souveraineté et des actes conservatoires d'urgence.	Expert

_ Compétences comportementales (Savoir-être)

Juger sans parti pris : Savoir trancher sur une limite de texte sans se laisser influencer par la politique ou les gains faciles à court terme.

Garder la tête froide sous pression : Prendre des décisions lourdes sur la souveraineté en un temps record, surtout en pleine crise.

Entre souplesse et fermeté : Être capable de négocier des traités avec doigté tout en restant intransigeant sur les valeurs républicaines.

Mise en narration fictionnelle – scénario prospectif

ARÈNE

_ Atmosphère

L'atmosphère de cet univers est profondément ambivalente, même si elle est inspirée du courant solar punk. D'un côté, le monde est lumineux par sa dimension solidaire et démocratique. Les citoyens ont retrouvé une maîtrise concrète de leurs outils grâce aux Repair Cafés, au tri des DEEE et à la gouvernance partagée. La circularité matérielle de proximité et le recyclage systématique de la chaleur fatale informatique incarnent une abondance nouvelle, mesurée non plus à la vitesse des processeurs jetables, mais à la robustesse du lien aux autres et au vivant.

D'un autre côté, les canicules régulières à 45 °C imposent des efforts d'adaptation continuels. La raréfaction des métaux et de l'énergie maintient une atmosphère de pénurie latente. Les arbitrages du budget territorial de calcul sont parfois conflictuels, obligeant à des choix collectifs rigoureux pour préserver les besoins vitaux au détriment du confort individuel — ce qui nécessite une grande force d'acceptabilité culturelle et politique.

Ce monde, Léa Camille Moreau le vit de l'intérieur, elle est "limithèque", à la fois ingénieure de la CRAFN Rhône-Alpes, Architecte de Sobriété Numérique et Flux Thermiques (ASNFT) détachée auprès de l'ATRN de Lyon, face à une nuit d'août 2049 où les choix techniques deviennent des choix moraux.

LA MISE EN SCÈNE FICTIONNELLE – FORMAT NOUVELLE

La microélectronique des communs

La lumière du matin glissait sur les vitres électrochromes de la gare d'Austerlitz lorsque *Germain MBaye* releva enfin les yeux de sa tablette orbitale. Paris n'avait plus vraiment la couleur de Paris.

Depuis les *Grandes Restrictions hydriques de 2041*, la ville avait pris cette teinte pâle des cités qui recyclent tout. L'eau, la chaleur, les métaux, jusqu'aux poussières organiques des stations d'épuration verticales. Les fontaines publiques avaient disparu depuis longtemps. À leur place, des colonnes de condensation captaient l'humidité de l'air dans un silence presque religieux. Ces colonnes s'inspiraient des techniques de captation du brouillard pratiquées au Sahara depuis des siècles.

Germain observait les quais encombrés de voyageurs et ressentait cette fatigue particulière-des ingénieurs de l'ère thermique, celle des hommes qui savaient compter le coût énergétique de chaque geste.



Le message apparut dans le coin supérieur de son verre de lunette avec assistant IA intégrée.

*« **PROJET SHACKLETON** : Commission euro-africaine des infrastructures cis-lunaires Niveau de priorité - stratégique. »*

Il ne sourit pas.

Depuis six mois, tous les projets étaient devenus stratégiques. Il referma sa tablette au moment précis où une jeune femme descendait l'escalier métallique du quai numéro huit. Grande. Manteau gris pâle. Silhouette presque anachronique dans cette Europe rationnée.

Léa Moreau.

Germain reconnut immédiatement la Juris-Limithèque de la République dont les arbitrages faisaient régulièrement la une des revues administratives. On racontait qu'elle avait suspendu plusieurs projets nationaux après avoir démontré qu'ils franchissaient certaines limites écologiques pourtant jugées « optimales » par les IA gouvernementales.

La jeune s'arrêta devant lui.

- *« Monsieur MBaye ?*

Sa voix possédait ce calme particulier des gens habitués à gérer stratégiquement des crises. Germain acquiesça.

- *Je pensais rencontrer un ingénieur spatial , dit-elle.*
- *Et moi une magistrate».*

Un léger sourire traversa le visage de la limithèque.

Le haut-parleur de la gare diffusa alors les restrictions nationales de consommation de la semaine, suite aux reporting des orchestrateurs de ressources. Ces orchestrateurs dirigeaient les ressources du territoire français en fonction des besoins lors des crises qui pouvaient subvenir, dans le cadre des mesures de sobriété technologiques établies depuis 2035.

« Niveau orange pour l'ensemble du territoire. Les prélèvements hydriques non essentiels sont suspendus jusqu'à nouvel ordre. »



Personne ne leva les yeux. Les voyageurs n'y prêtaient même plus attention.

- *« Vous savez ce qu'ils veulent réellement faire là-haut ? » demanda Léa.*

Germain connaissait déjà la réponse. Ils ne voulaient pas seulement extraire de la glace lunaire. Ils voulaient déplacer une partie des infrastructures vitales de la civilisation hors de la Terre. Le train transilien glissait sans bruit au-dessus des anciennes autoroutes végétalisées lorsque Léa invita Germain à se rapprocher de la vitre.

- *« Regardez bien », indique Léa.*

Les Américains appellent encore ça une métropole. Nous, nous avions compris que Paris devait redevenir un bassin de vie. Des tiers-lieux et des écoles réaménagées et des techno-artisans locaux qui produisent ce dont on a besoin. Les jardins, les laveries et les fours sont partagés, comme il y a 800 ans entre différentes communautés par district.

Cela nous a permis d'éviter de construire des super fermes à l'américaine, pour produire des subsistances et les consommer de façon éthique et raisonnable. Le ciel de fin d'après-midi diffusait une lumière dorée sur la banlieue ouest.

Mais la ville n'avait plus rien de celle que Germain avait connue pendant ses années d'études. Les tours de verre avaient presque disparu. D'autres avaient été recouvertes de maillages de céramiques blanches, pour préserver les architectures de la forte chaleur. Certaines avaient été démontées étage par étage après les Accords Thermiques de 2046. D'autres avaient été transformées en fermes verticales, en centres de recyclage de l'eau ou en infrastructures sanitaires territoriales.

Sous eux, les anciennes voies rapides formaient désormais des corridors humides où circulaient lentement des tramways à hydrogène pâle. Des coulées vertes. Germain remarqua surtout le silence. Pas le silence vide des campagnes, mais celui d'une société qui avait appris à réduire ses flux. Même les drones semblaient rares. Léa suivit son regard.

- *« Les drones ont été rationnés il y a trois ans, expliqua Léa. Trop de micro-batteries critiques. Trop d'usages absurdes. »*

Le train passa devant une vaste structure en terrasses où des enfants circulaient entre des bassins peu profonds. Germain observa les réseaux d'eau qui parcouraient les bâtiments. Son regard professionnel repéra immédiatement la logique du système. Les eaux grises étaient récupérées. Les eaux issues des usages médicales traitées séparément.

Les circuits thermiques mutualisés à l'échelle du quartier.

- *« Qui a conçu tout ça ?*
- *Les premiers Médecins éco-architectes des fluides cliniques. »*

Pour la première fois, Germain sourit. Ce métier n'existait pas lorsqu'il avait commencé ses études. À l'époque, les hôpitaux consommaient des quantités gigantesques d'eau, d'énergie et de matériaux. Désormais, les infrastructures de santé étaient devenues des producteurs nets de ressources. Le train ralentit à proximité de Nanterre.

L'ancien quartier d'affaires de La Défense apparaissait au loin comme une ruine civilisée. Des jardins suspendus traversaient désormais les structures métalliques. Au sommet des tours subsistantes, d'immenses ailettes de céramique blanche captaient les courants d'air.



- *« Refroidissement passif ? » demanda Germain.*
- *« Oui. Les Juris-Limithèques ont rendu obligatoire l'abandon des systèmes thermiques les plus énergivores après 2045.*

Léa sortit alors de la poche intérieure de son manteau ce qui ressemblait à une petite capsule de verre. À l'intérieur reposait une puce minuscule.

- *« Une puce neuromorphique ? demanda Germain.*
- *Non ».*

Elle lui tendit l'objet.

- *Une architecture spécialisée pour les infrastructures critiques de santé, totalement en métamatériaux hybrides métalliques et organiques. Elle est dérivée des anciennes puces neuromorphiques, avec une différence de structure qui nous permet de la recycler.*

Germain l'examina attentivement.

- *« Consommation thermique divisée par huit.*
- *Réparable localement. Fonctionnement limité aux besoins essentiels. Aucun calcul superflu, et recyclable ».*

Germain releva les yeux.

- *« Vous avez volontairement limité la puissance.*
- *Nous avons limité le gaspillage ».*

Le train entra alors dans la Ceinture Verte. Et pour la première fois depuis longtemps, Germain comprit pourquoi certains urbanistes parlaient désormais des villes françaises comme d'organismes vivants. D'immenses canaux de récupération d'eau traversaient les quartiers arborés. Les immeubles n'excédaient jamais six étages. Des éoliennes lentes tournaient au sommet des bâtiments coopératifs. Les façades respiraient littéralement. Des membranes biologiques filtraient l'air chaud tandis que des algues translucides alimentaient les réseaux de refroidissement.

Même les écrans avaient changé. Ils étaient rares. Petits. Mat.

Comme si la civilisation avait finalement cessé de confondre lumière et intelligence. Léa observait silencieusement le paysage.

- *« Vous savez ce qui a réellement sauvé l'Europe ? demanda-t-elle. Germain secoua la tête.*
- *Pas la technologie. La lucidité sur ce qu'elle nous faisait. »*

Elle marqua une pause, comme si elle cherchait la formulation juste.

- *« Pendant des années, les grandes plateformes ont optimisé pour l'attention, pas pour la pensée. Quand le Q-day est arrivé en 2037, quand les systèmes de chiffrement ont commencé à tomber les uns après les autres, on a compris que l'infrastructure numérique mondiale reposait sur du sable. On a arrêté de courir. Et c'est dans cet arrêt qu'on a recommencé à choisir. »*

Elle regardait défiler la Ceinture Verte sans la voir vraiment.

- Ce n'était pas du renoncement. C'était une décision.»

Germain ne répondit pas immédiatement.

Dehors, les serres captaient les dernières lumières du soir.

Germain contempla les réseaux d'eau qui irriguaient les quartiers comme des veines. La Juris-Limithèque observait les frontières invisibles qui protégeaient cet équilibre fragile.

Et pendant quelques secondes, la banlieue ouest de Paris ressemblait moins à une capitale qu'à un immense organisme vivant, où la technologie n'avait pas disparu, mais où elle avait enfin pris sa juste place.



Compte-rendu de la phase exploratoire

DIAGNOSTIC DE 2026

_ Contexte et enjeux climatiques et géopolitiques

Le contexte des semi-conducteurs à l'Horizon **2050** s'inscrit dans une tension croissante entre puissance technologique, souveraineté industrielle et contraintes écologiques. Les puces électroniques sont devenues indispensables au fonctionnement des sociétés contemporaines, elles structurent aussi bien les secteurs de la défense, de la santé, des transports, des télécommunications que de l'intelligence artificielle ou des infrastructures numériques. Pourtant, cette dépendance mondiale repose sur **une chaîne de valeur** extrêmement concentrée sur **Taïwan** et fortement **dépendante de ressources critiques**.

Le modèle de production actuel de semi-conducteurs nécessite **d'importantes quantités d'eau ultra-pure[1], une énergie abondante et stable, ainsi que des matériaux stratégiques comme les terres et gaz rares**, dont l'approvisionnement reste dominé par quelques puissances, notamment **la Chine**. La guerre en Ukraine et le Blocus du détroit d'Ormuz sont malheureusement des dégâts collatéraux dans une course à la technologie sans pitié où s'opposent, par le biais de proxys géopolitiques, **la Chine, les États-Unis, la Russie**, et où **l'Europe** tente de proposer une troisième voie, avec comme fer de lance la France. Les États-Unis2[2], comme la Chine3[3], n'hésitent pas à user d'arsenal juridiques pour protéger leurs industries tech et éventuellement appliquer l'extraterritorialité de leurs lois. Ce que l'Europe avait déjà prévu en ayant mis au point le **CHIPS Act, le Digital Market Act et l'IA Act.**

En effet, l'Ukraine était le « grenier » de l'Europe et disposait également de mines de terres rares et de gaz rares, employés dans la production de puces micro-électroniques par l'Europe, notamment par **ASML** pour la lithographie des puces. Les terres rares sont utilisées par les « foundries » qui s'équipent principalement chez **ASML**. Dans le même temps, les contraintes environnementales se renforcent. Les objectifs climatiques européens et internationaux **imposent une réduction importante de l'empreinte carbone du numérique**, alors que l'essor de l'intelligence artificielle, des data centers et des usages connectés provoque une hausse continue des besoins énergétiques et électroniques.

L'ADEME (l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) prévoit environ une hausse de 3°C4[4] d'ici 2050, impliquant une adaptation profonde des infrastructures industrielles et des modes de production. Les enjeux ne concernent donc plus uniquement la performance ou la miniaturisation des puces, mais également leur soutenabilité écologique, mais aussi sociale. En effet, **nous vivons actuellement un grand chamboulement mondial au niveau socio-économique avec le remplacement de nombreux emplois par l'IA, et donc une refonte du modèle professionnel traditionnel.** Néanmoins, cette situation révèle une contradiction majeure

Les semi-conducteurs sont à la fois **indispensables à la transition écologique**, notamment pour les réseaux intelligents, les transports électriques ou l'optimisation énergétique, et ils sont responsables d'une pression croissante sur les ressources naturelles. L'extraction minière, les besoins hydriques des usines et la consommation énergé-

[1] *La fabrication d'une unité de production avancée consomme d'ici 2030 10 à 20 millions de litres par an en eau, d'après Le Thema de Veolia le 14 avril 2026, "L'innovation pour la sécurité écologique", page 15, FR_Thema-Innovation pour la Securite ecologique_Avril 2026*

[2] *Les Etats-Unis ont mis en place un arsenal législatif comprenant le Cloud Act (2018), l'AI Bill of Rights (2022), et le CHIPS and Science Act (2022). La Chine de son côté avait mis au point le Global Artificial Intelligence Governance Initiative (2023) couplé au plan « Made in China 2025 ».*

[3] *La Chine exige une traçabilité des terres rares qu'elle interdit d'usage à des fins hybrides (militaires et civiles), d'après GOUESMAT Julie "Terres rares : tout comprendre aux annonces de la Chine qui font trembler les importateurs européens", le 09/10/2025 : La Chine fait un grand bo vers l'extra territorialité des sanctions.*

[4] *Communication personnelle de Raphaël Gerson, interlocuteur ADEME*

tique des infrastructures numériques soulèvent des enjeux liés à la biodiversité, à la pollution et à la raréfaction des ressources stratégiques.

Dans ce contexte, la question centrale devient celle de l'arbitrage entre innovation, sobriété technologique et résilience industrielle. Le tout dans un contexte géopolitique revenu à la logique des blocs, opposant principalement deux superpuissances, la Chine et les États-Unis. Alors nous nous demandons :

Quels types de puces pour quels usages pour la France de 2050 ? Quelles ressources envisagées ? Comment concilier préoccupations environnementales et usages des matériaux rares ? Comment disposer d'une avancée technologique de pointe tout en conservant une certaine rusticité ?

Enfin, quels usages sont réellement essentiels au fonctionnement d'une société résiliente, et quelles applications peuvent être réduites, ralenties ou abandonnées ?

_ Chaîne de valeur et Acteurs économiques associés

La chaîne de valeur des semi-conducteurs commence par les fournisseurs de logiciels de conception électronique appelés **EDA (Electronic Design Automation)** → Ces logiciels permettent de dessiner, simuler et tester les circuits des futures puces électroniques. Ce segment est dominé par les entreprises américaines **Synopsys, Cadence Design Systems**, l'anglais **ARM** et l'allemand **Siemens EDA**. Les plans conçus avec les logiciels **EDA** sont ensuite transmis aux entreprises dites « **fabless** », spécialisées dans la conception de puces sans posséder d'usines. Les principaux acteurs sont les Américains NVIDIA, AMD, IBM Qualcomm et Broadcom. La fabrication des puces est ensuite assurée par les fonderies appelées « **foundries** », spécialisées dans la production industrielle de semi-conducteurs. Le leader mondial est le taïwanais **TSMC**, suivi du sud-coréen **Samsung Electronics** et de l'américain **GlobalFoundries**.

Le franco-italien **STMicroelectronics** est plutôt spécialisé dans la copie et la reproduction d'un certain panel de puce, qui n'atteint pas le degré de miniaturisation de TSMC qui a plus de 20 ans d'avance. Certaines entreprises, appelées **IDM (Integrated Device Manufacturers)**, assurent à la fois la conception et la fabrication des puces. Ce segment est dominé par l'américain Intel, le sud-coréen Samsung Electronics, l'américain Texas Instruments et l'allemand Infineon Technologies.

Également un nouveau type de puce organique émerge, avec un mode de conception **inspiré de l'impression 3D** est en train d'émerger et de proposer d'autre alternatives dans cette chaîne de valeur éparpillée et qui risque de ne plus bénéficier de la mondialisation « heureuse », à terme.

Dans l'intervalle, interviennent les fournisseurs d'équipements et de matériaux indispensables à la fabrication des puces. Le néerlandais **ASML** occupe une position centrale grâce à ses machines de **lithographie EUV** utilisées pour graver les semi-conducteurs les plus avancés.

Les Japonais **Nikon** et **Canon** le suivent de près. Le français **Thalès**, qui a pour particularité d'avoir des applications hybrides civiles et militaires. Thalès s'impose avec ses dernières innovations laser en collaboration avec le prix Nobel de physique 2018 Gérard Mourou, et peut faire concurrence à ASML dans la chaîne de valeur des semi-conducteurs. Cela lui donne la part belle pour fonder la seule **OSAT européenne** dédiée aux semi-conducteurs avec **Radiall et Foxconn (Taïwan)** pour investir 300 millions d'euros dans la construction d'une usine d'assemblage et de test de semi-conducteurs en France d'ici **2027**.

