



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



RESTITUTION DES TRAVAUX

*Vers 2050 : quelles stratégies
pour les métaux critiques ?*

“ Anticiper aujourd’hui
pour décider demain. ”



Ce document présente la synthèse des échanges, analyses et recommandations issus du colloque organisé par le Lab des futurs de l'Académie de défense de l'École militaire.

Sous la maîtrise d'œuvre du colonel Jérôme Clech, en tant que titulaire de la chaire de stratégies aérienne et spatiale appliquées.

Le lieutenant-colonel Anne de Luca a assuré la coordination des travaux auprès des équipes verte, rouge et de la communauté d'experts. Elle a conçu et animé l'atelier IA.

Auteurs de l'équipe « verte » pour génération et production : Colonel Jérôme Clech, Commandant Ludovic Le Jariel, Capitaine Malcolm Pinel, Aspirant Mélanie Frangein-Libault.

Auteurs de l'équipe « rouge » pour consolidation et validation : Monsieur Nicolas Bronard, Lieutenant-colonel Anne de Luca, Monsieur Gabriel Yabrir.



SOMMAIRE

1

Propos introductifs

GBR Jean-Christophe Reussner

GBA Jean-Patrice Le Saint

2

Génèse du Lab des Futurs

3

Synthèse

4

Méthode

La méthode prospective en résumé

5

Le produit

6

Les scénarios

1. L'ère des métaux rares : entre dépendance stratégique et innovation contrainte.

2. Le monde sous contrainte.

3. La ruée vers l'invisible.

4. La France mine ses propres déchets.

5. La guerre silencieuse des stocks.

6. Franckensteel, synthèse ad-hoc.

7. Au-delà de la matière.

8. Le monde à front renversé.

7

Expérimentation IA

8

Annexes

Scénarios dynamiques

Composition des groupes de travail



GBR Jean-Christophe Reussner
Secrétaire général de l'ACADEM

« Initié par l'Académie de défense de l'École militaire — l'ACADEM — à la fin de l'année 2025, le *Lab des Futurs* est né d'une conviction simple : la prospective est une discipline vivante. Et, parce qu'elle est vivante, elle doit pouvoir évoluer. Les méthodes classiques de prospective ont fait leurs preuves. Il ne s'agit donc ni de les rejeter, ni de prétendre inventer un nouvel art de la prospective. Mais il faut aujourd'hui s'autoriser à élargir la boîte à outils, à expérimenter d'autres approches, à croiser les méthodes et les regards pour mieux répondre à la complexité et à l'incertitude de notre époque. C'est précisément l'objectif du *Lab des Futurs* : ouvrir un espace d'expérimentation, où l'on puisse tester, questionner et enrichir les pratiques prospectives existantes.

Cette ambition se retrouve également dans le périmètre que nous avons choisi. Le Lab s'inscrit dans une conception large de la défense et de la sécurité, qui englobe notamment les enjeux de souveraineté dans toutes leurs dimensions : économique, sanitaire, alimentaire, académique, technologique... Ce choix n'est pas anodin et répond à une nécessité : celle de décroiser les réflexions. Les cellules de prospective sont aujourd'hui nombreuses, dans le secteur public comme dans le secteur privé. Mais elles travaillent encore trop souvent chacune dans leur « ligne d'eau ». Or, face à des enjeux de plus en plus interdépendants, notre capacité à penser et construire l'avenir dépend aussi de notre

PROPOS INTRODUCTIF

capacité à croiser les informations, les expertises et les perspectives, pour construire une compréhension partagée des futurs possibles. C'est dans cet esprit que le *Lab des Futurs* a choisi, pour sa première édition, de travailler sur les métaux critiques. Le sujet s'est imposé à nous par son actualité, bien sûr, mais surtout par son caractère profondément structurant pour notre souveraineté, doublé de dimensions à la fois géopolitiques, technologiques et économiques.

Le *Lab des Futurs* incarne aussi une ambition portée par l'ACADEM : créer des passerelles entre le monde de la sécurité et de la défense et la société civile, en particulier la jeunesse. Il était donc naturel que cette volonté d'interface se traduise par une démarche ouverte et collaborative. Le Lab repose ainsi sur une conviction : la qualité d'une réflexion prospective tient surtout à la diversité de ceux qui la construisent. Réunir des contributeurs issus d'horizons différents — interministériels, institutionnels, académiques ou issus de la société civile — permet de confronter les perceptions, de faire émerger des signaux qui seraient peut-être restés invisibles dans un cadre plus homogène et, surtout, de limiter les biais liés à l'entre soi.