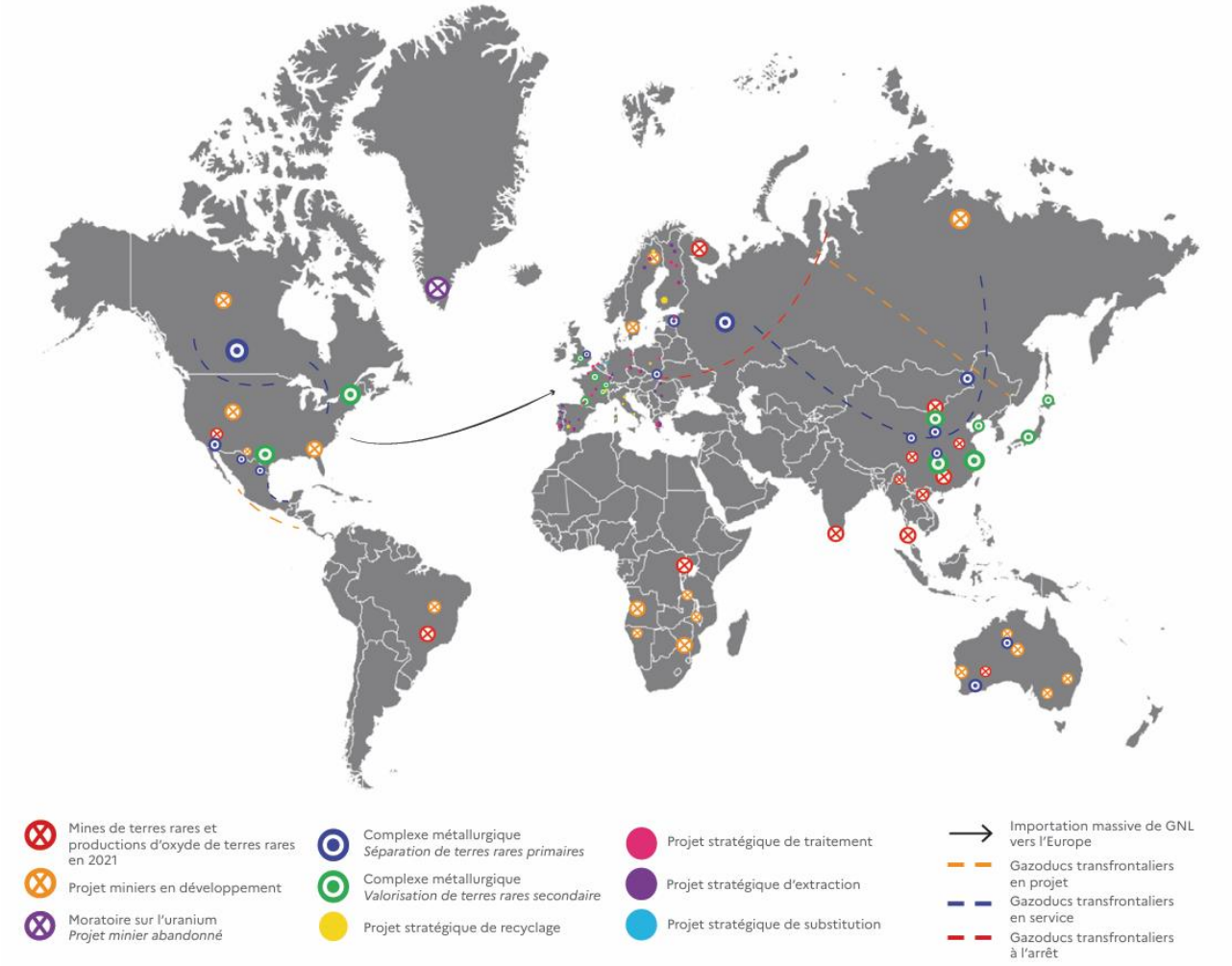
Ajoutons au palmarès de Thalès, son partenariat signé en **octobre 2025** avec Airbus et l'italien Leonardo pour fonder le premier géant européen du spatial venant concurrencer le projet Américain **Starlink d'Elon Musk** pour garantir une souveraineté militaire et spatiale.

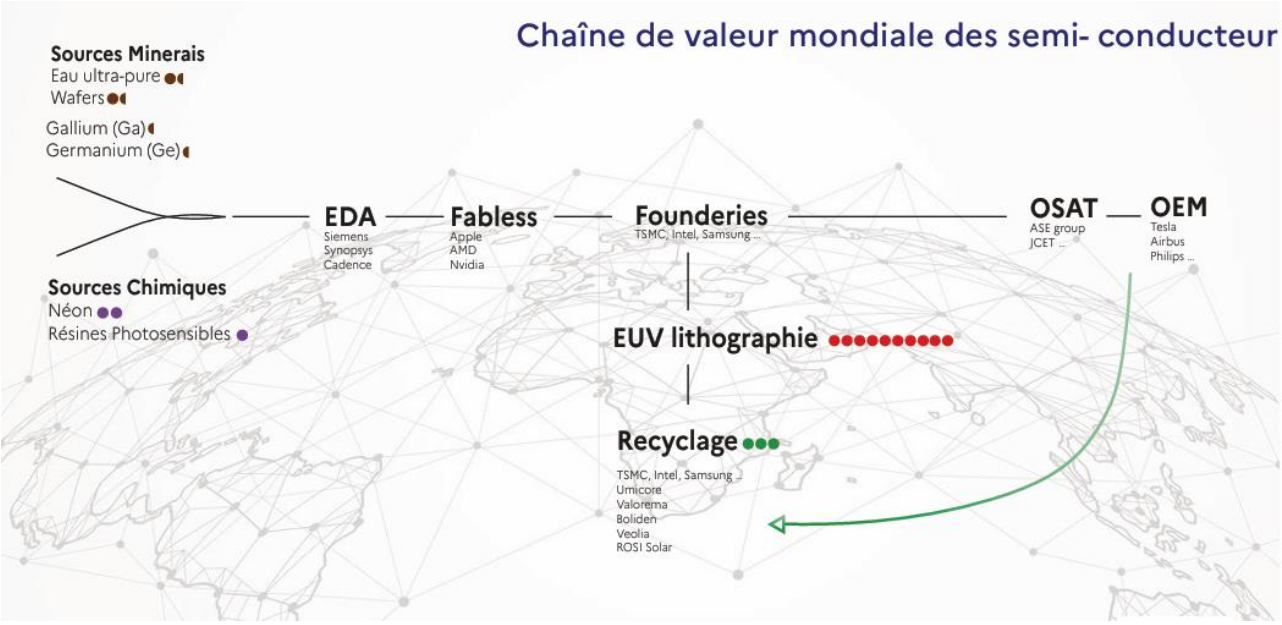
Cette OSAT européenne a été créée dans le but de concurrencer les principaux acteurs, dans cette phase de la chaîne de valeur, qui sont l'américain d'origine sud-coréenne **Amkor Technology**, le taïwanais **ASE Technology** et le chinois **JCET Group**. Enfin, Nous observons actuellement l'émergence d'un nouveau maillon de cette chaîne de valeur, ***celui du recyclage et du reconditionnement des semi-conducteurs*** où la Belgique[1][5] et la France se trouvent pionnières. Les entreprises **OSAT (Outsourced Semiconductor Assembly and Test)** réalisent l'assemblage, le test et le conditionnement final des puces avant leur commercialisation, terminant ainsi la chaîne de valeur et de production des semi-conduc-

[5] *Courrier International, "L'autonomie pour mot d'ordre", hors-série août-septembre 2025, p.13-28*

teurs traditionnels. La France et L'Europe restent encore **très marginales** dans ce modèle **classique** de conception de puces électroniques, auxquelles les besoins technologiques actuels sont **dépendants et croissants. Il y a beaucoup d'acteurs, avec des spécialisations diverses et variées pour tenter de s'imposer sur l'échiquier international de la microélectronique innovante.**

Terres rares, gazoducs et matières critiques : cartographie des dépendances stratégiques mondiales





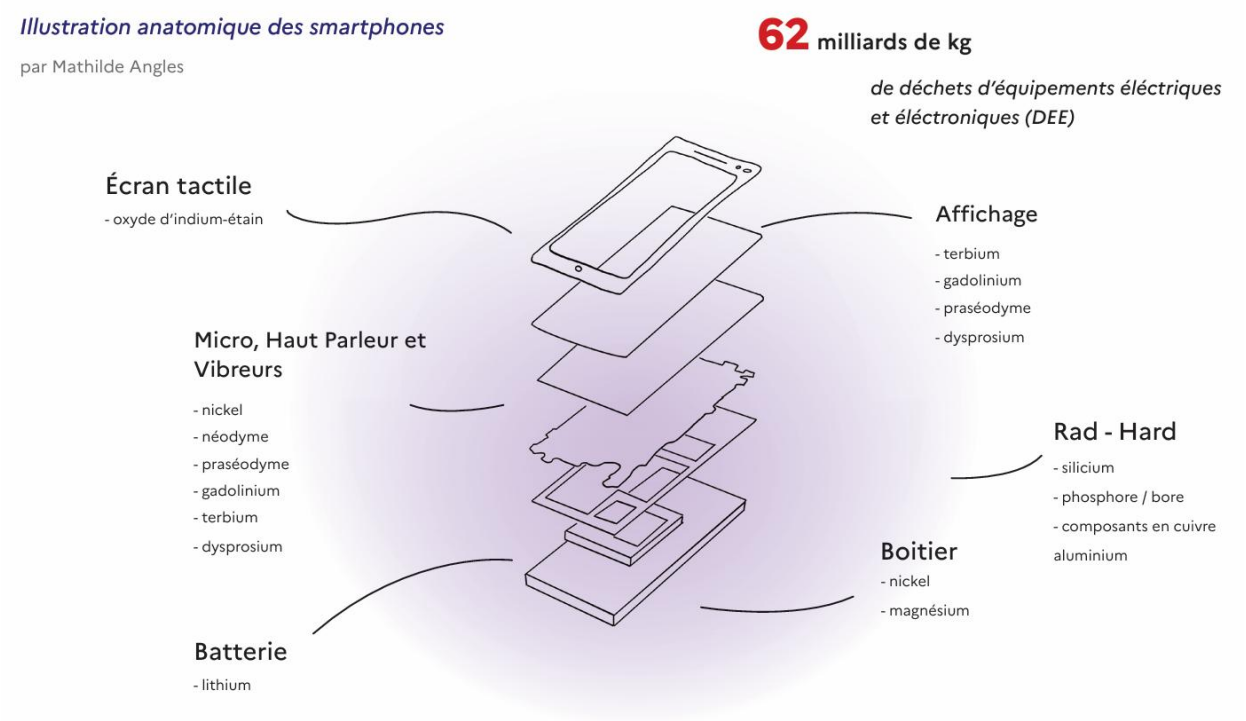
_ Les Usages nationaux en semi-conducteurs

Les technologies de puissance répondent souvent à des besoins technologiques exigeantes de dernière génération. Ces technologies sont employées dans les secteurs du militaire, de l'aérospatial, de l'industrie ou encore à l'approvisionnement des data centers dans le cadre de l'usage des intelligences artificielles entraînées avec de la donnée de masse appelée big data. Ces centres de données nécessitent principalement des puces de gestion de puissance **(GPU, GaN et SiC)**.

Types de CI	Fonction	Utilisations communes
Analogique	Traite les signaux continus	Équipements audio et vidéo, capteurs, gestion de l'alimentation
Numérique	Traite les données binaires (0 et 1)	Ordinateurs, smartphones et calculatrices
Signal Mixe	Combines fonctions analogiques et numériques	Convertisseurs de données, traitements de signaux RF et communication
Gestion de puissance	Gère les besoins énergétiques en convertissant et régulant la tension	Appareils fonctionnants sur batterie, smartphones, ordinateurs portables et électroniques automobiles
Radio Fréquence (RF)	Traite les signaux à haute fréquence pour la communication sans fil	Smartphones, routeurs WI-FI et système GPS
Système sur puce (SoC)	Intègre toutes les composantes d'un système électronique sur une seule puce	Smartphones, tablettes et systèmes embarqués
Systèmes sur puce (ASIC)	Conçue sur mesure pour des applications spécifiques	Minnages et cryptomonnaies, contrôle automobiles et dispositifs médicaux

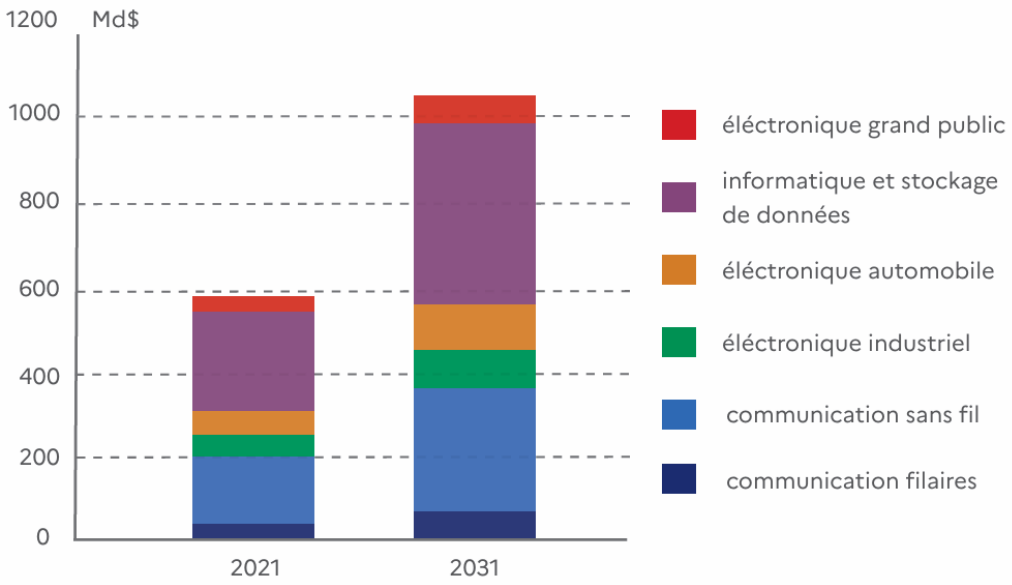
- Les besoins en dispositif semi-conducteur selon les secteurs industriels, « Integrated Circuit (IC) – Types, Function & Uses in Electronics » par Santosh Das, en ligne sur electronicsandyou - 01/07/2025.

L'aérospatial utilise par exemples des circuits intégrés de types **rad-hard** (mémoire SRAM et puce) que les radiations cosmiques ne peuvent perturber. Les FPGAS et les SoC sont reconfigurables et elles sont utilisées dans les téléphones et les ordinateurs et elles peuvent être adaptées pour des missions d'imagerie satellitaire ou sécuritaire.



Les FGPA disposent d'un grand champ d'application dans l'informatique embarquée et l'IA embarquée, le traitement d'image, le calcul intensif et le minage de cryptomonnaies. Il existe aussi des convertisseurs AD et VA qui permettent de sécuriser davantage les communications via les puces analogiques. L'aérospatial, l'aéronautique et le militaire peuvent utiliser des composants spécialisés issus du commerce grand public qu'ils modifient afin de créer un circuit fermé de communication avant la mise en autonomie de l'appareil comme pour une fusée ou un satellite. Ces composants sont pourvus de SIP fournissant la traçabilité de la puce.

Le téléphone, l'ordinateur et l'automobile sont considérées dans cette étude comme des technologies à l'intersection entre puissance et commodité. Selon les secteurs d'application loisir ou professionnel, ces technologies sont **essentielles** et se distinguent à la fois par la performance qu'elles offrent mais par le confort qu'elles assurent et dont les consommateurs ne peuvent plus se passer. Elles sont indispensables parce qu'elles se sont ancrées définitivement dans le mode de vie des consommateurs pour communiquer et se déplacer. Il s'agit de la téléphonie, de l'informatique et de l'automobile. **Ce sont aussi ces secteurs de consommation qui représentent le plus gros du marché des semi-conducteurs.**



- Le marché des semi-conducteurs en 2021 par domaine d'application, prévisions pour 2030 (Md$), d'après Les Thémas de la DGE n°27, 01/2025.

Ces trois technologies utilisées au quotidien sont aujourd'hui connexes les unes aux autres, que ce soit par le circuit fermé téléphone-ordinateur, par exemple chez Apple via son système IOS, l'intégration d'ordinateurs intégré dans l'automobile ou encore par l'usage du téléphone comme interface de communication entre la voiture et l'ordinateur.

Ces technologies nécessitent donc plusieurs types de puces pour leur permettre de communiquer entre elles, mais dans des proportions différentes. Un smartphone nécessite au moins cent-soixante puces. Les technologies de commodité servent davantage à optimiser des activités quotidiennes ou des usages technologiques. L'électroménager, les maisons intelligentes et les IoT ont été inclus dans cette catégorie d'études parce que l'on peut s'en passer bien que leurs usages facilitent ou optimisent les activités du quotidien. Ces technologies nécessitent des puces numériques, analogiques et à signaux mixtes liées au contrôle moteur, à la domotique.

CARTOGRAPHIE DU FUTUR

Les tendances et les scénarios qui en découlent ci-après, s'articule autour de plusieurs certitudes structurantes clairement identifiées.

Tout d'abord la polarisation États-Unis/Chine, à laquelle risque de succéder la polarisation Amérique Latine/Afrique où ces super-puissances exercent des stratégies d'influences efficaces. La pénurie structurelle des métaux critiques aura un impact massif sur l'économie et la biodiversité, notamment à cause des activités minières terrestres et marines, avec une probabilité quasi certaine. La fin de la mondialisation « heureuse » des composants qui force la France à choisir entre un alignement ou une autonomie coûteuse, pour faire face à la polarisation entre les Américains et les Chinois et atteindre 20% de la production mondiale de semi-conducteurs d'ici 2030.

Le stress hydrique au niveau de la Libye, combiné à des installations de désalinisation insuffisantes, pourrait conduire à une transformation de la Méditerranée en mer morte, et il risque de s'étendre, en accompagnant un changement climatique qui occasionnera une perte majeure de la biodiversité.

L'IA semble devenir une utilité publique, car son intégration dans la gestion de l'énergie et des réseaux est inévitable pour assurer la résilience en continu.

Enfin, les usines de semi-conducteurs devront faire face à un rationnement énergétique et s'adapter à une énergie disponible limitée ou intermittente, issue du nucléaire et des énergies renouvelables.

Des migrations climatiques auront lieu vers les pôles Sud et Nord, à l'instar de la migration Européenne vers les pays scandinaves et de la population méditerranéenne vers les pays européens, qui ont déjà commencé.

_ Les méga-tendances (Horizon 10-30 ans)

La première méga-tendance est la **fin de la loi de Moore1[6] et l'émergence du « More than Moore »** avec ouverture de l'ère du Quantique, puisqu'aujourd'hui on atteint les limites physiques du silicium et la course se déplace vers l'empilement 3D et de nouveaux matériaux comme le graphène, ainsi que vers des méthodes de conception innovante comme les puces photoniques et neuromorphiques (memristor), par exemple.

La deuxième méga-tendance identifiée renvoie à la dualité de l'IA entre Edge et Cloud, avec un besoin massif de puces basse consommation pour l'IA embarquée afin de limiter la dépendance aux centres de données.

La troisième méga-tendance met en évidence l'épuisement des ressources abiotiques, avec de fortes tensions sur le néon, le tungstène et les terres rares avec un rationnement énergétique des fabs, qui devront s'adapter à une énergie disponible limitée ou intermittente (nucléaire/énergies renouvelables).

La quatrième méga-tendance renvoie au nécessaire retour des liens sociaux et à la mutualisation de services du quotidien, dans une logique de sobriété et de détachement partiel de la technologie pour les classes défavorisées et intermédiaires.

_ Les tendances (Evolutions mesurables aujourd'hui)

Les Méga-tendances se précisent vers des tendances.

La première correspond au « Chips Act » européen, qui traduit la volonté de l'Union européenne de doubler sa part de marché mondiale des semi-conducteurs pour atteindre 20 % d'ici 2030 ; il s'agit d'une initiative stratégique pour reconstruire et densifier la chaîne de valeur sur le continent.