Imaginer les futurs possibles n'a de sens que si cette connaissance permet ensuite de mieux décider. Les méthodes et les outils que nous expérimentons n'ont donc d'intérêt que s'ils nous aident à transformer l'incertitude en matière à réflexion, la réflexion en décision, et la décision en capacité d'action. J'espère donc que cette première production constituera moins un aboutissement qu'un point de départ : un matériau pour nourrir la réflexion, irriguer la décision et, peut-être, contribuer à ouvrir la voie vers les futurs que nous souhaitons rendre possibles. »

PROPOS INTRODUCTIF

« Dans un environnement stratégique marqué par l'accélération des transformations, l'enchevêtrement des interdépendances et la multiplication des incertitudes, la prospective connaît aujourd'hui un retour en force. Ce mouvement traduit sans doute une volonté de retrouver une capacité de prise sur ce qui advient, alors même que la complexité croissante des systèmes tend à brouiller les repères et à rendre moins opérantes les grilles de lecture héritées. L'incertitude ne doit pourtant pas être considérée comme une faiblesse : elle constitue également un milieu d'émergence, celui dans lequel apparaissent les ruptures, les innovations et les reconfigurations du réel. C'est précisément là que réside la vocation de la prospective stratégique : non pas prédire l'avenir, mais élargir le champ des possibles afin de mieux éclairer les choix présents. Gaston Berger, qui forgea le terme même de « prospective », invitait ainsi à « voir loin, voir large et voir en profondeur » : saisir les dynamiques de fond, appréhender les interdépendances et déceler, sous la surface des événements, les germes des transformations à venir.

L'exigence de déplacement du regard prend une résonance particulière dans le champ aérospatial militaire. C'est pourquoi le CESA constitue naturellement le point d'appui de cette démarche au sein de l'armée de l'Air et de l'Espace (AAE). Chargé d'animer la réflexion stratégique de l'AAE, il conduit des travaux de veille, d'analyse, de recherche et de prospective, en lien avec le monde académique et les principaux acteurs de la réflexion stratégique.



CESA

Le Centre d'études stratégiques aérospatiales (CESA) est chargé d'assurer la cohérence du rayonnement interne et externe de l'armée de l'Air et de l'Espace. Il anime l'ouverture de l'armée de l'air et de l'espace vers la société civile dans le cadre des actions pour la jeunesse, des partenariats, des études et publications et enfin du patrimoine et des traditions.



GBA Jean-Patrice Le Saint

Directeur du CESA

Cette mission s'est récemment précisée avec la désignation du CESA comme pilote des travaux de prospective au profit de l'état-major de l'AAE. La maîtrise d'œuvre du « *Lab des futurs* » s'inscrit donc dans la continuité de ses attributions : il s'agit d'expérimenter, au bénéfice de la décision stratégique, des modalités permettant de mieux identifier les futurs possibles et d'en explorer les implications.

Cette expérimentation s'est appuyée sur une méthode articulant deux mouvements complémentaires : RESHAPE, RELOAD¹.

Le premier consiste à changer de grille de lecture pour mieux comprendre le système étudié : identifier les acteurs et les facteurs qui le structurent, repérer leurs interactions et leurs tensions, et détecter les points de bascule susceptibles d'en modifier profondément l'équilibre. Le second vise à donner corps aux intuitions ainsi dégagées, en formulant des hypothèses de rupture puis en construisant des scénarios contrastés, robustes et cohérents. L'objectif n'est donc pas de prolonger mécaniquement les tendances, mais de rendre pensables d'autres configurations et, ce faisant, de renforcer l'espace décisionnel à l'aide d'options utiles et souvent inédites.

¹ Conçue par Jérôme Clech, méthode déposée auprès de l'INPI.

Cette démarche a trouvé un premier champ d'application ici dans l'étude des intérêts français sur les chaînes de valeur des métaux critiques à l'horizon 2050. L'état de l'art, la cartographie des acteurs et des facteurs clés, les travaux d'idéation et de déplacements cognitifs, les ateliers prospectifs et les consultations d'experts ont progressivement fait émerger une idée aussi centrale que plastique : celle de la « substituabilité ». En dépassant sa seule acception technique, cette notion s'est révélée constituer un véritable pivot de la réflexion prospective. Sous l'effet de ruptures technologiques, économiques, géopolitiques, sociologiques ou réglementaires, les modalités de substitution peuvent en effet modifier, réduire, déplacer ou recomposer les dépendances françaises. La prospective stratégique permet ainsi moins d'apporter une réponse définitive que de révéler de nouvelles marges de manœuvre.