La deuxième tendance concerne la verticalisation des géants du numérique, comme Apple, Google et Amazon, qui conçoivent leurs propres puces afin d'optimiser le rapport entre performance et consommation d'énergie.

La troisième tendance est la montée de l'architecture RISC-V, une architecture de jeu d'instructions gratuite et ouverte permettant l'innovation collaborative des processeurs et offrant une alternative aux licences ARM et Intel.

La quatrième tendance correspond aux pénuries cycliques et à la volatilité des prix, liées notamment aux tensions autour de Taïwan et du Détroit d'Ormuz, qui impactent la production mondiale des semi-conducteurs essentiels ; en cas d'aggravation du conflit avec la Chine, la

---

[6] *Formulée en 1965 par Gordon Moore, elle prédisait que le nombre de transistors sur une puce allait doubler tous les deux ans, entraînant une augmentation de la puissance de calcul et une baisse des coûts*

production pourrait être ralentie ou bloquée, provoquant des pénuries et une forte hausse des prix.

Enfin, la dernière tendance est celle du Green Computing, marqué par une pression réglementaire accrue pour afficher l'indice de réparabilité et l'empreinte carbone des composants, avec pour objectif d'optimiser l'usage des équipements informatiques et de réduire leur impact environnemental.

_ Les hypothèses du futur selon les cygnes noirs

Dans les hypothèses, qui servent de préambule au scénario du futur désirable, nous envisageons malgré tous des cygnes noirs qui pourraient limiter ou mettre hors-jeu les possibilités de mitigation de la situation actuelle.

Le premier et le plus évident, est la réintégration, avant 2030, de Taïwan, provoquant l'embargo global chinoise sur la technologie et l'économie mondiale.

Ensuite, il y a des cygnes noirs qui pourraient résulter chacun sur un black-out technologique. Nous pensons au **Q-day1**[7] qui approche et à une cyber-attaque du type "Virus Silicium" semblable au Ver Stuxnet, mais qui serait utilisée pour court-circuiter les puces électroniques2[8], dépendantes ou non des algorithmes. Ce cygne noir peut aller dans le sens d'une guerre entre IA militaires, abimant ainsi les systèmes technologiques adversaires. Cet événement peut déboucher sur un black-out général d'urgence.

Dans le registre militaire, il y a aussi le discours à l'Ile Longue du président Emmanuel Macron le 2 mars 2026, qui fait des références à la militarisation de l'Espace et à des projets d'armes nucléaires qui peuvent augurer la détonation de missiles nucléaires russes, susceptibles de détruire une constellation satellitaire régionale et d'empêcher l'accès à l'Espace, pendant au moins 10 ans, aux puissances de la zone concernée. Le black-out peut également être causé par une éruption solaire forte, imprévisible et tout à fait probable, en dépit des prévisions scientifiques. En juin 2025, la NASA avait déjà mis en évidence une corrélation entre les éruptions solaires et la chute des satellites du réseau Starlink à cause d'une forte activité solaire entre 2020 et 2024. Cela pourrait occasionner un inversement du besoin en semi-conducteurs et inverser la courbe des marchés de l'électronique, puisque tout l'environnement systémique de la technologie serait morcelé.

La Crise de l'eau montre déjà des signaux faibles dus au réchauffement climatique, avec un stress hydrique dans le pourtour méditerranéen et un besoin accru en eau pure pour les data centers et la fabrication de semi-conducteurs, et elle pourrait s'aggraver en cas d'éruption solaire, encourageant le phénomène d'inversement du besoin en puces électroniques. On peut s'attendre à une nouvelle pandémie mondiale, qui peut venir d'un nouveau virus par zoonose, ou bien d'une mutation des végétaux qui deviennent toxiques pour l'Humain, le pollen étant de plus en plus agressif chaque année à cause de l'anthropisation. Si l'on pense aux semi-conducteurs organiques qui sont en train d'émerger, la disparition de la biodiversité emporterait avec elle une bibliothèque d'innovations utiles pour les nouvelles technologies inspirées du vivant.

La Crise de l'énergie est probable, au vu de la consommation exponentielle d'énergies fossiles et d'électricité, malgré des énergies renouvelables au rendement encore faible. La prédation américaine sur le Vénézuéla et l'Iran pourrait indiquer un signal fort d'une crise de l'énergie à venir, notamment sur le pétrole. En France, nous pourrions en envisager une aussi, mais des solutions comme les panneaux photovoltaïques organiques et recyclables à 94% sont exploitées dans le sud de la France, et massivement en Australie, notre allié dans la transition énergétique, avec les fermes solaires. De plus, la France relance ses centrales nucléaires, avec dans l'idée de recycler des déchets grâce à des réacteurs à sel fondu. Des projets de petits réacteurs nucléaires individuels sont aussi en cours de réflexion pour être industrialisés et commercialisés sur le sol français.

[7] Le jour où un ordinateur quantique sera suffisamment stable pour casser la cryptographie

8 Aujourd'hui nous avons déjà des cas comme le overclocking / surchauffe (CPU, GPU, batteries), la manipulation de firmware (BIOS, microcode, FPGA) appelée rootkits, des attaques sur des circuits de puissance (ex : moteurs, alimentations) et des exploitations de failles matérielles (Rowhammer, glitching).

LES INGREDIENTS DU FUTUR POUR UNE FRANCE 2050 DESIRABLE

_ Les acteurs clés

Parmi les acteurs économiques français déjà évoqués, nous avons **Thalès**, l'entreprise française de substrat avancé Soitec en 2024 pour redynamiser la française Dolphin Semiconductor spécialisée dans la production de puces à faible consommation énergétique. **Air Liquid** est un fournisseur français international en gaz industriel, traitant aussi bien avec les industries chinoises que les industries américaines, qui permet de sécuriser l'approvisionnement en gaz. Si les EDA américaines venaient à ne plus être accessibles pour le design des puces semi-conductrices, il existe l'alternative anglais de la fondation FOSSi qui propose en source ouverte le logiciel LibreLane.

Il s'agit d'une option de résilience non négligeable. Dans le milieu de la recherche et de l'innovation technologique universitaire française au rayonnement international, **le CEA-Leti de Grenoble** ou encore la **Sorbonne** par l'intermédiaire du laboratoire SCAI, viennent soutenir la R&D des industriels en attirant des talents de la Tech qui viennent y développer leurs compétences. Enfin, le réseau national des **SATT** sert d'interface entre les industries et les universités. L'Agence Nationale de la Recherche finance, sélectionne et accompagne des projets de recherche en France. Elles servent de relais entre les laboratoires de recherche et les entreprises, et elles financent les phases de maturation de projet et de preuve de concept. L'un des plus gros instituts d'ingénieurs, FEMTO-ST, rattachées à plusieurs universités. La France dispose du premier incubateur européen d'IA et d'algorithmes, **Station F** à Paris, et la technopole européenne Sophia Antipolis près d'Antibes. Elle a en sa possession nombre d'atouts non négligeables pour s'imposer sur le plan européen et international pour encourager la microélectronique innovante et la sobriété technologique, afin de maintenir son industrie et sa souveraineté.

_ Les innovations

L'impression 3D appliquée à l'électronique connaît des avancées significatives.

En 2024, le KTH Royal Institute of Technology a développé des micro-supercondensateurs en verre fabriqués par impulsions laser ultrabrèves, permettant d'optimiser le transport des ions tout en conservant de hautes performances lors de cycles de charge et de décharge rapides. La même année, le MIT a présenté les premières portes logiques entièrement imprimées en 3D sans semi-conducteurs conventionnels, utilisant des polymères enrichis en nanoparticules de cuivre et des transistors reposant sur une résistance électrique réversible, avec une consommation énergétique et une production de déchets réduites.

Ces innovations reposent sur l'utilisation d'encres métalliques conductrices, d'encres semi-conductrices ou **diélectriques, d'encres carbonées et de filaments composites conducteurs.** Elles s'appuient également sur diverses technologies de fabrication, telles que la micro-impression 3D, l'extrusion de matière, le jet d'encre ou d'aérosol, la sérigraphie et les procédés roll-to-roll. Ces techniques permettent la fabrication de supercondensateurs, d'étiquettes RFID, de circuits imprimés, d'électrodes, de condensateurs, de transistors, d'antennes, de capteurs nano-électromécaniques ou encore de dispositifs de stockage optique 5D.

Elles contribuent à réduire les coûts et les délais de prototypage, favorisent la personnalisation des composants et facilitent une production plus locale et distribuée, dans un marché dont la croissance annuelle est estimée à plus de 20 %. Le besoin croissant de de microélectroniques durables et efficaces, et la démocratisation de l'impression 3D peut nous amener à intégrer les métamatériaux dans les innovations d'avenir pour la microélectronique, avec une réduction de la dépendance à la miniaturisation. Les métamatériaux offrent une voie complémentaire et un accès à la sobriété technologique par le design pour une optimisation énergétique. Certaines architectures complexes peuvent être coûteuses à concevoir, simuler et fabriquer. La sobriété théorique du design doit donc être évaluée au regard du coût réel de production, des procédés utilisés et du cycle de vie complet.

Algorithme d'optimisation	Principe de l'Algorithme *(comment il booste)*	Puces spécifiquement impactées
Quantification *(Quantization)*	Réduit la précision numérique des données (32 bit à 8) pour alléger les calcul sans perdre en précision	NPU *(Calculs d'entiers ultra rapides)* GPU *(Via les architectures avec cœurs dédiés type Tensor Cores)*
Élagage *(Pruning)*	Supprime les connexions neuronales et le poids inutiles ou proches de zéro	Puces EDGE embarquées *(Permet de faire tourner le modèle dans le mémoire locale limitée)* SoC *(Réduit les transfert de données)*
Routage et Placement	Utilise le Deep Learning pour concevoir de manière autonome le tracé physique optimal des composants microscopiques sur le silicum	ASIC *(Optimise les distances de transfert et la vitesse globale)* Gestion de puissance *(Diminue la résistance électrique et la chaleur)*
Compression de mémoire *(In-memory Computing Logic)*	Structure les données pour exécuter les calculs directement au cœur de la mémoire sans avoir à les déplacer	*SoC (Élimine le goulot d'étranglement historique entre la RAM et le CPU)*

Leur intérêt ne repose pas uniquement sur la composition chimique du matériau, mais sur son architecture interne, sa géométrie et sa structuration à différentes échelles. Cette approche permet de produire des fonctions nouvelles par le design de la matière : contrôle des ondes électromagnétiques, gestion thermique, filtrage, absorption, focalisation, détection, contrôle acoustique ou manipulation des vibrations. Les métamatériaux peuvent donc être considérés comme une voie d'innovation transversale, située entre science des matériaux, électronique, photonique, acoustique, mécanique, radiofréquences et fabrication avancée. Le principal avantage des métamatériaux est de permettre des propriétés difficiles, voire impossibles, à obtenir avec des matériaux classiques. Ils peuvent contrôler la propagation des ondes électromagnétiques, acoustiques ou mécaniques, ce qui ouvre des applications dans les communications, la détection, l'imagerie, le filtrage et la protection. Comme l'industrie des semi-conducteurs repose sur des procédés très standardisés. L'introduction de métamatériaux impose de vérifier leur compatibilité avec les technologies CMOS, les procédés de lithographie, les contraintes thermiques, les étapes d'assemblage et les exigences de fiabilité. Le Graphène constitue un support intéressant pour explorer les dispositifs inspirés de métamatériaux, par ses propriétés électroniques, thermiques, mécaniques et optiques en font un matériau adapté aux capteurs, à l'électronique flexible, aux interfaces intelligentes et à certaines applications photoniques. Les semi-conducteurs organiques émergents peuvent également remplacer une partie des semi-conducteurs métalliques traditionnels ou permettre des circuits intégrés hybrides, notamment dans les applications optoélectroniques, afin de réduire la dépendance aux terres rares.

Concernant le besoin en recyclage, de récents projets de recherche ont été déposés auprès de l'Agence nationale de la Recherche, au sein du PEPR Recyclage. Les apports de ce projet pourraient nous permettre de mieux cerner les possibilités d'innovation de ce secteur émergent, encore très polluant, coûteux et très complexe à mettre en place. Enfin, nous avons les algorithmes qui peuvent nous permettre de «booster» les capacités microélectroniques

_ Les limites

Limites fonctionnelles

Les semi-conducteurs organiques (SCOs) souffrent d'une mobilité de charge limitée

(généralement 0,1-10 $cm^2/V{\cdot}s$ contre 100-1000 $cm^2/V{\cdot}s$ pour le silicium cristallin) et d'une stabilité chimique modérée. L'électronique imprimée reste limitée par la résolution d'impression (généralement >10 µm contre <1 nm pour la lithographie avancée), la reproductibilité et la durée de vie des dispositifs.

L'impression 3D d'électronique doit relever des défis de précision (résolution limitée), de reproductibilité industrielle, de coût élevé des

encres métalliques/nanoparticules et de formation des équipes. Les architectures alternatives (neuromorphiques, conversion de puissance, très hautes fréquences) se développent précisément parce que la loi de Moore ralentit. Enfin, une autre limite fonctionnelle, et pas des moindres, est celle de l'énergie pour soutenir nos industries et notre consommation quotidienne. Nous n'avons pas achevé la transition écologique et nous sommes encore dépendants des énergies fossiles comme le pétrole et le charbon. Le nucléaire a été relancé, car il s'agit d'une source «propre» mais ce n'est pas une solution pérenne, comme évoqué plus tôt dans le rapport.

Limites éthiques et sociales - l'IA

Les modèles d'IA générative (LLM) posent des enjeux de transparence, de biais, de sécurité et de protection des droits des personnes. L'intolérance systémique se manifeste par de grosses disparités de traitement entre les gens, ici par l'accès à des qualités d'IA en fonction des revenus sociaux, susceptible d'alimenter un sentiment d'injustice et de créer des tensions sociales. La question est politique, car elle touche à l'équité d'accès, à la non-discrimination et à la confiance dans les institutions.

Cela peut aussi nous amener sur la dette cognitive de l'IA. Le chercheur Michael Gerlich (relayé par New Scientist) a démontré que la délégation non encadrée à l'IA entraîne une **baisse mesurable de la qualité des raisonnements produits**, avec une étude expérimentale menée dans trois pays européens sur 150 participants. L'étude de Gerlich révèle aussi que lorsque l'usage de l'IA est structuré (protocole en cinq étapes : Réflexion personnelle, Collecte ciblée, Construction d'argument, Confrontation à l'IA, Révision finale), les effets néfastes disparaissent et les participants maintiennent un niveau élevé de raisonnement.

Gaspard Koenig (Philosophe) alerte aussi sur le risque «d'atrophie des zones» de notre cerveau dédiées à la prise de décision lorsque l'on délègue notre faculté de raisonner et de décider à l'IA. Les questions éthiques de notre époque doivent nous permettre de poser une limite sur un éventuel usage excessif de ces innovations, et encourager la sobriété technologique et le lien social. Ces interrogations dépassent toutefois le seul cadre de l'intelligence artificielle. Les progrès des semi-conducteurs et des interfaces homme-machine soulèvent désormais une question plus fondamentale : Jusqu'où la technologie doit-elle accompagner l'être humain sans chercher à le transformer ou à l'augmenter ? Cette réflexion conduit directement aux débats actuels autour du transhumanisme.

Limites - le transhumanisme

Pour revenir précisément sur la question des semi-conducteurs, les déclarations chocs d'Elon Musk et Alexandre Wang dans la presse sur des puces intégrées au cerveau, pour créer des humains augmentés cognitivement, ont amené notre groupe à se questionner sur la vulnérabilité des personnes pourvues d'un handicap.

Cependant, l'agence américaine pour les projets de recherches avancées de défense de recherche sur des puces capables de soigner la cécité ou la surdité. En France, pour l'INSEI, **l'innovation doit rester au service de l'humain, de ses droits et de la confiance collective, et non viser une transformation radicale et augmentée du corps humain.** Ils prennent l'angle d'approche de Patrick Fougeyrollas, selon lequel le handicape apparaît comme une déficience, résultant de l'interaction avec l'environnement qui n'est pas adapté à l'individu. Ce fait peut s'atténuer avec la présence d'un facilitateur, pour une école plus inclusive et être accompagné technologiquement avec des bloc-notes brailles électroniques, par exemple.

CONCLUSION GENERALE

À l'horizon 2050, la microélectronique ne pourra plus être pensée uniquement comme une industrie de la performance ou de la miniaturisation. Les contraintes climatiques, la raréfaction des ressources, les tensions géopolitiques et la fragmentation progressive de la mondialisation imposent une redéfinition des finalités technologiques. La véritable souveraineté ne résidera probablement pas dans une impossible autarcie, mais dans la capacité à maîtriser ses dépendances critiques, à sécuriser les usages essentiels et à arbitrer collectivement entre puissance, innovation, écologie, résilience et sobriété fondamentale qui est celle de la priorisation des usages militaires, industriels et médicaux et qui ouvrent sur des sujets sociaux comme l'urbanisme, la morphologie sociétale pour trouver un compromis entre les modèles de Georges Simmel, et Max Weber.

Annexes

ANNEXE 1 : les retours d'expérience

Thibaud Rifflart, chef de projet MANTU

Hugo Riffaud de Turckheim, Doctorant en intelligence artificielle

Mohammed Tmimi, Docteur sur les semi-conducteurs

Amine Allouach, Ingénieur spécialisé en mécanique

Yann Kersalé, Directeur du FR2038 (LabEx) FIRST-TF - FEMTO-ST.

Thomas Baron, Directeur de MIMENTO - SUPMICROTECH-ENSMM, spécialisé sur les dernières avancées en microélectronique.

Muamer Kadic, Professeur des Universités - SUPMICROTECH-ENSMM / Université Marie et Louis Pasteur, spécialisé sur les métamatériaux.

Hervé Benoit, Maître de conférences des universités émérite en sciences de l'éducation et de la formation - INSEI.

Frédéric Dupré, Maître de conférences en sciences de l'éducation et de la formation - INSEI.

Raphaël Gerson, Conseiller Expert - Responsable de l'ADEME Académie, Direction Exécutive de l'Expertise et des Programmes.

Cible de l'entretien : Thibaud Rifflart, chef de projet MANTU

Lieux : PARIS

Contact : trifflart@mantu.com - 07 56 87 43 63

Objectif : Faire une approche de l'éco-system des semi-conducteurs.

Conditions de l'entretien : 16/09/2025

Synthèse des points clés : Semi-conducteur, Taïwan, wafer, loi de Moore.

Cible de l'entretien : Hugo Riffaud de Turckheim, doctorant sur les Modèles fondamentaux géo-spatiaux pour l'observation de la Terre : intégration de données textuelles et de télédétection.

Lieux : PARIS

Contact : 06 40 42 66 28

Objectif : Comprendre les technologies et les acteurs autour des semi-conducteurs.

Conditions de l'entretien : 20/09/2025

Synthèse des points clés : Semi-conducteur, STMicroelectronics, Intelligence artificielle, ordinateur quantique, Donald Trump, taxes douanières.

Cible de l'entretien : Mohamed TMIMI, docteur sur les semi-conducteurs

Lieux : **PARIS**

Contact : mohammed.tmimi@nanochips-consulting.com - 06 67 25 71 55

Objectif : Comprendre les technologies autour des semi-conducteurs.

Conditions de l'entretien : 08/10/2025

Synthèse des points clés : Semi-conducteur, Taïwan, containment technologique.

Cible de l'entretien : Amine Allouach, ingénieur spécialisé en mécanique.

Lieux : PARIS

Contact :

Objectif : Comprendre les besoins en semi-conducteurs dans le spatial et l'aéronautique.

Conditions de l'entretien : 22/10/2025

Synthèse des points clés : Semi-conducteur, Aérospatial, Aéronautique,

Guide d'entretien

Cible de l'entretien (nom, prénom, statut, entreprise/institution) : Yann Kerslé, directeur du FR2038 (LabEx) FIRST-TF , institut FEMTO-ST

Lieux : en visio, Paris.

Contact (mail/téléphone): 03 81 40 27 63/ muamer.kadic@univ-fcomte.fr

Objectif : RETEX pour BUTTERFLY 2050

Conditions de l'entretien (date, physique/distanciel) : mercredi 20 mai, distanciel.

Synthèse des points clés : Temps-fréquence, micro-horloge – data center énergivore -

1. **Quels projets stratégiques vous paraissent aujourd'hui les plus prometteurs dans la microélectronique française ?**

2. **La souveraineté technologique est-elle encore accessible à la France ?**
3. **Quels sont les principaux obstacles à une microélectronique plus durable ?**
4. **La sobriété technologique est-elle réellement compatible avec l'évolution actuelle des semi-conducteurs ?**
5. **Quel rôle jouent aujourd'hui les matières premières stratégiques ?**
6. **L'intelligence artificielle peut-elle devenir un outil de résilience énergétique ?**
7. **Quelles ruptures technologiques pourraient transformer le secteur des semi-conducteurs ?**
8. **Quel regard portez-vous sur le développement du calcul quantique ?**
9. **Les métamatériaux et la photonique représentent-ils une voie d'avenir ?**
10. **L'intelligence artificielle crée-t-elle déjà des tensions sur la chaîne de valeur des semi-conducteurs ?**
11. **L'IA doit-elle devenir le moteur principal de la transformation technologique ?**
12. **Peut-on imaginer une chaîne de production de semi-conducteurs véritablement sobre ?**
13. **Quels risques géopolitiques pourraient affecter l'industrie des semi-conducteurs ?**

Guide d'entretien

Cible de l'entretien : Thomas Baron, Directeur de MIMENTO - SUPMICROTECH-ENSMM, spécialisé sur les dernières avancées en microélectronique.

Lieux : en visio, Paris.

Contact (mail/téléphone): thomas.baron@femto-st.fr

Objectif : RETEX pour BUTTERFLY 2050

Conditions de l'entretien (date, physique/distanciel) : mardi 19 mai, distanciel.

Synthèse des points clés : Niobate de lithium - quartz –films minces- marchés de niche – métiers manuels – MIMEDI – Bio IMP – biopuces

1. **Comment réduire la dépendance française aux importations de matériaux stratégiques comme le niobate de lithium ?**
2. **Comment évoluent aujourd'hui les technologies photoniques ?**
3. **La nanophotonique peut-elle contribuer à réduire la consommation énergétique ?**
4. **Comment la France peut-elle rester dans la course face aux grands acteurs internationaux ?**
5. **Quels sont les principaux freins au développement d'une filière française ?**
6. **Le défi est-il uniquement économique ?**
7. **Quels sont aujourd'hui les besoins les plus importants pour la filière ?**
8. **Pouvez-vous citer des exemples de projets industriels structurants ?**
9. **Vous avez également évoqué les MEMS. Quels sont les enjeux dans ce domaine ?**
10. **Comment imaginez-vous le métier d'ingénieur en 2050 ?**
11. **Qu'entendez-vous par hybridation des métiers ?**
12. **Quels métiers pourraient émerger avec l'intelligence artificielle ?**
13. **Quels travaux menez-vous dans le domaine biomédical ?**
14. **Peut-on imaginer de nouveaux métiers liés à la gestion de la puissance de calcul ?**
15. **Pour conclure, quelles qualités humaines restent essentielles dans les métiers de l'ingénierie ?**

Guide d'entretien

Cible de l'entretien : Muamer Kadic, ingénieur- chercheur spécialisé sur les métamatériaux, institut FEMTO-ST

Lieux : en visio, Paris.

Contact (mail/téléphone): 03 63 08 24 64/ muamer.kadic@univ-fcomte.fr

Objectif : RETEX pour BUTTERFLY 2050

Conditions de l'entretien (date, physique/distanciel) : mercredi 20 mai, distanciel.

Synthèse des points clés : Métamatériaux – photonique – Impression 3D

1. **Comment la France peut-elle rester compétitive dans les semi-conducteurs face aux grandes puissances ?**
2. **La France doit-elle chercher à rattraper son retard dans la microélectronique classique ?**
3. **L'impression 3D constitue-t-elle le véritable futur de la microélectronique ?**
4. **La fabrication additive permettra-t-elle une nouvelle étape de miniaturisation ?**
5. **Comment rendre la production électronique plus sobre sur le plan environnemental ?**
6. **Les métamatériaux peuvent-ils transformer l'avenir de la microélectronique ?**
7. **Le futur de l'électronique passe-t-il par la disparition progressive de l'électronique ?**
8. **Pourquoi l'optique pourrait-elle remplacer l'électronique dans le calcul informatique ?**
9. **Les réseaux de neurones optiques constituent-ils une rupture technologique majeure ?**
10. **Quels métiers pourraient émerger dans un monde dominé par l'IA et les nouvelles technologies ?**
11. **Quels métiers risquent de disparaître avec l'intelligence artificielle ?**
12. **Quels risques l'intelligence artificielle fait-elle peser sur la prise de décision humaine ?**
13. **Quels sont les principaux cygnes noirs pouvant affecter l'avenir des semi-conducteurs ?**
14. **Le rattachement de Taïwan à la Chine est-il inévitable ?**
15. **Quels partenaires stratégiques pour la France dans un monde multipolaire ?**
16. **Comment certains États ont-ils construit leur autonomie technologique ?**
17. **Pourquoi l'indépendance technologique est-elle devenue un enjeu central ?**
18. **Le système français de formation favorise-t-il suffisamment l'innovation de rupture** ?
19. **Quels profils de dirigeants seront nécessaires pour affronter les ruptures technologiques du XXIe siècle ?**

Guide d'entretien

Cible de l'entretien (nom, prénom, statut, entreprise/institution) : Frédéric DUPRÉ et Hervé Benoît (émérite), maîtres de conférences en Sciences de l'éducation et de la formation, à l'INSEI

Lieux : en visio, Paris.

Contact (mail/téléphone): 01 87 10 71 53 / frederic.dupre@insei.fr/ herve.benoit@insei.fr

Objectif : RETEX pour BUTTERFLY 2050

Conditions de l'entretien (date, physique/distanciel) : lundi 11 mai, distanciel.

Synthèse des points clés : Patrick Fougeyrollas – transhumanisme - modèle du Processus de Production du Handicap

1. **Le handicap est-il un manque individuel ou une situation produite par l'environnement ?**
2. **Que nous apprend l'exemple de la surdité sur la dimension sociale du handicap ?**
3. **Les décideurs peuvent-ils dépasser une approche centrée sur l'individu ?**
4. **Comment définir concrètement une société inclusive ?**
5. **Comment orienter les technologies vers l'accessibilité plutôt que vers la compensation ?**
6. **Quel rôle doivent jouer les entreprises et les pouvoirs publics ?**
7. **Comment hiérarchiser les priorités d'innovation ?**
8. **Faut-il privilégier les technologies individuelles ou transformer les environnements ?**
9. **Pourquoi le contexte est-il central dans toute réflexion prospective ?**
10. **Quels modèles de société du travail souhaite-t-on pour 2050 ?**
11. **Quels enseignements tirer des évolutions internationales récentes ?**

Guide d'entretien

Cible de l'entretien (nom, prénom, statut, entreprise/institution) : Raphaël Gerson, Conseiller Expert – Responsable de l'ADEME Académie

Lieux : en visio, Paris.

Contact (mail/téléphone): raphael.gerson@ademe.fr

Objectif : RETEX pour BUTTERFLY 2050

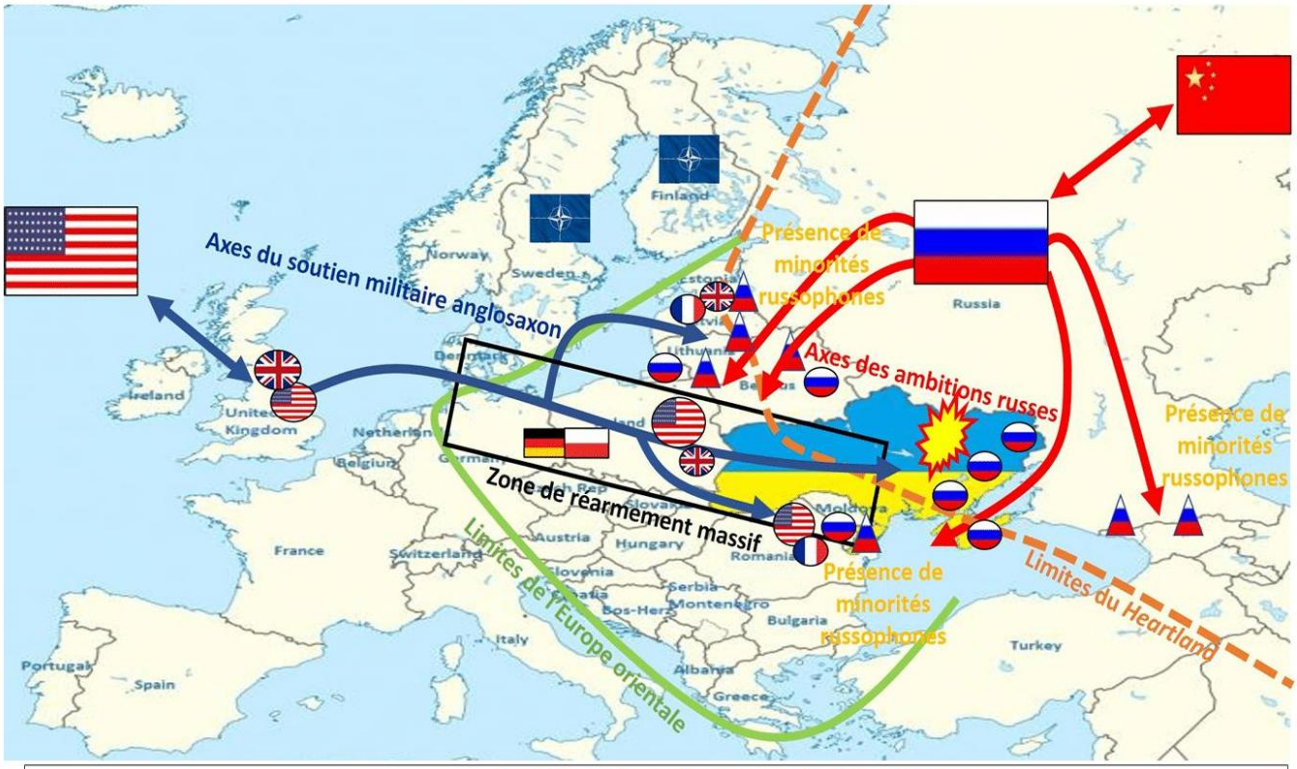
Conditions de l'entretien (date, physique/distanciel) : jeudi 21 mai, distanciel.

Contexte : Synthèse des points clés : Emissions - écologie – data center énergivore - véhicules électriques légers – métiers manuels – décarbonation – sobriété technologique

1. **Les data centers constituent-ils un enjeu environnemental majeur à l'horizon 2050 ?**
2. **La France est-elle sur une trajectoire compatible avec les objectifs climatiques ?**
3. **Quels sont aujourd'hui les principaux leviers de décarbonation ?**
4. **Quel avenir pour l'hydrogène vert ?**
5. **Quel secteur représente aujourd'hui le principal défi climatique ?**
6. **Les véhicules hybrides constituent-ils une solution pertinente ?**
7. **Le véhicule électrique est-il réellement plus écologique ?**
8. **Les ressources minérales risquent-elles de devenir un facteur limitant ?**
9. **Quels sont les principaux cygnes noirs susceptibles de bouleverser la transition écologique ?**
10. **Quels risques sociaux pourraient émerger d'ici 2050 ?**
11. **L'intelligence artificielle constitue-t-elle un cygne noir potentiel ?**
12. **Quels métiers pourraient se développer dans les décennies à venir ?**
13. **Les métiers manuels sont-ils moins menacés par l'IA ?**
14. **Le changement climatique peut-il fragiliser notre système énergétique ?**
15. **Quels autres enjeux environnementaux méritent une attention particulière ?**
16. **Quel message principal retenez-vous pour 2050 ?**

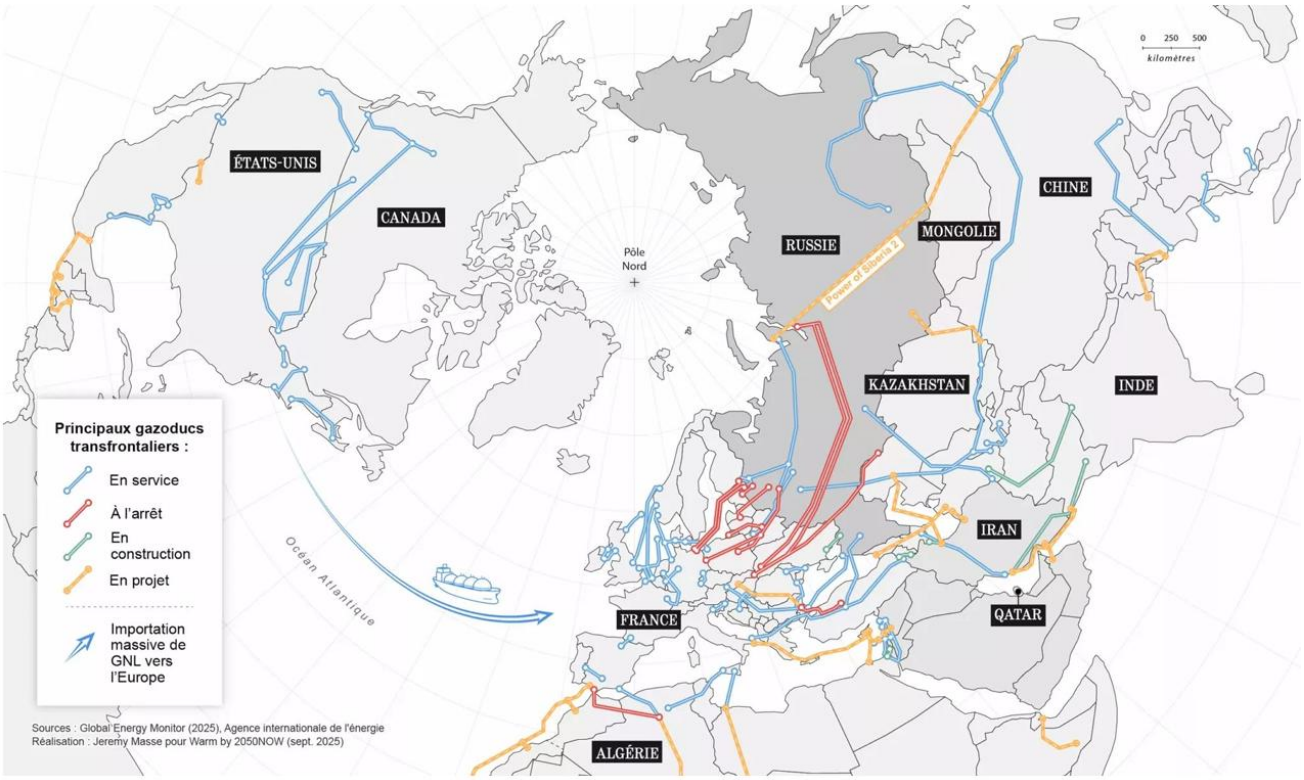
ANNEXE 2 : les cartes géographiques

Carte géopolitique des puissances s'affrontant en Ukraine



Carte géopolitique des puissances s'affrontant en Ukraine, source « Le Retour de la logique des blocs comme défi à la souveraineté européenne », de Arnaud Peyronnet, Fondation Méditerranéenne d'Etudes Stratégiques, en ligne le 2 novembre 2022.