C'est précisément cette capacité d'exploration qu'il convient désormais de prolonger. Deux voies se dessinent : transmettre un matériau suffisamment mûr à l'anticipation stratégique (dont l'échelle de temps est celle de la décennie), puis à la stratégie et à la planification (à plus court terme) ; ou approfondir l'exploration par un nouveau cycle prospectif, en poussant une bifurcation, en combinant des scénarios, en les territorialisant ou en recherchant leurs angles morts. Le « *Lab des futurs* » a vocation à faire vivre cette dynamique. Car le travail de prospective stratégique ne consiste pas à découvrir un avenir déjà écrit : c'est accepter de déplacer les cadres de pensée pour accroître, dès aujourd'hui, notre liberté d'action dans des futurs possibles qu'il nous revient de construire. »

GENÈSE DU LAB DES FUTURS



L'ACADEM et le CESA ont décidé d'unir leurs forces dans le cadre de la première expérimentation du *Lab des Futurs*, nouvel espace d'intelligence stratégique, inauguré le 03 décembre 2025 à l'Ecole militaire lors du 1^{er} colloque de prospective du Ministère des armées. La présente étude, réalisée par l'équipe prospective de la Chaire de stratégies aérienne et spatiale appliquées du CESA en tant que maître d'œuvre, sous la maîtrise d'ouvrage d'ACADEM, constitue la première concrétisation de cette expérimentation.

Elle propose aux décideurs une vision prospective des intérêts français en matière de métaux critiques à l'horizon 2050, susceptible de les éclairer dans la préparation d'un futur à la hauteur des défis auxquels la France pourrait devoir faire face. Elle s'inscrit dans une démarche méthodologique² fondée sur l'exploitation de techniques cognitives permettant de penser à nouveau le cadre du problème posé, pour mieux en expliciter les structures profondes, en identifier les invariants, en isoler les variables critiques et en apprécier les dynamiques (tendancielle et disruptive) de transformation possibles dans un contexte stratégique multidimensionnel.

² Dr. (HDR) CLECH J., La prospective stratégique, une nouvelle approche pour améliorer la prise de décision, Hermann, 2023 et Les nouveaux maîtres du futur, comment la prospective stratégique permet de façonner l'avenir, Hermann, 2026.

SYNTHÈSE



La prospective stratégique, en amont de l'anticipation stratégique et de la stratégie qui en constituent la déclinaison à moyen et plus court terme, invite à élaborer une certaine vision de l'avenir et à en explorer les conditions de possibilité. Elle ne vise pas à prédire l'avenir, mais à rendre intelligibles les transformations susceptibles d'affecter les cadres d'action du décideur.

Appliquée aux métaux critiques, cette démarche identifie les grandes tendances qui affectent les intérêts français sur l'ensemble de la chaîne de valeur à l'horizon 2050. Au cœur de cette réflexion émerge la question de la substituabilité qui, envisagée dans son acception la plus large et la plus profonde, constitue le pivot structurant de l'éventail des huit scénarios de l'étude. Sous l'effet des ruptures, elle peut prendre des formes diverses et conduire à différentes modalités de substitution susceptibles de modifier, réduire, déplacer ou recomposer les dépendances qui affectent les intérêts français.