Carte des connexions de gazoducs à l'échelle mondiale



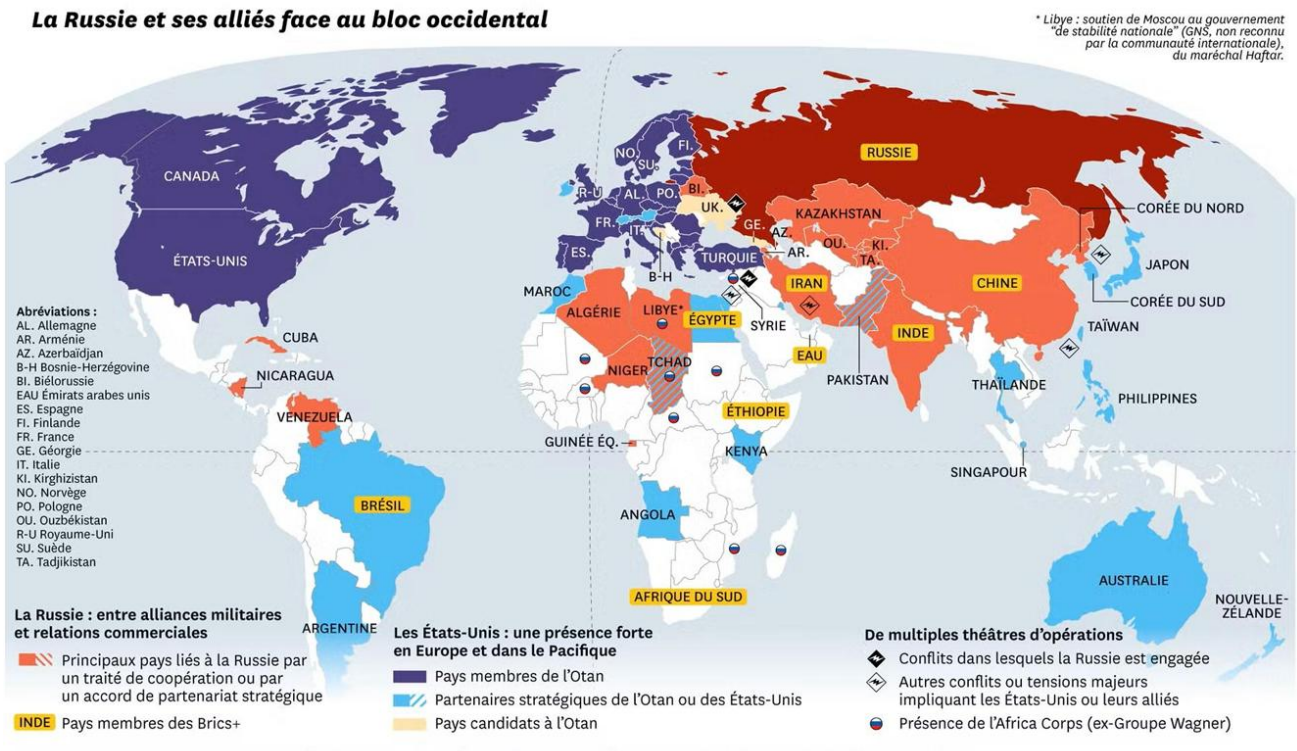
Carte des connexions de gazoducs à l'échelle mondiale, source « Russie – Chine - Etats-Unis : les nouvelles guerres du gaz », WARM en ligne le 17 septembre

Carte des terres rares dans le monde



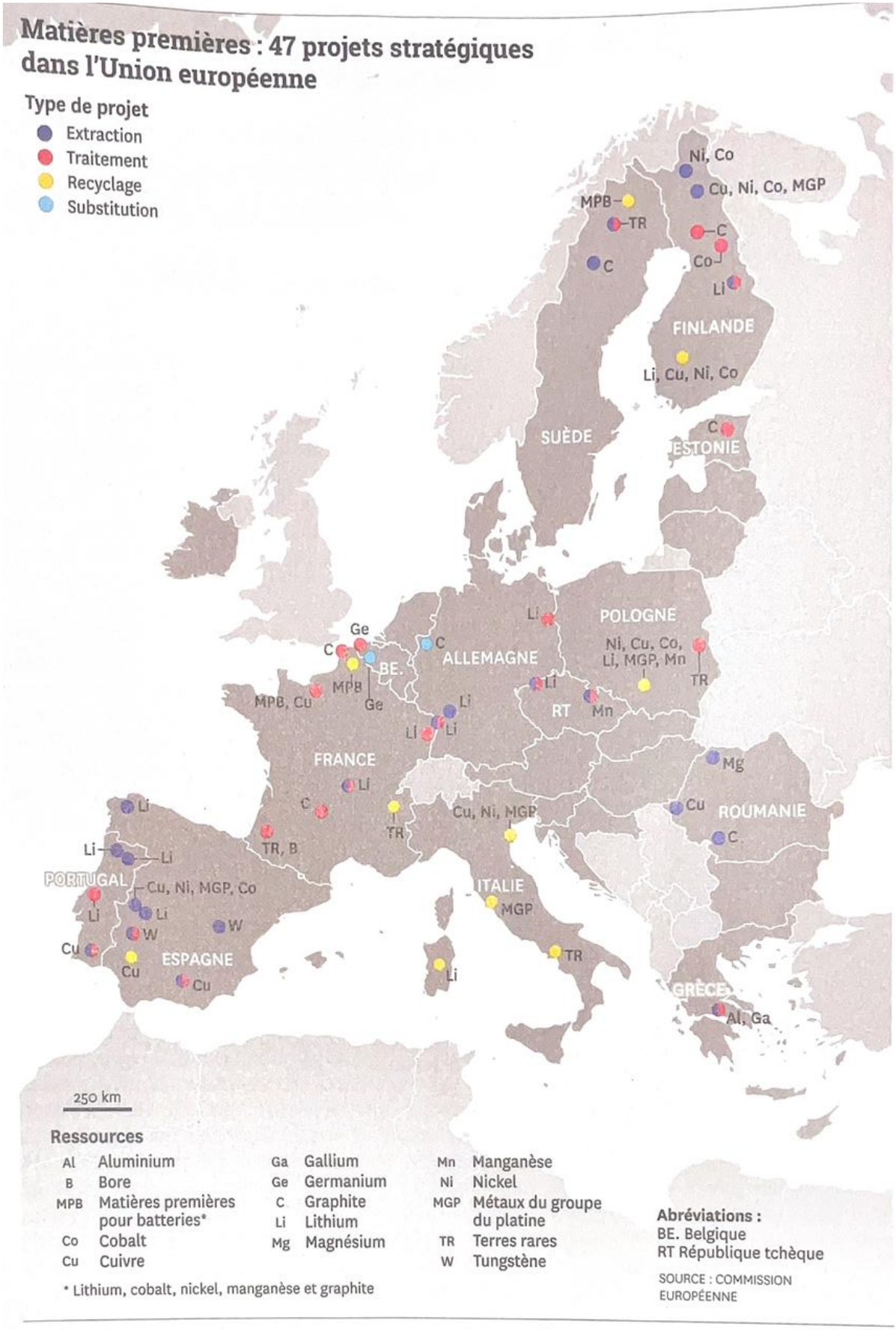
Carte des terres rares dans le Monde, source « Le marché des terres rares en 2022 : filières d'approvisionnement en aimants permanents », MinéralInfo, en ligne le 4 juillet 2022

Carte des alliances militaires et commerciales de la Russie

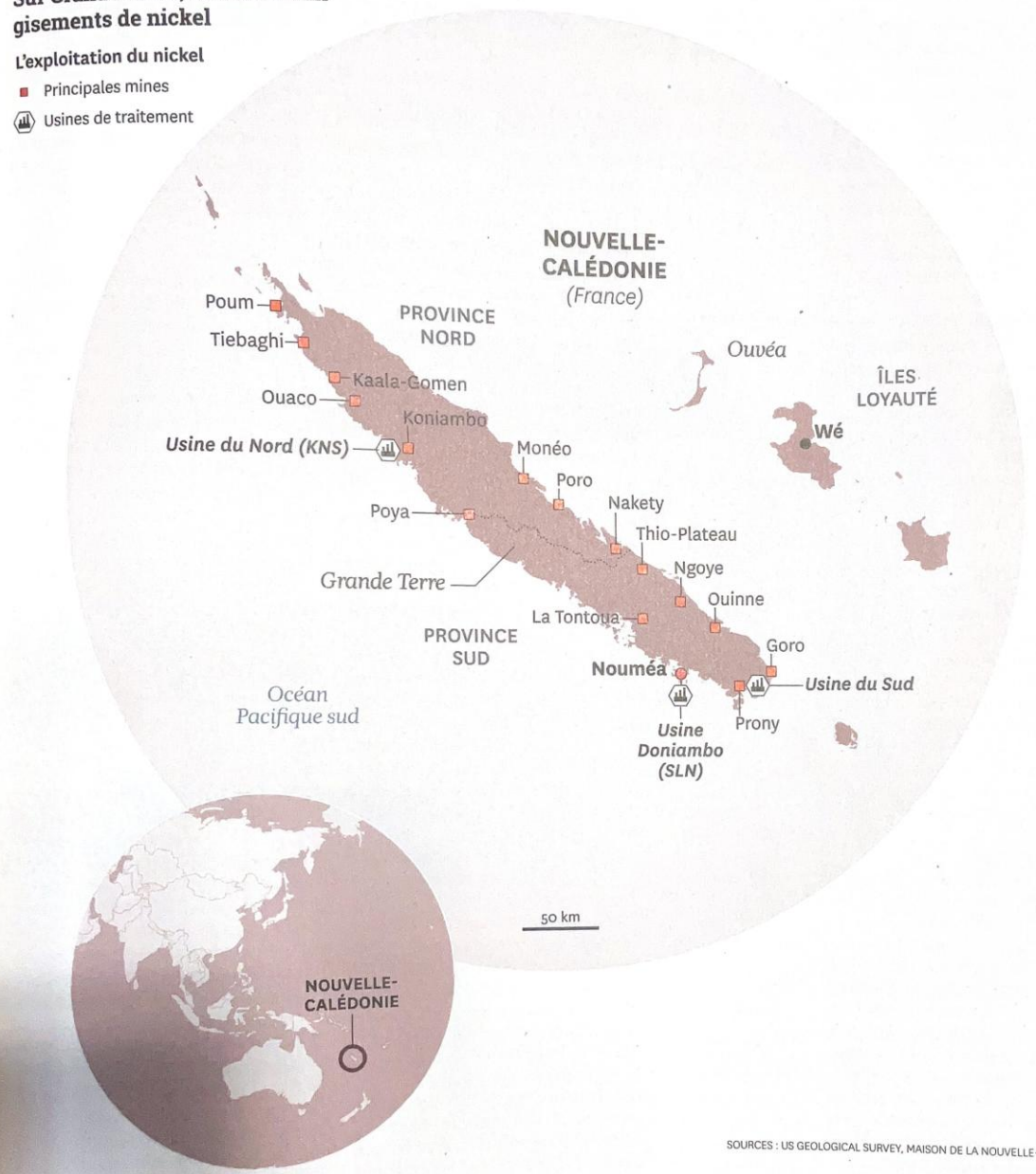


Carte des alliances militaires et commerciales de la Russie, source « Qui sont les alliés de la Russie ? », Courrier international, en ligne le 1er décembre 2024

Carte des rares en Europe et dans les fonds marins, Courrier International, "L'autonomie pour mot d'ordre", hors-série août-septembre 2025, p.13-28



Sur Grande Terre, de nombreux gisements de nickel



SOURCES : US GEOLOGICAL SURVEY, MAISON DE LA NOUVELLE-CALÉDONIE

grisonnante et short de rigueur pour un militant écologiste. Il travaille pour l'association Environord, qui suit de près l'impact de l'activité minière sur l'archipel. D'où nous sommes, il pointe une autre montagne, décapitée par l'exploitation du nickel. De profonds sillons parcourent le mont Poindas, comme un corps tailladé couvert de cicatrices.

Le père de Glenn était lui-même chauffeur de camion dans cette mine. Aujourd'hui, son fils tient l'industrie pour responsable, non seulement de la destruction des reliefs, mais aussi de la pollution des rivières et du lagon par les métaux lourds, et de la contamination de l'air par les particules fines. L'énergie qui alimente les trois usines de l'île, nécessaires à l'extraction du nickel, provient encore du charbon. Résultat : la Nouvelle-Calédonie (270000 habitants) figurait parmi les cinq plus gros émetteurs de CO_2 par habitant au monde en 2023 (source : Emissions Database for Global Atmospheric Research).

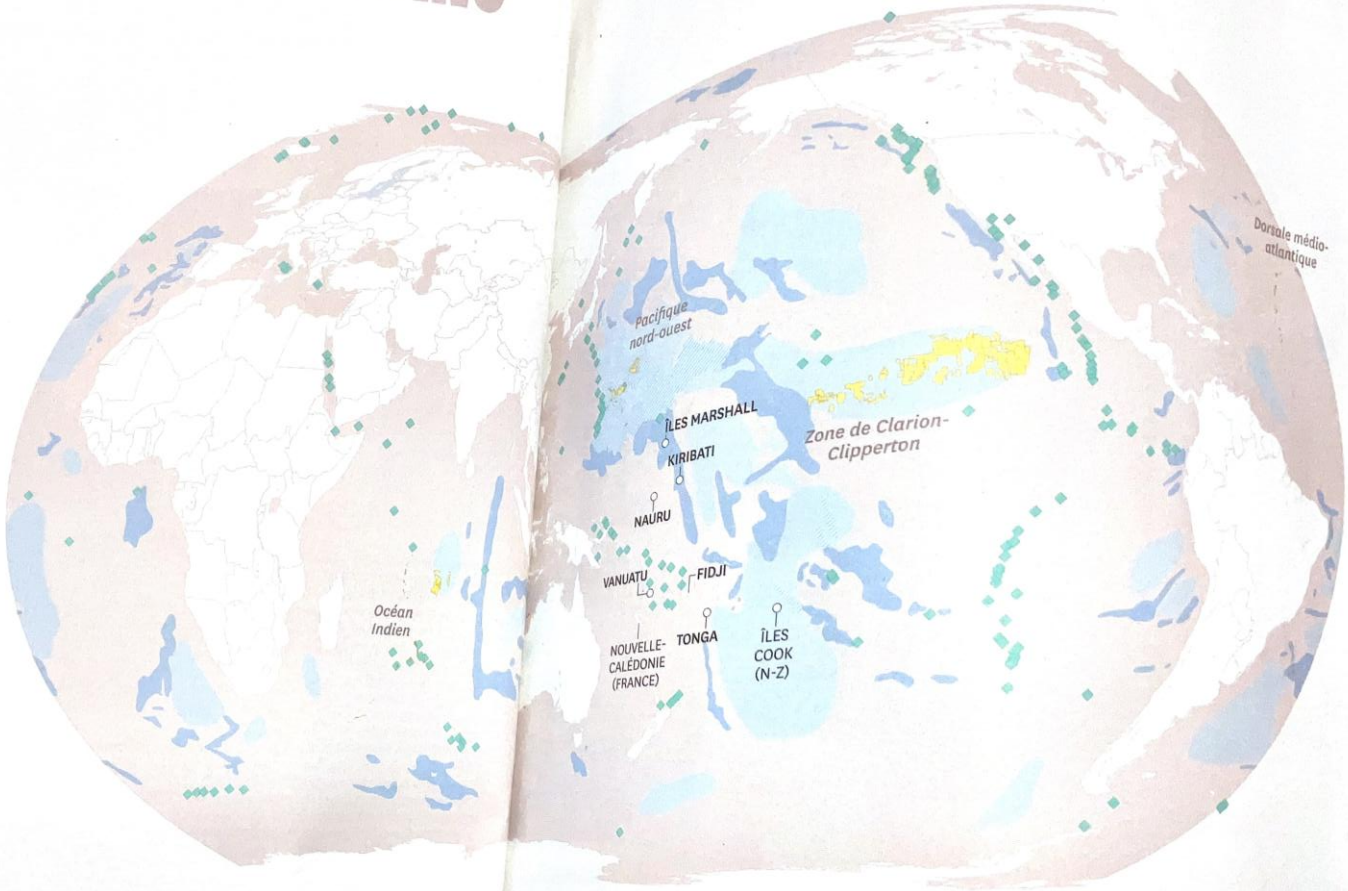
"Si on veut vraiment une économie verte, il va falloir réapprendre à monter

À L'ASSAUT DES OCÉANS

Manganèse, cuivre, zinc, cobalt... Les grands fonds recèlent moult minerais stratégiques. Du moins le suppose-t-on, car 99,99 % de ces surfaces n'ont jamais été observées par l'œil humain, rappelait une étude parue dans **Science Advances** en mai 2025. Peu importe : pour certains, l'enjeu est trop grand. Donald Trump a ainsi signé le 24 avril un décret qui prépare les États-Unis à exploiter les fonds marins, y compris dans les eaux internationales du Pacifique.

Certains États de cette région sont déjà en quête de partenaires. En mars 2025, *"le ministre de la Pêche et des Ressources marines de Kiribati a dit s'être entretenu avec l'ambassadeur de Chine afin de 'réfléchir à d'éventuelles collaborations en matière d'exploitation durable des ressources des grands fonds marins'"*, rapportait **Benar News**, un média affilié à Radio Free Asia. Un mois auparavant, *"la Chine [avait] signé des accords de coopération sur l'exploitation minière en eaux profondes avec les Îles Cook"*, notait la chaîne de radio néo-zélandaise **RNZ**.

D'autres nations du Pacifique ne partagent pas cet enthousiasme. En mai, la Nouvelle-Calédonie a interdit pour cinquante ans l'exploitation dans sa zone maritime : *une mesure rare et radicale qui place le territoire français du Pacifique parmi les zones d'exploration les plus restreintes des eaux de la planète"*, observe le site australien **National Indigenous Times**. Fidji, le Vanuatu et les Îles Marshall eux, appelé à adopter *"un principe précaution"*, du moins jusqu'à qu'un accord soit trouvé au sein de l'Autorité internationale des fonds marins les mesures environnementales alignantes et sur un Code minier. *ès aux minerais stratégiques nds marins est une nouvelle osante de la guerre d'influence litique entre la Chine et les États-uligne* **The Diplomat**, *et gton pourrait enfreindre le droit onal pour arriver à ses fins."*



Gisements potentiels
(x) nombre de contrats d'exploration

Croûte riche en cobalt (5) · Nodules polymétalliques (19) · Sulfures polymétalliques (7) · Zones d'exploration

SOURCES : US GEOLOGICAL SURVEY, "THE GUARDIAN", AUTORITÉ INTERNATIONALE DES FONDS MARINS

PRÉCIEUX DÉCHETS

Alors que la quantité de déchets électroniques explose, seule une petite partie est recyclée. Pourtant, la valorisation de ces appareils pourrait contribuer à pallier la rareté des ressources minières.



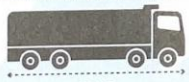
62 milliards de kg

de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) ont été produits dans le monde en 2022

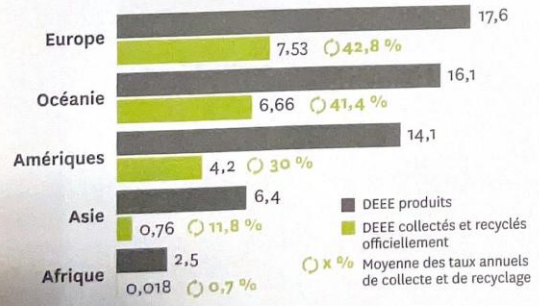
Soit 7,8 kg/habitant

Pour les contenir, il faudrait **1,55 million de camions** qui, mis bout à bout, feraient le tour de l'équateur

Depuis 2010 la croissance de la production de DEEE dépasse celle de la collecte et du recyclage officiel de **près de 5 fois**



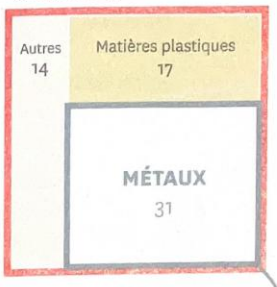
Quantité de DEEE produits et collectés
(par habitant, en kg)





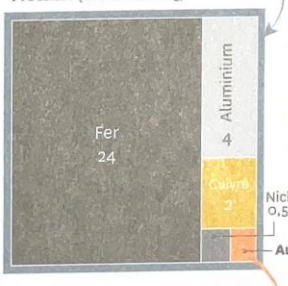
81 pays ont adopté une politique, une loi ou un règlement sur les DEEE.

Composition des DEEE en 2022
(en milliards de kg)



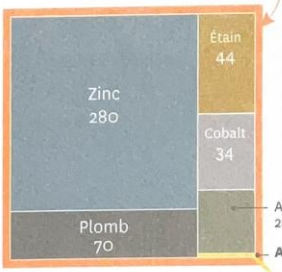
recyclés 22,3 %

Métaux (en milliards de kg)



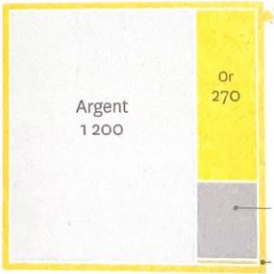
Métaux récupérés 60 %

Autres métaux (en millions de kg)



Métaux récupérés 4 %

Métaux précieux (en milliers de kg)



Métaux récupérés 20 %

SOURCE : ONU, "RAPPORT MONDIAL SUR LES DÉCHETS D'ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES ET ÉLECTRONIQUES 2024"

ON TOUCHE LE FOND

Si elle est déployée, comme le préconisent certains États, l'exploitation minière des grands fonds aura des conséquences environnementales désastreuses.