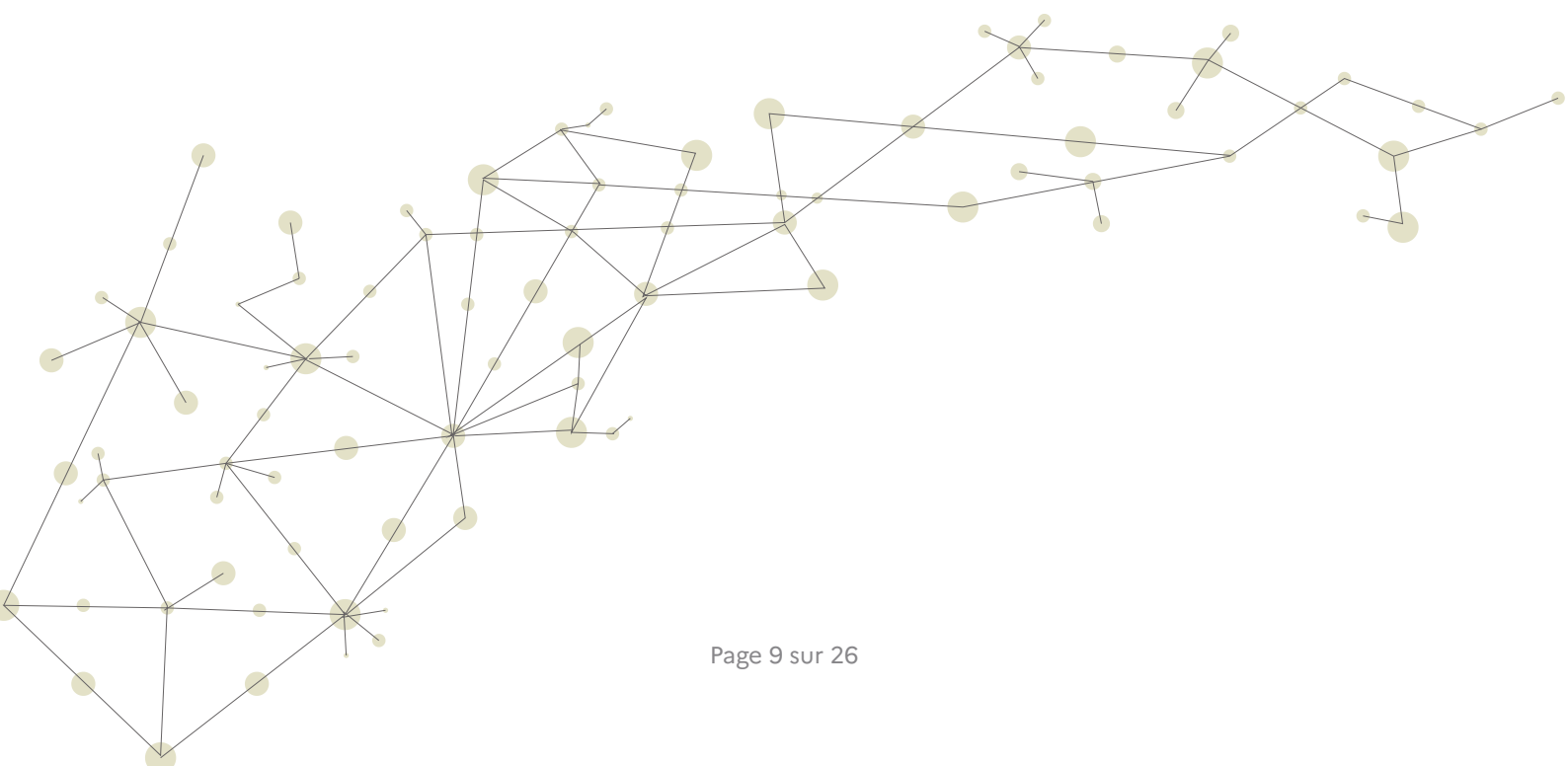
Le point de départ résulte d'un constat simple : les métaux critiques sont indispensables à de nombreux secteurs stratégiques (défense, énergie, numérique, aéronautique, spatial) alors que la France reste dépendante d'une chaîne de valeur mondialisée et concentrée. Cette vulnérabilité concerne non seulement l'accès aux gisements, mais également le raffinage, la transformation, l'intégration industrielle, la distribution et le recyclage. Le rapport cherche donc à répondre à une préoccupation centrale autour de la substituabilité : comment la France peut-elle rester souveraine dans un monde où l'accès aux métaux critiques devient de plus en plus difficile ? Comment réduire, déplacer ou transformer ces dépendances lorsque le remplacement direct d'un métal par un autre n'est pas possible ?

Le principal enseignement de cette étude nous apprend que la ressource primaire n'est pas centrale car la dépendance se déplace : dépendance à une mine, à un pays, à une technologie, à une usine de raffinage, à l'énergie, aux financements ou encore aux règles internationales. En ce sens, la souveraineté consiste moins à posséder la ressource qu'à maîtriser les dépendances qu'elle crée. Le rapport insiste ainsi sur l'importance du raffinage, de la transformation, du recyclage, de l'innovation et de la capacité à négocier sur les marchés.