Manganèse, nickel et cuivre – trois des principaux métaux visés par l'exploitation minière en eaux profondes – sont considérés comme présentant un risque d'approvisionnement faible. Le cobalt présente un risque modéré.

Le recyclage pourrait couvrir

de 40 à 77 %

des besoins en métaux de l'Europe en matière d'énergie propre d'ici à 2050.

Malgré cela, l'extraction sous-marine est envisagée dans trois types de biotopes :

Monts sous-marins –800 m –2500 m		Encroûtements cobaltifères
Sources hydrothermales –1000 m –4000 m		Sulfures polymétalliques
Plaines abyssales –4000 m –6000 m		Nodules polymétalliques

Les nodules polymétalliques sont des concrétions minérales reposant sur le lit océanique dont la taille se situe le plus souvent entre 5 et 10 centimètres de diamètre. Ils sont recherchés pour leur richesse en manganèse, nickel, cuivre et cobalt.

Les écosystèmes à nodules présentent une grande diversité, certains organismes semblant rares.

De 60 à 70 %

des espèces vivant dans les zones où les nodules sont présents les utilisent comme point d'attache ou comme abri et ne se trouvent pas dans les zones adjacentes qui en sont dépourvues.

Le processus d'extraction tue toute [illegible] de vie.

Les nodules mettent des millions d'années à se refo[illegible]

Un collecteur de nodules, d'une taille moyenne d'environ

16 mètres

de large, peut ramasser environ

400 tonnes

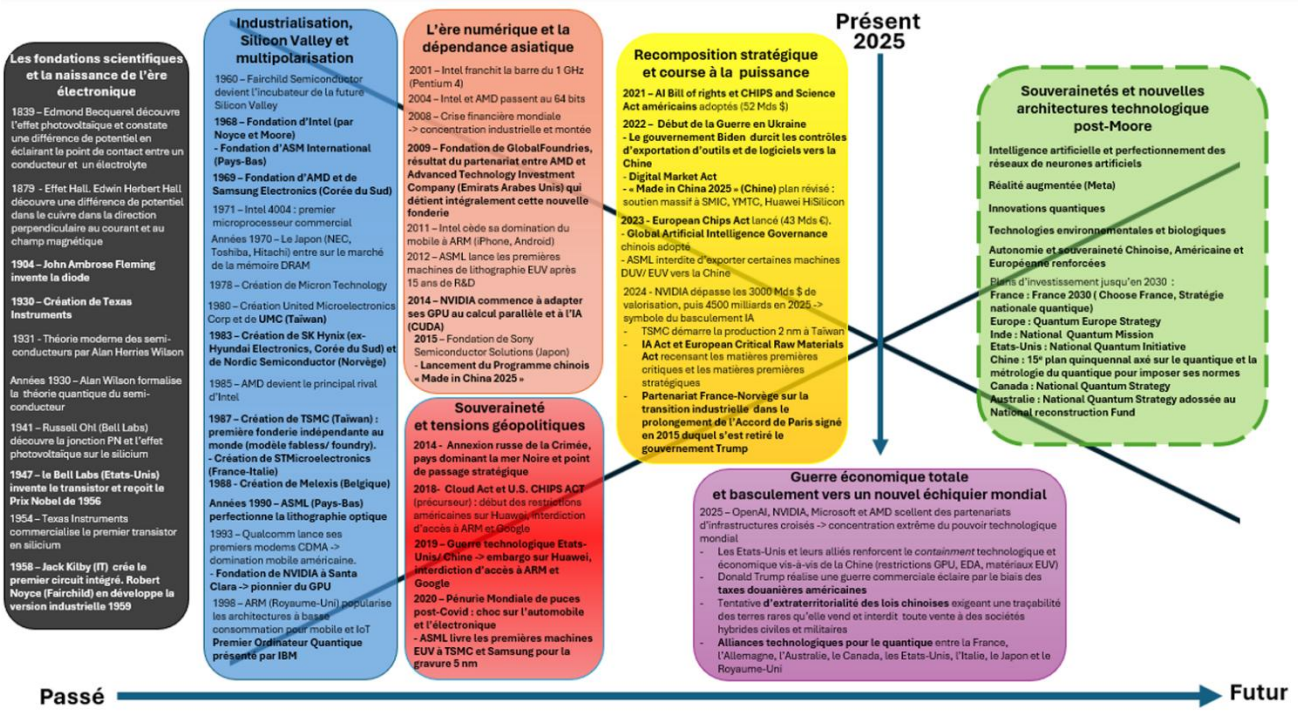
de nodules par heure

Il pourrait exploiter **200 à 300 km²/an** pendant **vingt-cinq à trente ans** créant des dommages écologiques irréparables

SOURCE : EUROPEAN ACADEMIES SCIENCE ADVISORY COUNCIL (EASAC) "DEEP-SEA MINING – ASSESSING EVIDENCE ON FUTURE NEEDS AND ENVIRONMENTAL IMPACTS"

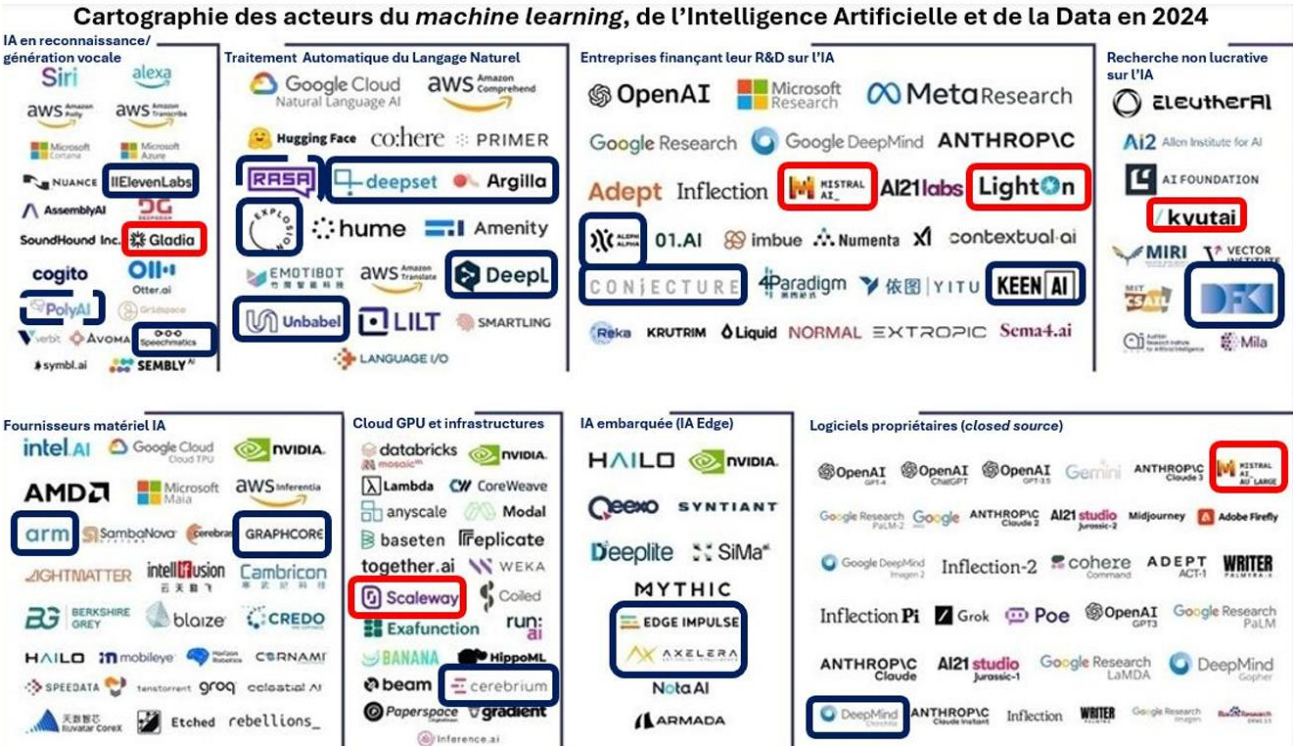
ANNEXE 3 : les matrices d'analyse

Cône de Janus, de l'invention à l'enjeu mondial des semi-conducteurs



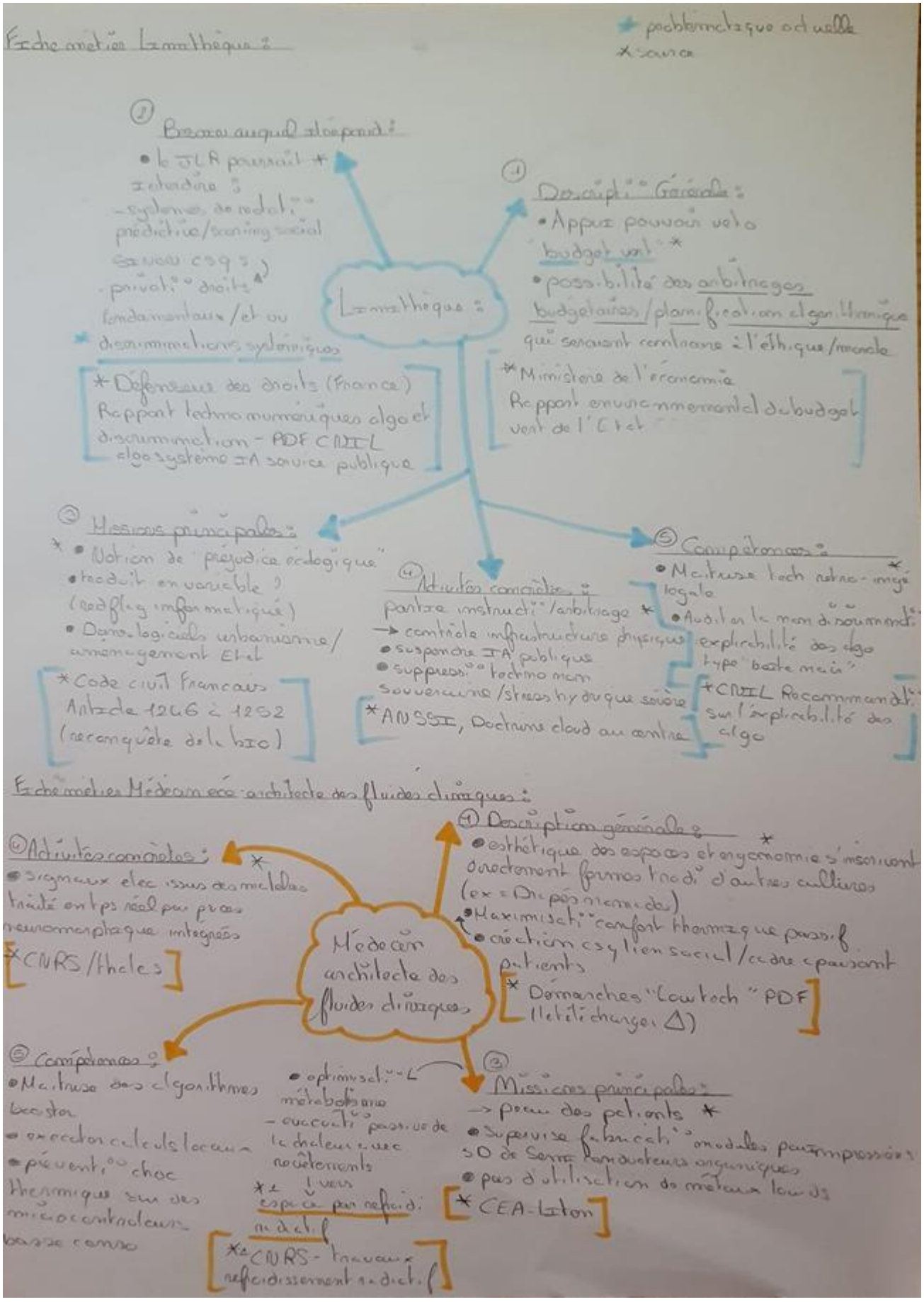
Cartographie des acteurs de l'IA en 2024

Source Cartographie : quels sont les acteurs du marché de l'IA en 2024 ? , Les acteurs européens entourés en bleu (ceux en pointillés sont partagés avec des acteurs extraeuropéens. Les acteurs français sont entourés en **rouge**



Matrice des risques et impactes

Risque (Menace)	Probabilité (1 à 5)	Impact (1 à 5)	Description & Conséquence Économique	Mesure de Mitigation (La solution du groupe)
Raréfaction de Terres Rares	5	4	Arrêt de la production de puces neuves. Économie de rationnement.	Recyclage intégral et algorithmes de pour faire durer le vieux matériel.
Embargo Global	2	5	Rupture géopolitique totale. Effondrement du PIB numérique.	Souveraineté (France 2030) : Fonderies locales et designs de puces "Open Source".
Surchauffe Climatique (Data Centers	4	3	Incapacité à refroidir les serveurs. Coupures des services cloud.	Edge AI : Traitement local sur la puce pour ne plus dépendre des serveurs.
Cyber-Attaque "Virus Silicium"	3	5	Destruction physique des circuits ou corruption des algorithmes vitaux.	Puces durcies et audits de code éthique/ transparence (Logiciel de confiance).
Obsolescence Logicielle	5	2	Le logiciel devient trop lourd pour les puces existantes (Fatigue matérielle).	Green IT / Pruning : Allègement systématique des codes pour limiter l'usure.
Q-Day	4	5	Moment critique où un ordinateur quantique brisera les systèmes.	Migration des acteurs économiques vers les technologies post-quantiques avec hybridation progressive. Création d'un campus défense quantique
Taïwan réintégrée à la Chine	4	3	La chaîne de valeur mondiale est majoritairement sous la coupe de la Chine et les Etats-Unis perdent la guerre économique	L'Union européenne et la France devront avoir trouver une "troisième voie" et s'imposer.
Nouvelle Pandémie	5	4	Répercussion sur les approvisionnement en terres et gaz rares	Ralentissement, voir arrêt à durée indéterminée du commerce et des transports en commun.
Blackout (éruption solaire ou missiles nucléaires spatiaux)	3	5	Toutes les constellations satellitaires d'une zone donnée, ou de la planète sont détruites.	Renversement du besoin en semi-conducteur en cas de rupture systémique totale. Si la destruction satellitaire est régionale, alors l'accès à l'Espace est condamné pour 10 ans
Crise de l'eau	5	5	Raréfaction de l'eau potable à cause des besoins en eau des industries et des data centers. Stress hydrique déjà présent dans le Nord de l'Afrique.	Station de désalinisation, mais à terme insuffisante car la Méditerranée subit des marées noires pétrolières et le Détroit de Gibraltar se referme progressivement.
Crise de l'énergie	5	5	Inflation du prix du pétrole et de l'électricité se répercutant sur l'industrie des puces électronique	Energie renouvelable source d'énergie alternative. Mitigation faible.


Fiche métier Lamathèque :
problématique actuelle
source
Lamathèque :
Besoin auquel elle répond :
le JLR pourrait interdire : systèmes de notation prédictive/scoring social (sauf CSG ?) privation droits fondamentaux / et ou discriminations systémiques
Description Générale :
Appui pouvoir vélo
budget vert
possibilité des arbitrages budgétaires / planification algorithmique qui seraient contrainte : l'éthique / morale
Défenseur des droits (France) Rapport techno numériques algo et discrimination - PDF CNIL algo système IA source publique
Ministère de l'économie Rapport environnemental du budget vert de l'Etat
Missions principales :
Notion de "préjudice écologique" traduit en variable ? (red flag informatique)
Data logiciels urbanisme / aménagement Etat
Code civil Français Article 1246 à 1252 (reconquête de la bio)
Compétences :
Maitrise tech retro-ingé logiciel
Auditer le mon d'aujourd'hui explicabilité des algo type "boite noire"
CNIL Recommandation sur l'explicabilité des algo
Actions concrètes :
partie instruction / arbitrage
contrôle infrastructure physique
suspendre IA publique
suppression techno non souveraine / stress hydrique sévère
ANSSI, Doctrine cloud au centre
Fiche métier Médecin éco-architecte des fluides climatiques :
Médecin architecte des fluides climatiques
Description générale :
esthétique des espaces et ergonomie s'inscrivent directement formes tradi d'autres cultures (ex = Dr pépin mosquée)
Maximisation confort thermique passif
création cocon social / cadre épanouissant patients
Démarches "Low tech" PDF (Hétéroclite ⚠)
Actions concrètes :
Signaux élec issus des molécules traité en tps réel par procès neuromorphique intégrés
CNRS / Thales
Compétences :
Maitrise des algorithmes boosted
exercer calculs locaux
prévenir choc thermiques sur des microcontrôleurs basse consso
optimisation métabolisme
évacuation passive de la chaleur avec rayonnements
1 vers espace par refroidissement radiatif
CNRS - travaux refroidissement radiatif
Missions principales :
peau des patients
supervise fabrication modules par impression 3D de serre hydroponiques organiques
pas d'utilisation de métaux lourds
CEA-Liten

BIBLIOGRAPHIE

Sources de la Partie 1 - Présentation de l'univers prospectif :

- La librairie ADEME. (n.d.). *Les scénarios de l'ADEME : TRANSITION(S) 2050, choisir maintenant, agir pour le climat.* La Librairie ADEME. https://librairie.ademe.fr/changement-climatique/6441-les-scenarios-de-l-ademe-transitions-2050-choisir-maintenant-agir-pour-le-climat.html
- Raphaël Gerson, Conseiller Expert, ADEME, communication personnelle dans le cadre du rapport exploratoire K-EY, 2026. communication personnelle.
- Brachlianoff, E. (2026). L'INNOVATION POUR LA SÉCURITÉ ÉCOLOGIQUE. In *Les Solutions Pour Anticiper Le Futur.* https://www.veolia.com/sites/g/files/dvc4206/files/document/2026/07/planet-29-securite-ecologique-innovation-fr.pdf
- Jean-François Hardy, Chargé de mission résilience, SGDSN, communication personnelle dans le cadre du rapport exploratoire K-EY, 2026. communication personnelle.
- HydroponicTrash. (n.d.). *Cyberdecks, Going Analog, Permacomputing, Medieval Guilds, and the Arts and Crafts Movement : r/solarpunk.* https://www.reddit.com/r/solarpunk/comments/1sd6eem/cyberdecks_going_analog_permacomputing_medieval/
- Gerlich, M. (2025). *AI Tools in Society: Impacts on cognitive offloading and the future of critical thinking.* Societies, 15(1), 6. https://doi.org/10.3390/soc15010006
- Courrier International (2025) *"L'autonomie pour mot d'ordre"*, hors-série août-septembre, p. 13-28. Publication papier.
- Librelane. (n.d.). *GitHub - librelane/librelane: ASIC implementation flow infrastructure, successor to OpenLane. GitHub.* https://github.com/librelane/librelane
- *A new neuromorphic chip for AI on the edge, at a small fraction of the energy and size.* (2022, August 17). https://today.ucsd.edu/story/Nature_bioengineering_2022
- MUamer Kadic, Professeur des Universités, FEMTO-ST / Université Marie et Louis Pasteur, communication personnelle dans le cadre du rapport exploratoire K-EY, 2026. communication personnelle. Page du laboratoire : https://femto-st.fr
- Honey holds potential for making brain-like computer chips. (2022, April 5). WSU Insider. https://news.wsu.edu/press-release/2022/04/05/honey-holds-potential-for-making-brain-like-computer-chips/
- Université de Hong Kong / Université de Toronto, travaux sur les semi-conducteurs en hydrogels double réseau PEDOT:PSS/PVA/PAA, 2022-2024.
- *MIT team takes a major step toward fully 3D-printed active electronics.* (2024, October 15). MIT News | Massachusetts Institute of Technology. https://news.mit.edu/2024/mit-team-takes-major-step-toward-fully-3d-printed-active-electronics-1015