Pour la France, quatre grandes vulnérabilités sont identifiées : la dépendance à certains maillons de la chaîne de valeur, la fragilité des solutions de substitution, l'accès à une énergie abondante et compétitive, et la montée des rivalités économiques, technologiques, normatives et géopolitiques.

Les huit scénarios imaginent différentes façons de réduire ou de transformer cette dépendance : rester dans le système actuel et subir la rareté ; développer le recyclage ; exploiter de nouveaux gisements, y compris dans les grands fonds marins ; utiliser davantage les outils financiers ; créer de nouveaux matériaux capables de remplacer certaines fonctions des métaux critiques ; utiliser une énergie très abondante pour remplacer une partie de l'intensité matérielle ; ou, plus radicalement, utiliser l'intelligence artificielle et le calcul pour optimiser l'utilisation des ressources et organiser leur répartition.

Le message du rapport est le suivant : si la France ne pourra probablement pas devenir totalement indépendante en métaux critiques, elle pourra, en revanche, devenir beaucoup moins vulnérable en investissant dans le raffinage, la transformation et le recyclage, en diversifiant ses approvisionnements, en développant ses technologies, en sécurisant son énergie et surtout en consolidant une capacité à peser sur les marchés et les règles internationales. En somme, le véritable enjeu n'est pas seulement de savoir où trouver les métaux critiques, mais de savoir comment la France peut continuer à agir et à décider lorsque ces métaux deviennent rares, chers ou contrôlés par d'autres.



MÉTHODE



La méthode utilisée repose sur six étapes, conduites durant trois mois à partir d'une base documentaire, d'une cartographie des acteurs, d'ateliers prospectifs interministériels et de consultations d'experts sur différentes étapes³ de la production.

1. Établir l'état de l'art.

La première étape consiste à identifier les acteurs et facteurs clés grâce à la grille d'analyse PESTEL, choisie pour l'étendue du spectre d'analyse qu'elle permet de couvrir. Celle-ci classe les facteurs susceptibles d'influencer les évolutions à venir selon les dimensions politique, économique, sociale et sociétale, technologique, environnementale et légale. Elle permet d'identifier les éléments susceptibles de jouer un rôle déterminant dans le renforcement de la souveraineté nationale de la base industrielle et technologique de défense (BITD) dans le domaine des métaux critiques et stratégiques à l'horizon 2050.

2. Idéation et hiérarchisation des facteurs.

Les facteurs identifiés sont ensuite positionnés selon leur probabilité d'occurrence et leur impact potentiel à l'horizon 2050 dans un diagramme. Cette étape distingue les tendances lourdes (probabilité de réalisation élevée) des hypothèses de rupture (évolutions jugées peu probables, mais susceptibles d'entraîner des transformations profondes du système). L'objectif n'est pas de prédire l'avenir, mais de faire ressortir les déterminants majeurs et les incertitudes nécessaires à la construction des scénarios.

³ Validation de l'état de l'art, consolidation des tendances, idéation des ruptures, discrimination et renforcement des scénarios.



3. Validation par l'abaque de Régnier.

L'abaque de Régnier repose sur une consultation structurée d'un panel d'experts issus de disciplines et de domaines de compétences variés. Il permet de recueillir, puis de visualiser leurs appréciations sur différentes tendances ou hypothèses grâce à une échelle de réponses codifiée par couleurs. Dans le cadre de cette étude, il servira ainsi à faire apparaître les convergences et les divergences entre experts, afin d'identifier les tendances faisant consensus et celles suscitant davantage d'incertitudes ou de désaccords.

4. Construction de l'arbre des scénarios dynamiques (voir annexe I).

Un arbre des scénarios dynamiques est ensuite construit afin de déterminer l'évolution temporelle, le rythme et les moments clés de chaque scénario. Il permet de passer de l'identification des facteurs et ruptures à des scénarios contrastés, structurés dans le temps et identifiables selon leur propre trajectoire.

5. Approfondissement à l'aide de « 7 questions de Sami ».

Cette étape examine chaque scénario sous différents angles à partir d'une liste de questions systématiques qui incitent à déplacer le point de vue initial. Elle permet de tester les hypothèses initiales et d'identifier les fragilités, dépendances, points critiques et ruptures potentielles, en évitant une vision trop linéaire.