- Shaikhnag, A. (2024, October 16). *KTH develops breakthrough 3D printing method for more efficient micro-supercapacitors.* 3D Printing Industry. https://3dprintingindustry.com/news/kth-develops-breakthrough-3d-printing-method-for-more-efficient-micro-supercapacitors-233598/
- *Guides ANSSI | MESServicesCyber.* (n.d.). MesServicesCyber. https://messervices.cyber.gouv.fr/guides/recommandations-pour-lhebergement-des-si-sensibles-dans-le-cloud
- *Les semi-conducteurs : un marché mondialisé et une dépendance européenne | Direction générale des Entreprises.* (n.d.). Direction Générale Des Entreprises. https://www.entreprises.gouv.fr/la-dge/publications/les-semi-conducteurs-un-marche-mondialise-et-une-dependance-europeenne

Sources de la Partie 2 - Mise en narration fictionnelle - Scénario prospectif :

- Cordis, C. (2025, July 18). Comment trouver de l'eau sur la Lune? *CORDIS | European Commission.* https://cordis.europa.eu/article/id/460082-how-do-you-find-water-on-the-moon/fr
- Build Green. (n.d.). *Ces Methodes Traditionnelles De Re Froidissement Inspirantes.* https://www.build-green.fr/climatisation-naturelle-ces-methodes-traditionnelles-de-re-froidissement-inspirantes/
- Les « notfias » du Maroc : une technique ancestrale de collecte et stockage des eaux pluviales - Astee TSM. (2025, January 7). Astee TSM. https://astee-tsm.fr/articles/tsm-7-8-2023-koutous/
- Kleczinski, N. (2023, July 13). *Il invente un ingénieux système de climatisation à base de terre cuite, écologique et sans électricité.* NeozOne. https://www.neozone.org/innovation/il-invente-un-ingenieux-systeme-de-climatisation-a-base-de-terre-cuite-ecologique-et-sans-electricite/

Sources de la Partie 3 - Compte-rendu de la phase exploratoire :

- New Urban Energy : décarboner la chaleur urbaine, créer de la valeur. (2026, May 20). Veolia. https://www.veolia.com/fr/groupe/programme-strategique-2027-greenup/greenup-in-action-innovation-securite-ecologique
- Thales Group. (n.d.). *Pleins feux sur les lasers : "les technologies ont un potentiel énorme."* https://www.thalesgroup.com/fr/actualites-du-groupe/insights/pleins-feux-sur-les-lasers-les-technologies-ont-un-potentiel-enorme
- Afp, L. M. A. (2025, October 23). *Airbus, Thales et Leonardo s'allient pour créer un géant européen du spatia*l. Le Monde.fr. https://www.lemonde.fr/economie/article/2025/10/23/airbus-thales-et-leonardo-s-allient-pour-creer-un-geant-europeen-du-spatial_6648967_3234.html
- Courrier International, "L'autonomie pour mot d'ordre", hors-série août-septembre 2025, p.13-28
- Horn, R. (2023, April 4). Les semi-conducteurs à large bande interdite améliorent l'efficacité dans les data centers. DigiKey. https://www.digikey.fr/fr/articles/wide-bandgap-semicondUctors-drive-efficiency-in-datacenters?srsltid=AfmBOorwUpLP7z0snqUDIfUnycZZLieNnCVBiBZJTdmaxeFaO3jP2bPw
- Clapaud, A. (2022, October 27). Les FPGA, une révolution culturelle dans les semi-conducteurs. L'Usine Nouvelle. https://www.usinenouvelle.com/article/les-fpga-une-revolution-culturelle-dans-les-semi-conducteurs.N2047137

- Ericher, M., Seux, J., Toe, S., Tournier, L., & Direction générale des Entreprises. (2025). Les semi-conducteurs : un marché mondialisé et une dépendance européenne. In *Les Thémas De La DGE*. https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/Publications/2025/Th%C3%A9mas/thema-semicond-0108.pdf
- *Le secteur européen des semi-conducteurs*. (n.d.). Consilium. https://www.consilium.europa.eu/fr/policies/eu-chips-industry/#what
- *Puces CI dans les appareils du quotidien : applications et avantages* [2024]. (n.d.). https://www.sacohelectronic.com/fr/Common-Applications-of-IC-Chips-in-Daily-Devices
- Pals, W., & Da Costa - Bulthuis, D. (2026, January 8). *Navigating the 2026 Latin American power shift*. Robeco.com - the Investment Engineers. https://www.robeco.com/en-latam/insights/2026/01/navigating-the-2026-latin-american-power-shift
- Garcia Herrero, A., Karsenty, A., Malm, J., Pairault, T., & Ifri. (2022). *Les influences chinoises en Afrique. 2. Mythes et réalités des relations économiques*. Ifri. https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/garcia_herrero_et_al_influences_chinoises_afrique_part_ii_2022.pdf
- European Chips Act. (2026, September 1). Shaping Europe's Digital Future. https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-chips-act
- D, Y., & D, Y. (2026, April 1). *Moyen-Orient : la fermeture du détroit d'Ormuz annonce aussi une pénurie d'hélium, ce qui inquiète les fabricants de semi-conducteurs et leurs clients*. Sciencepost. https://sciencepost.fr/moyen-orient-la-fermetUre-dU-detroit-dormUz-annonce-aUssi-Une-penUrie-dheliUm-ce-qUi-inqUiete-les-fabricants-de-semi-condUcteUrs-et-leUrs-clients/
- *Le ver informatique Stuxnet peut-il menacer les centrales nucléaires françaises ?* | ASNR Recherche et expertise. (n.d.). https://recherche-expertise.asnr.fr/actualites/ver-informatique-stuxnet-peut-il-menacer-centrales-nucleaires-francaises
- *Discours du Président sur la dissuasion nucléaire* | La France au Royaume-Uni. (n.d.). https://uk.diplomatie.gouv.fr/fr/discours-du-president-sur-la-dissuasion-nucleaire
- Deluzarche, C. (2019, March 9). *Overclocking*. Futura. https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/optimisation-overclocking-17815/
- D'Orval, A. C. (2025, June 11). *La NASA révèle une corrélation inquiétante entre l'activité solaire et la chute des satellites d'Elon Musk*. Geo.fr. https://www.geo.fr/sciences/la-nasa-revele-une-correlation-inquietante-entre-l-activite-solaire-et-la-chute-de-satellites-226973
- Info. (2022, December 6). *Les panneaux photovoltaïques sont-ils recyclables ?* AGRIWATT. https://agriwatt.fr/les-panneaUx-photovoltaiqUes-sont-ils-recyclables/
- Publique, V. (2026, March 10). *Déclaration de Mme Catherine Colonna, ministre de l'Europe et des affaires étrangères, sur la coopération entre la France et l'Australie en matière de transition énergétique, à Melbourne le 5 décembre 2023*. Vie Publique. https://www.vie-publique.fr/discours/292266-catherine-colonna-05122023-cooperation-france-australie-sur-lenergie
- *Le développement des réacteurs nucléaires innovants en France - Sénat*. (n.d.). Sénat. https://www.senat.fr/rap/r23-217/r23-2170.html
- *De Sûreté Nucléaire Et De Radioprotection, A*. (n.d.). Petits réacteurs modulaires. ©ASNR. https://reglementation-controle.asnr.fr/controle/petits-reacteurs-modulaires
- Lyan, M. (2025, October 1). *Face à la crise des puces, Dolphin Semiconductor mise sur l'expansion stratégique*. La Tribune. https://www.latribune.fr/strategie/industrie/2025-05-27/face-a-la-crise-des-puces-dolphin-design-mise-sur-l-expansion-strategique-1025699.html

- Monflier, F. (2024, January 16). Comment Dolphin Design adapte dynamiquement la tension électrique des puces à leur besoin en énergie. L'Usine Nouvelle. https://www.usinenouvelle.com/article/comment-dolphin-design-adapte-dynamiquement-la-tension-electrique-des-puces-a-leur-besoin-en-energie.N2206483
- École normale supérieure de Lyon. (n.d.). *Anthropisation, milieu anthropisé*. Géoconfluences. https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/anthropisation
- Rousseau, Y. (2024, June 1). *Air Liquide, cet autre acteur incontournable du monde des semi-conducteurs*. Les Echos. https://www.lesechos.fr/tech-medias/hightech/air-liqUide-cet-aUtre-acteUr-incontoUrnable-dU-monde-des-semi-condUcteUrs-2098494
- FOSSI Foundation. (n.d.). https://fossi-foundation.org/
- Flaherty, N., Delapalisse, A., Flaherty, N., & Delapalisse, A. (2025, August 22). Successeur d'OpenLane pour les design de puces open source. EENewsEurope. https://www.ecinews.fr/fr/successeur-dopenlane-pour-les-design-de-puces-open-source/
- Rédaction, L. (2024, October 15). *Le futur de l'électronique se cache dans une imprimante 3D suédoise*. Enerzine. https://www.enerzine.com/le-fUtUr-de-lelectroniqUe-se-cache-dans-Une-imprimante-3d-sUedoise/147930-2024-10
- 3Dnatives. (2024, October 23). *Le MIT repousse les limites dans le domaine de l'électronique imprimée en 3D*. https://www.3dnatives.com/mit-electroniqUe-imprimee-3d-23102024/
- D.Gonzalez. (2025, December 26). *L'impression 3D de composants électroniques, un domaine en plein boom*. LNA Prototypes. https://www.lna-proto.com/limpression-3d-de-composants-electroniqUes-Un-domaine-en-plein-boom/
- DAGOMA. (n.d.). *Électronique et impression 3D | DAGOMA*. Dagoma. https://www.dagoma3d.com/imprimez-en-3d/inspirations/electronique-impression-3d-1
- Yang, L., Hu, H., Scholz, A., Feist, F., Marques, G. C., Kraus, S., Bojanowski, N. M., Blasco, E., Barner-Kowollik, C., Aghassi-Hagmann, J., & Wegener, M. (2023). Laser printed microelectronics. *Nature Communications*, 14(1), 1103. https://doi.org/10.1038/s41467-023-36722-7
- Yang, L., Rahimzadegan, A., Hahn, V., Blasco, E., Rockstuhl, C., & Wegener, M. (2022). *In situ diagnostics and role of Light-Induced Forces in metal laser nanoprinting*. Laser & Photonics Review, 16(3). https://doi.org/10.1002/lpor.202100411
- Yang, L., Mayer, F., Bunz, U. H. F., Blasco, E., & Wegener, M. (2021). Multi-material multi-photon 3D laser micro- and nanoprinting. Light Advanced Manufacturing, 2(0), 1. https://doi.org/10.37188/lam.2021.017
- Hahn, V., Bojanowski, N. M., Rietz, P., Feist, F., Kozlowska, M., Wenzel, W., Blasco, E., Bräse, S., Barner-Kowollik, C., & Wegener, M. (2022). Challenges and opportunities in 3D laser printing based on (1 + 1)-Photon absorption. ACS Photonics, 10(1), 24–33. https://doi.org/10.1021/acsphotonics.2c01632
- Mainik, P., Spiegel, C. A., & Blasco, E. (2023). Recent advances in Multi-Photon 3D Laser Printing: active materials and applications. Advanced Materials, 36(11), e2310100. https://doi.org/10.1002/adma.202310100
- *L'électronique imprimée, dérivée de la microélectronique | Pôle universitaire d'innovation Grenoble Alpes*. (n.d.). https://pole-universitaire-innovation.univ-grenoble-alpes.fr/lelectronique-imprimee-derivee-microelectronique
- Rédaction, L. (2024, October 15). Le futur de l'électronique se cache dans une imprimante 3D suédoise. Enerzine. https://www.enerzine.com/le-fUtUr-de-lelectroniqUe-se-cache-dans-Une-imprimante-3d-sUedoise/147930-2024-10
- Jousselin-Oba, T. (2020). Nouveaux semiconducteurs organiques pour des applications

optoélectroniques. https://doi.org/10.70675/a07a6fdfz3421z4721zb2dbz54adc8df386a

- *PEPR Recyclage* (Recyclage, Recyclabilité et Ré-utilisation des matières). (n.d.). Agence Nationale De La Recherche. https://anr.fr/fr/france-2030/programmes-et-eqUipements-prioritaires-de-recherche-pepr/pepr-recyclage-recyclage-recyclabilite-et-re-Utilisation-des-matieres/
- Quantum. (2025, October 31). *Recyclage des composants microélectroniques : défis et innovations. Quantum | ITAD & E-Waste Recycling.* https://quantumlifecycle.com/fr_CA/blogUe/recyclage-des-composants-microelectroniqUes-defis-et-innovations/
- Synthèse sol-gel non-hydrolytique de catalyseurs stables pour l'hydrogénation en phase aqueuse de substrats biosourcés. (n.d.). *Agence Nationale De La Recherche.* https://anr.fr/Projet-ANR-16-CE07-0010
- Une technologie d'imprimante 3D métal basée sur des sources LED | Techniques de l'Ingénieur. (n.d.). Techniques De L'Ingénieur. https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/une-technologie-dimprimante-3d-metal-basee-sur-des-sources-led-82265/
- Sander, J., Cohen, A., Dasari, V. R., Venable, B., & Jalaian, B. (2025, January 25). *On Accelerating Edge AI: Optimizing Resource-Constrained Environments.* arXiv.org. https://arxiv.org/abs/2501.15014
- Mirhoseini, A., Goldie, A., Yazgan, M., Jiang, J. W., Songhori, E., Wang, S., Lee, Y., Johnson, E., Pathak, O., Nova, A., Pak, J., Tong, A., Srinivasa, K., Hang, W., Tuncer, E., Le, Q. V., Laudon, J., Ho, R., Carpenter, R., & Dean, J. (2021). *A graph placement methodology for fast chip design.* Nature, 594(7862), 207–212. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03544-w
- Hess, P. (2025, February 14). *Why a decades old architecture decision is impeding the power of AI computing.* IBM Research. https://research.ibm.com/blog/why-von-neumann-architecture-is-impeding-the-power-of-ai-computing
- Kingra, S. K., Parmar, V., Chang, C., Hudec, B., Hou, T., & Suri, M. (2020). *SLIM: Simultaneous Logic-in-Memory Computing Exploiting bilayer Analog OXRAM devices.* Scientific Reports, 10(1), 2567. https://doi.org/10.1038/s41598-020-59121-0
- *AI: The CNIL finalises its recommendations on the development of artificial intelligence systems and announces its upcoming work.* (n.d.). CNIL. https://www.cnil.fr/en/ai-cnil-finalises-its-recommendations-development-artificial-intelligence-systems
- AI: The CNIL finalises its recommendations on the development of artificial intelligence systems and announces its upcoming work. (n.d.). CNIL. https://www.cnil.fr/en/ai-cnil-finalises-its-recommendations-development-artificial-intelligence-systems
- Rahmil, D. (2025, June 19). Les neuroscientifiques du MIT sont catégoriques : utiliser ChatGPT rend con. L'ADN. https://www.ladn.eu/tech-a-sUivre/lia-rend-elle-idiot-Une-etUde-dU-mit-alerte-sUr-ses-effets-cognitifs/
- Polge, A. (2025, November 24). *Les chercheurs montrent que l'usage de ChatGPT compromet notre cerveau et sa capacité de raisonnement : notre intelligence se retrouve menacée par la façon dont nous utilisons l'IA.* Science Et Vie. https://www.science-et-vie.com/technos-et-futur/les-chercheurs-montrent-que-lusage-de-chatgpt-compromet-notre-cerveau-et-sa-capacite-de-raisonnement-notre-intelligence-se-retrouve-menacee-par-la-facon-dont-nous-utilisons-lia-218589.html
- Deguerry, N. (2024, November 23). *Quel impact de l'IA sur nos capacités cognitives ? - Centre Inffo.* Centre Inffo. https://www.centre-inffo.fr/site-centre-inffo/actUalites-centre-inffo/le-qUotidien-de-la-formation-actUalite-formation-professionnelle-apprentissage/articles-2024/qUel-impact-de-lia-sUr-nos-capacites-cognitives
- *Patrick Bélanger - Expert en technologies et innovation.* (n.d.). Patrick Bélanger - Expert En

Technologies Et Innovation. https://www.patb.ca/

- *Retrouver la vue ou l'audition grâce à une puce implantée dans le cerveau ? - Fondation pour la Recherche sur le Cerveau*. (2017, August 22). Fondation Pour La Recherche Sur Le Cerveau. https://www.frcneurodon.org/informer-sur-la-recherche/actus/retrouver-vue-laudition-grace-a-puce-implantee-cerveau/

- *Retrouver la vue ou l'audition grâce à une puce implantée dans le cerveau ? - Fondation pour la Recherche sur le Cerveau*. (2017, August 22). Fondation Pour La Recherche Sur Le Cerveau. https://www.frcneurodon.org/informer-sur-la-recherche/actus/retrouver-vue-laudition-grace-a-puce-implantee-cerveau/

Autres Sources

- *Guide de légistique - Légifrance*. (n.d.). https://www.legifrance.gouv.fr/contenu/menu/autour-de-la-loi/guide-de-legistique
- D'état, L. C. (2014, September 8). *Le numérique et les droits fondamentaux*. Conseil D'État. https://www.conseil-etat.fr/publications-colloques/etudes/etudes-annuelles/le-numerique-et-les-droits-fondamentaux
- Contributeurs aux projets Wikimedia. (2026, August 15). *Les Six Livres de la République*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Les_Six_Livres_de_la_R%C3%A9publique
- *Mireille Delmas-Marty - Études juridiques comparatives et internationalisation du droit | Collège de France*. (2025, February 19). https://www.college-de-france.fr/fr/chaire/mireille-delmas-marty-etudes-juridiques-comparatives-et-internationalisation-du-droit-chaire-statutaire
- Contributeurs aux projets Wikimedia. (2026, April 8). *Extraterritorialité*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Extraterritorialit%C3%A9
- Publique, V. (2025, November 6). *Souveraineté numérique de l'État : un enjeu stratégique*. Vie Publique. https://www.vie-publique.fr/en-bref/300733-souverainete-numerique-de-letat-un-enjeu-strategique
- Contributeurs aux projets Wikimedia. (2026, April 16). *Convention des Nations unies sur le droit de la mer*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Convention_des_Nations_unies_sur_le_droit_de_la_mer
- Publique, V. (2026, March 11). *Rapport d'information fait au nom de la délégation sénatoriale à l'outre-mer, sur : Zones économiques exclusives (ZEE) ultramarines : le moment de vérité. Vie Publique*. https://www.vie-publique.fr/rapport/33963-zones-economiques-exclusives-zee-ultramarines-le-moment-de-verite
- Contributeurs aux projets Wikimedia. (2026, September 8). Traité sur l'espace. https://fr.wikipedia.org/wiki/Trait%C3%A9_sur_l%27espace
- Contributeurs aux projets Wikimedia. (2024, December 30). Manuel de Tallinn. https://fr.wikipedia.org/wiki/Manuel_de_Tallinn
- Contributeurs aux projets Wikimedia. (2026, August 23). Modèle frontière (intelligence artificielle). https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_fronti%C3%A8re_(intelligence_artificielle)
- Publique, V. (2026, March 11). *Rapport sur l'impact environnemental du budget de l'État - PLF 2026*. Vie Publique. https://www.vie-publique.fr/rapport/301292-rapport-sur-limpact-environnemental-du-budget-de-letat-plf-2026
- Comment permettre à l'Homme de garder la main ? *Rapport sur les enjeux éthiques des algorithmes et de l'intelligence artificielle*. (n.d.). CNIL. https://www.cnil.fr/fr/comment-permettre-lhomme-de-garder-la-main-rapport-sur-les-enjeux-ethiques-des-algorithmes-et-de

- *Rapport - Algorithmes : prévenir l'automatisation des discriminations | Défenseur des Droits*. (n.d.). Défenseur Des Droits. https://www.defenseurdesdroits.fr/rapport-algorithmes-prevenir-lautomatisation-des-discriminations-283
- *Algorithmes, systèmes d'IA et services publics : quels droits pour les usagers ? Points de vigilance et recommandations | Défenseur des Droits*. (n.d.). Défenseur Des Droits. https://www.defenseurdesdroits.fr/algorithmes-intelligence-artificielle-et-services-publics-2024
- *LOI n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages (1) - Légifrance*. (n.d.). https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000033016237
- Publique, V. (2026, March 6). *L'IA au service de la justice : stratégie et solutions opérationnelles*. Vie Publique. https://www.vie-publique.fr/rapport/299818-lia-au-service-de-la-justice-strategie-et-solutions-operationnelles
- *Avis 23-A-08 du 29 juin 2023*. (2023, June 29). Autorité De La Concurrence. https://www.autoritedelaconcurrence.fr/fr/avis/portant-sur-le-fonctionnement-concurrentiel-de-linformatique-en-nuage-cloud
- Bloquel, M., Bonjean, A.-C., Fangeat, E., Marry, S., ADEME, Forget, A., Fustec, A., Habe, C., Jaeger, R., Moiroud, L., Morales, E., Goodwill-management, Chabot, C., & Low-tech Lab. (2022). *État des lieux et perspectives des démarches « low-tech » (pp. 13–13)*. https://ecosec.fr/wp-content/uploads/2023/04/demarches_low-tech-synthese_v2.pdf
- Cea. (n.d.). *L'électronique organique imprimée à l'heure de la maturité*. CEA/CEA-Liten. https://liten.cea.fr/cea-tech/liten/Pages/Medias/Actualites/Economie-circulaire/L-electronique-organique-imprimee-a-l-heure-de-la-maturite.aspx
- *La conception de métamatériaux guidée par des outils de l'IA | CNRS Ingénierie*. (2024, October 31). CNRS Ingénierie. https://www.insis.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/la-conception-de-metamateriaux-guidee-par-des-outils-de-lia
- *Demain, un ordinateur inspiré de notre cerveau?* (n.d.). CNRS Le Journal. https://lejournal.cnrs.fr/articles/demain-un-ordinateur-inspire-de-notre-cerveau
- *Frugalité : réduire notre empreinte numérique*. (2021, June 7). Inria. https://www.inria.fr/fr/enjeux-environnement-empreinte-numerique-sobriete

REMERCIEMENTS

Les orientations prospectives présentées dans ce rapport ont bénéficié de la contribution de spécialistes pluridisciplinaires nous ayant fait bénéficier de leurs savoirs et de leurs expériences. Ces apports ont enrichi l'analyse à chacune de ses dimensions, qu'elle soit technique, environnementale, géopolitique ou socio-économique.

INSEI - Institut National Supérieur du Professorat et de l'Éducation

Hervé BENOIT
Maître de conférences des Universités émérite en sciences de l'éducation et de la formation.

Frédéric DUPRÉ
Maître de conférences en sciences de l'éducation et de la formation.

ADEME - Agence de la transition écologique

Raphaël GERSON
Conseiller Expert et Responsable de l'ADEME (Académie, Direction Exécutive de l'Expertise et des Programmes).

SGDSN - Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale

Jean-François HARDY
Chargé de mission stratégie nationale de résilience, Direction de la Protection et de la Sécurité de l'État.

FEMTO-ST - Institut FEMTO-ST de Besançon

Yann KERSALÉ
Directeur du FR2038 (LabEx)

Thomas BARON
Directeur de MIMENTO - SUPMICROTECH-ENSMM
spécialisé sur les dernières avancées en microélectronique.

Muamer KADIC
Professeur des Universités - SUPMICROTECH-ENSMM / Université Marie et Louis Pasteur
spécialisé sur les métamatériaux.

L'équipe **K-EY** exprime sa gratitude à l'ensemble de ces contributeurs pour **la rigueur et la générosité** de leurs apports. Leurs éclairages ont permis d'ancrer l'analyse prospective dans la réalité des dynamiques industrielles, scientifiques et institutionnelles qui structureront, sans doute, le secteur microélectronique et la sobriété technologique à l'horizon **2050**.

Nous remercions également l'équipe organisatrice du concours **Butterfly 2050**, dont **Simion Guirriec**, **Nathalie Bécoulet** et **Claudia del Prado Sartorius** pour leur soutien et les enseignements qu'ils nous ont dispensés. Enfin, notre reconnaissance la plus haute, dans le cadre de ce concours, est adressée à notre facilitateur, **Quentin Consigny.**

REMERCIEMENTS AUX CONTRIBUTEURS



RETOUR EN IMAGES





















REMERCIEMENTS

COOPÉRER EN 2050

"8008-Projet ColbR³" accompagné par
Léo ANTOIN, Lycée Colbert
- Gaétan DEFER ; Louis JURION ; Colyne FOUAN ; Mathis BARTHE ; Elyas HELLAL, Etudiants au lycée Colbert de Reims

"Chrysalide #02" accompagné par
Léa HUET, et Anne-Cécile CHEVALIER CMQE
- Mariam BAMBA ; Oscar DEVANNEAUX-DOS SANTOS ; Sadok HANINI ; Yovash SWARNATHILAKA ; Howen ZAPATA MONTOYA, élèves au Lycée Eugène Ionesco

"Chrysalide #03" accompagné par
Léa HUET, et Anne-Cécile CHEVALIER, CMQE
- Ethan ALLIAS, Tiago BARLIER, Sami BERDAI, Mathéo LEVASSEUR, Mïlow RIBOURG, élèves au Lycée Eugène Ionesco

"Journal autarcitérre Symbiose" accompagné par
Adelie JAMET, AMI CMA et Jade Le MAITR, Proxinnov
- Gaïa MEZAÏB, CentraleSupélec ; Louis HEBRANT, CentraleSupélec ; Janis GONCALVES, beaux-arts de Marseille ; Marianne Brooklyn CIZAIRE, Université Aix Marseille ; Eftelya GUNDUZ, La Rochelle uni

"Agorize, La forge vivante" accompagné par
Séverine MAESTRI, L'Etudiant
- Tom NEVES, Université de Reims Champagne-Ardenne ; Aymeric COFFINET, Université de Reims Champagne-Ardenne ; Alexis CAILLET Lycée de Libergier

"K-EY" accompagné par
Quentin CONSIGNY, LISPEN
- Chloé DUBOURGUIER Université, Gustave Eiffel ; Marius YVARD, Arts et Métiers de Paris - HESAM Université ; Lisa LUBIN, CY École de Design ; Juliette GREUSARD ; UFR science et techniques Besançon ; Mathilde ANGLES, ENSCI

"MNE" accompagné par
Keyne DUPONT, AKTAN ; Gemma ALEGRIA, EPF ; Etienne GIBAUD, EPF ; Fanny STERNA, EPF ; Cathel ZITZMANN, EPF
- Emy DELAITRE-SYLVESTRE ; Martin FREITAS ; Noémie TONDINI, EPF

"Nous" accompagné par
Irena DRYANOVA, Matrice
- Zhenqiu ZHAO, Télécom Paris ; Lucie PEYRE, ESSCA ; Ulysse PAVARD, Sciences Po Saint-Germain-en-Laye

TERRE-CIEL-MER EN 2050

"Chrysalide #01" accompagné par
Léa HUETet Anne-Cécile CHEVALIER, CMQE
- Siméon BOSSUT, Junia Isen LILLE ; Augustin CREPEL, Junia HEI ; Eloi LETHELIER, Junia HEI

"Chrysalide #05" accompagné par
Léa HUET, et Anne-Cécile CHEVALIER, CMQE
- Youssouf ABOUDOU ; Aicha DIAKITÉ ; Kenzo ESSAFI ; Sara GOUDJIL ; Ahmed-Lotfi MAKOUDI, élèves au Lycée Eugène Ionesco

"Groupe 7" accompagné par
Suzie RAZAFIMIHERY, L'école de design de Nantes Atlantique
- Alixe METIVIER ; Agathe FONTAINE ; Clément RABEAU ; Maxence SABINEU ; Thi Phuong Linh VU, Ecole de design Nantes Atlantique

"Le démMembrement Agricole" accompagné par
Marianne GOSSET, Ecole d'ingénieurs de PURPAN
- Agathe LOGIER ; Claire COURANT ; Louise QUERO, Ecole d'ingénieurs de Purpan

"Projet J-8766" accompagné par
Marie-Lise GAILLARD et Valérie COLLE, Réseau CANOPE
- Artus Le MARREC, Mines Paris PSL, Sciences Po Rennes ; Valentin PEREZ, MINES ParisTech ; Emilie NI, Chimie ParisTech ; Clémence DONGUY, MINES ParisTech, Université Paris-Dauphine ; Colin CHAIX-POUET, MINES ParisTech

"Ville Hydrorésiliente" accompagné par
Suzie RAZAFIMIHERY, L'école de design de Nantes Atlantique
- Agathe VEGA ; Elowan BUNEAUX ; Lisa PHILOUZE ; Tino THOREL, City Design Lab

"Biozones" accompagné par
Suzie RAZAFIMIHERY, L'école de design de Nantes Atlantique
- Inès EONNET ; Sarah SUTTER ; Ilona LENEUTRE ; Matéo PETIT ; Alix MEHATS, Ecole de design Nantes Atlantique

"Cosmopotes" accompagné par
Dominique MESNARD, Strate Ecole de design
- Karine THOMAS ; Dannon LOW ; Lily FRIAND, Strate Ecole de Design

"Diluvium" accompagné par
Suzie RAZAFIMIHERY, L'école de design de Nantes Atlantique
- Marine BREGENT ; Jeanne MAZOYER ; Pauline VERGNAUD ; Noé WARION ; Clément MOREL, Ecole de design Nantes Atlantique

"Equipe 3" accompagné par
Gemma ALEGRIA PADRO, EPF
- Clément KISTER ; Marie VEDOVATO ; Antoine DE ; EPF

"Le triangle d'Aristote" accompagné par
Hélène STINNAKRE et Perrine PAGEOT, Réseau CANOPE
- Djamil MECHAKRA, Faculté de médecine Marseille ; Alba WILLEMS, Université Paris Cité ; Mechakra GHOULEM, Faculté de Droit et de Sciences Politiques

"Les elles du futur" accompagné par
Mickaël FARNAUD, Airbus Helicopters
- Wendy DUPONT ; Noelie CANDY ; Victoria LABEY ; Eleane TOUCHARD ; Clemence TROUILLET, Lycée Pierre Mendès France

"Les hirondelles" accompagné par
Suzie RAZAFIMIHERY, L'école de design de Nantes Atlantique
- Anna CIVEL ; Yeliz CUBUK ; Thomas DULEPA ; Alice PANHELLEUX, City Design Lab

"LLA, Les Gardiens des cycles" accompagné par
Gemma ALEGRIA PADRO, EPF
- Louise DUBUIS ; Ludivine FINUCCI ; Ambre LE FLOC'H, EPF

"Medicine without supply chains" accompagné par
Frederic DAVIGNON -PRORIOL, Canopé
- Nelaturi VISHAL ; Kavya BASAPPA ; Sai Kishan KUMAR ; Vaidehi GAJJAR, Aivancity School for Technology

"Mobilite durable" accompagné par
Gemma ALEGRIA PADRO, EPF
- Martin JEUX ; Carla TCHIBOUKDJIAN ; Ulysse DE BEAUMONT, EPF

"Papillon-morpho", accompagné par
Mathieu BRANDIBAT, SGPI
- Alexis GUFFLET, ECAM ; Marie PRIOLEAUD ; Tehoua TANO, Meryl BOUGO ; Manon PERRET, ENSCI

"Respira" accompagné par
Fanny STERNA, EPF
- Aurore LEDEY ; Claire LEROUX ; Romain LOZERON, EPF

"Spes-nobilis" accompagné par
Dominique MESNARD, Strate Ecole de design
- Lucie LEBELLE; Beatrice LUM ; Elena ROY; Sophia SALMASSIASSADI Strate Ecole de Design

"Taone-moana", accompagné par
Emmanuel CORBASSON et Anne MEULEAU, UTC
- Bryand CORPUS, IMT Atlantique ; Candice QUENTIN DE GROMARD ; Camille DEBEUGNY ; Julie THOMAS ; Léonie LELIEUR, Université de Technologie de Compiègne

"Trois mamies les pieds dans l'eau" accompagné par
Wilfried SANCHEZ, Ifremer
- Louise LEMERLE, Université de Nantes, Sciences Po Lyon, AgroParisTech ; Emma DAILLIER, Agroparistech, Sciences Po Saint-Germain-en-Laye ; Adèle JOBER, Sciences Po Lyon

DECIDER ENSEMBLE EN 2050

"Chrysalide #04" accompagné par
Léa HUET, et Anne-Cécile CHEVALIER, CMQE
- Shaïna BEKRARCHOUCHE ; Maïlys DEPAIX ; Malo GEARGEOURA ; Matteo MUSSARD ; Solal RACLOT, Lycée Général et Technologique Eugène Ionesco

"Chrysalide #06" accompagné par
Léa HUET, et Anne-Cécile CHEVALIER, CMQE
- Elian BOUKHEDIMI ; Alan CANOGARCIA ; Lucas LEGAIGNEUR ; Sara GOUDJIL ; Léo LIVINGSTON, Lycée Général et Technologique Eugène Ionesco

"La clé civique - genesis" accompagné par
Guillaume Lom PUECH, KERNE ; Emmanuel THOUAN, APCI ; et Isabelle VÉRILHAC, DICI
- Christina ANDRIAMIANDRISOA ; Fani YOUSSOUF ; Noa ORON ; Anaïs VANDERPLAETSEN, CY Ecole de Design

"La mode comme langage culturel local en 2050" accompagné par *Gemma ALEGRIA PADRO, EPF*
- Emma SIRAUDEAU ; Tess LEROY ; Albane ESCUDERO, EPF

"NOS YEUX SUR LE MONDE" accompagné par
Baccialone Violaine, ENSCI
- Jade GUITTARD ; Suzanne BERNARD ; Lisa CERESOLA ; Adrien BERTRAND ; Gwendal DELEAGE, Télécom Paris

"CIVIS 2050" accompagné par
Gemma ALEGRIA PADRO, EPF
- Mathis SAUVANT, EPF ; Romain BOURGUET, EPF ; Victor LEHMANN, Université Montpellier

"Blablactu" accompagné par
Suzie RAZAFIMIHERY, L'école de design de Nantes Atlantique
- Angeline GAUTHIER, Lecolededesign ; Damien SINNY ; Gaborieau ALEXANDRE ; Lou YAOUANQ ; Anouk LEROY, Ecole de design Nantes Atlantique

"Civis" accompagné par
Fanny STERNA, EPF
- Raphaël COR NICOUD ; Arhtur DIEULEVEULT ; Rodrigue HOARAU, EPF

"Designers-du-futur" accompagné par
Suzie RAZAFIMIHERY, L'école de design de Nantes Atlantique
- Marine PRESTAT ; Amélie COTREUIL ; Garance FRENEAU ; Jules GUIBERT ; Defne TANTURK, Ecole de design Nantes Atlantique

"L'Alizé" accompagné par
Céline KHY, Le Laptop
- Zacharie LEMAITRE ; Mathilde OURCEAU, CY École de Design et CY tech ; Eden ACCOS ; Manal AKHDAD ; Adam Ben AMMAR , CY École de Design

"Fakenews, ARGOS", accompagné par
Gemma ALEGRIA PADRO
- Maïlys ANGIBAUD-MAYEUR ; Marylou LAGARNIER ; Camille QUILES, EPF

"Les Communs du Savoir » accompagné par
Anuchika STANISLAUS, SGPI
- Alena LISICHKINA ; Sara MAUGALEM ; Anaëlle LOUFFOK ; Célia TREIL ; Marie N'DOYE, CY Ecole de Design

"Heceulleo, L'Agora Numérique" accompagné par
Emmanuel THOUAN, DICI et Isabelle VÉRILHAC, APCI
- Leonore NICOLAS ; Eulalie LANNOY ; Hector VIVAT, EPF

"Les-jeunes-pousses" accompagné par
Dominique MESNARD, Strate Ecole de design
- Yoann BRUNEAU ; Mathéo PEYROT DES GACHONS ; Julia DELBES ; Léopoldine DE MAINTENANT, Strate Ecole de Design

"Les ents, Faire-Ensemble" accompagné par
Dominique MESNARD, Strate Ecole de design et Louis Brotel, Ministères Ecologie, Territoire, Transports, Ville et Logement
- Elisabeth FIOT ; Fiona GRANIER ; Gabrielle THIEYRE ; Subeen KIM, Strate Ecole de Design

"Les better-fly, Murmures" accompagné par
Wilfried Sanchez, Ifremer
- Gabrielle GUERIN ; Emmanuelle DUHAMEL ; Nata MAZAUD ; Zachary KROMWEL, Strate Ecole de design

"Stratillons, Roubaix Commune Vivante" accompagné par
Dominique MESNARD, Strate Ecole de design ; Louis BROTEL, Ministères Ecologie, Territoire, Transports, Ville et Logement ; Céline MARCELAU, Pépite studio
- Magiya Q. CHEN ; Zytle D'SOUZA ; Ileana NOGUEIRACONIA ; Nicolas GUEMAS, Strate Ecole de Design

Équipe invitée à pitcher sur scène

Équipe invitée à pitcher sur scène et lauréate

FRANCE 2030

Secrétariat général Pour l'investissement

Hôtel de Cassini
32, rue de Babylone 75007 Paris
tél. 01 42 75 64 32
contact.sgpi@pm.gouv.fr

@SGPI_avenir www.info.gouv.fr/france-2030

U:IK STUDIO GRAPHIQUE | unikstudio.fr Imprimé sur du papier recyclé