6. Vers le consensus.

Enfin, la méthode DELPHI confronte anonymement les avis des membres de l'équipe rouge en vue d'atteindre un certain niveau de consensus, sans éliminer les désaccords persistants, qui sont conservés comme indicateurs d'incertitude ou de vigilance. À l'issue de cette démarche, l'équipe rouge retient les scénarios jugés les plus pertinents au regard des objectifs de l'étude, le plus menaçant, le plus exigeant et le plus ambitieux, tout en explicitant les limites et les incertitudes associées à ceux-ci.

LA MÉTHODE PROSPECTIVE EN RÉSUMÉ

La préservation des intérêts français dans les six étapes de la chaîne de valeur⁴, conçue comme le point de repère de l'analyse, amène la question centrale à laquelle les scénarios apportent des éléments d'éclairage : sous quelles conditions les différents régimes de substituabilité pourraient-ils reconfigurer nos dépendances structurelles aux métaux critiques, et par conséquent, affecter les intérêts français ?

A travers huit scénarios prospectifs conçus par l'équipe verte puis consolidés par l'équipe rouge, l'étude souligne l'aspect multidimensionnel de la vulnérabilité française. La dépendance ne concerne pas seulement l'accès aux minerais mais porte également sur les capacités industrielles, technologiques, financières, énergétiques, réglementaires et humaines nécessaires à leur extraction, leur transformation et leur utilisation.

Ces huit scénarios prospectifs peuvent être compris comme huit façons différentes d'appréhender la dépendance en couvrant chacun une substituabilité et montrent surtout que la dépendance disparaît rarement totalement. En effet, à mesure que la France réduit sa dépendance aux ressources elles-mêmes, celle-ci se déplace vers les capacités nécessaires pour les remplacer, les recycler, les transformer ou en gouverner l'accès. En ce sens, la souveraineté ne repose pas uniquement sur la substitution matérielle, mais sur la construction d'architectures industrielles, financières, énergétiques, numériques, normatives et cognitives permettant de rendre la rareté maîtrisable.

L'étude révèle **quatre vulnérabilités récurrentes** qui conditionnent directement la préservation des intérêts français :

- Les dépendances critiques à un ou plusieurs maillons des chaînes de valeur ;
- La vulnérabilité des stratégies de substitution des ressources et des matériaux ;
- L'accès à une énergie abondante, soutenable et compétitive ;
- L'intensification des rivalités dans les domaines économique (concurrence accrue, captation des innovations), normatif et cognitif (maîtrise de l'influence, gouvernance internationale, définition des normes et de l'éthique du « bien commun »), ainsi que dans le contrôle et la gestion des technologies et des ressources stratégiques.

L'étude identifie également des **leviers d'action pour en atténuer les effets** :

- La capacité à s'affranchir des vulnérabilités en état de dépendance, notamment via l'investissement dans :
 - L'exploration de nouveaux gisements ;
 - La relocalisation de certains maillons de la chaîne de valeur (raffinage, transformation, intégration) ;
 - Les technologies innovantes (recyclage, alliages, procédés physico-chimiques).
- La capacité à acquérir un pouvoir de négociation sur les marchés ;
- La capacité à produire de l'énergie abondante et peu chère (conférant également un pouvoir de négociation accru) ;
- La capacité à façonner les architectures d'allocation des ressources et de gouvernance de la rareté.

Parmi les huit scénarios, **trois ont été retenus de manière consensuelle pour leur aspect respectivement menaçant, exigeant et ambitieux**. L'infographie ci-après résume leurs caractéristiques.

⁴ Extraction, raffinage/purification, fabrication de produits intermédiaires, intégration dans des produits finis, distribution/commercialisation, recyclage/gestion des déchets.

LE PRODUIT

LES 3 SCÉNARIOS RETENUS



LE PLUS MENAÇANT

La guerre silencieuse des stocks

SCÉNARIO 4

- Illustre un échec stratégique où la financiarisation des ressources prive la France de son autonomie, la rendant dépendante d'architectures de marché qu'elle ne contrôle pas.
- Reflète une vision de l'avenir dans laquelle la logique de substituabilité poursuivie par la France est empêchée, voire mise en échec.



LE PLUS EXIGEANT

Au-delà de la matière

SCÉNARIO 6

- Repose sur la maîtrise de la fusion nucléaire pour déployer des procédés industriels nouveaux.
- Bien que techniquement difficile, il offre à la France un levier de souveraineté industrielle sans précédent en relativisant la rareté matérielle par l'abondance énergétique.
- Explore une forme de substituabilité particulièrement ambitieuse.



LE PLUS AMBITIEUX

Le monde à front renversé

SCÉNARIO 7

- Propose un renversement paradigmatique où la France utilise ses atouts en optimisation algorithmique et en diplomatie normative pour piloter la gouvernance internationale des métaux en tant que biens communs.
- Le scénario 7 sélectionné comme le plus ambitieux en raison des actuels verrous scientifiques, technologiques, industriels et économiques liés à la fusion nucléaire.

En conclusion, la préservation des intérêts français ne dépend pas tant de la possession des ressources que de la capacité à maîtriser les dépendances qu'elles génèrent. Cela suppose notamment d'investir dans l'exploration, la relocalisation de certains maillons de la chaîne de valeur, le recyclage et les technologies innovantes, mais aussi de développer un pouvoir de négociation sur les marchés, une énergie compétitive et la capacité à influencer les architectures de gouvernance.

LES SCÉNARIOS

1. L'ÈRE DES MÉTAUX RARES : ENTRE DÉPENDANCE STRATÉGIQUE ET INNOVATION CONTRAINTE

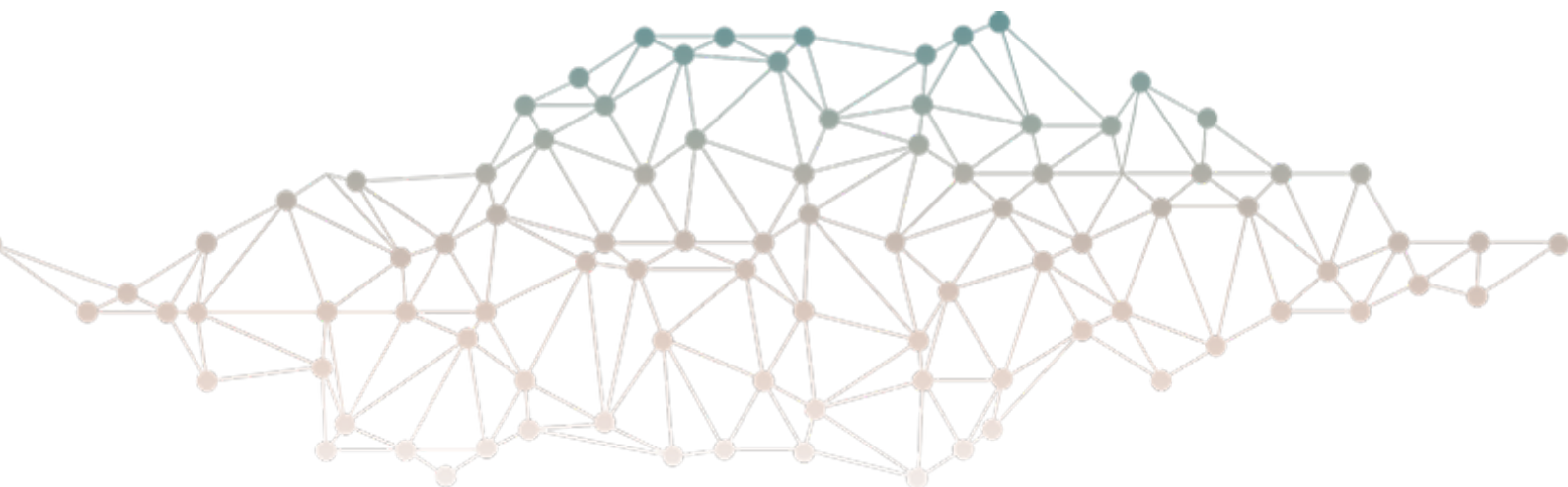
Ce scénario de base repose sur l'**absence de rupture fondamentale** et n'explore **aucun mode de substituabilité**. Les tendances existantes se prolongeant entraînent pour la France une aggravation de sa dépendance structurelle aux métaux critiques qui réagit de manière contrainte par l'innovation. La transformation est subie et repose sur des **ajustements défensifs** (sécurisation des accès, stocks, relocalisation partielle) **sans action de fond sur la chaîne de valeur**. Les intérêts français se dégradent durablement, pénalisés par une **dépendance aux importations**, une **capacité d'action limitée** et une **perte de maîtrise** sur les segments stratégiques, avant une stabilisation **sans gain net** à l'horizon 2050.

L'« ère des métaux rares » s'impose comme la trajectoire naturelle d'un système mondial qui ne parvient pas à corriger ses déséquilibres. En l'absence de rupture ou de décision structurante, **la France n'échappe pas à une logique de dépendance gérée plutôt que maîtrisée**. Dans une économie portée par l'électrification, la numérisation et l'essor de l'intelligence artificielle, la demande en métaux critiques, indispensables aux batteries, aux composants électroniques ou aux infrastructures énergétiques, progresse plus vite qu'une offre rigide, contrainte par ses délais de développement et sa faible élasticité. Concrètement, chaque montée en puissance industrielle (déploiement de réseaux, production de véhicules électriques, montée en gamme des systèmes numériques) se traduit par une pression accrue sur des ressources dont l'accès devient toujours plus incertain. **Faute de sobriété matérielle, le système ne s'ajuste plus par l'innovation, mais par la contrainte**. Dès 2030, cette tension se matérialise dans les chaînes de valeur : les industriels arbitrent en permanence entre coûts, délais et priorités d'usage, au risque de ralentir certains projets ou de dégrader leurs performances. Les intérêts français se trouvent directement fragilisés, pris dans des dépendances d'approvisionnement qu'ils ne contrôlent pas. À partir de 2038, les réponses mises en œuvre (relocalisation partielle du raffinage, diversification des partenariats, constitution de stocks) permettent **d'amortir les chocs sans modifier la structure du problème**. Ces mesures stabilisent la dégradation, mais ne recréent pas de marge de manœuvre : elles déplacent la contrainte plus qu'elles ne la résolvent. En 2050, le système atteint un point d'équilibre contraint. Les intérêts français retrouvent leur niveau de départ, sans gain net après vingt années d'efforts, dans un environnement où la dépendance demeure la règle. **La soutenabilité ne résulte pas d'une transformation du modèle, mais d'une capacité à absorber les tensions** : la France ne subit plus une dégradation rapide, mais elle ne parvient pas davantage à reprendre l'initiative. Dans ce scénario, la puissance ne se perd pas brutalement mais elle s'érode, puis se fige, dans un monde où la rareté n'est plus une crise, mais une condition permanente.

2. LE MONDE SOUS CONTRAINTE

Reposant sur une **raréfaction aggravée sans rupture technologique majeure**, ce scénario explore la **substituabilité matérielle** contrainte (recyclage, substitutions partielles, optimisation des usages) qui s'organise pour compenser des dépendances persistantes. **La criticité de la chaîne de valeur se déplace vers les capacités intermédiaires** (raffinage, transformation, intégration), devenues les véritables points de contrôle. Les **intérêts français** sont **partiellement préservés** par des ajustements progressifs, mais restent **limités par des arbitrages sectoriels** et une dépendance structurelle aux chaînes de valeur globalisées.

En 2050, la France évolue dans un monde durablement contraint, où la raréfaction aggravée des métaux critiques et l'intensification des tensions géoéconomiques ne provoquent pas de rupture visible ou de transformation technologique majeure, mais **déplacent silencieusement le centre de gravité du système**. **La contrainte n'est plus tant celle de la ressource disponible que celle de son accès effectif** : le véritable verrou devient la maîtrise des capacités intermédiaires (raffinage, transformation, intégration) qui conditionnent l'entrée des métaux dans les chaînes industrielles. Faute de substitut pleinement opérationnel, une **substituabilité matérielle contrainte** s'installe, faite d'ajustements progressifs, de compromis techniques et d'arbitrages permanents entre usages. Dès 2030, cette contrainte se matérialise dans les chaînes de production : le recyclage et la mobilisation des flux secondaires permettent de récupérer une partie de la matière, mais sans suffire à suivre la demande. Les industriels arbitrent : certains programmes énergétiques sont maintenus, d'autres retardés, et certaines applications civiles dépriorisées. Les intérêts français poursuivent leur érosion jusqu'en 2035. À partir de 2038, la **relocalisation partielle des capacités intermédiaires** redonne une prise sur certains maillons critiques : raffiner localement, intégrer pour des secteurs clés, sécuriser des segments sensibles. **Cette reprise de contrôle ne transforme pas le système, mais elle en ralentit la dégradation** et permet un retour progressif vers le niveau de 2025. Entre 2042 et 2050, le système s'ajuste plus finement. Le recyclage gagne en efficacité, les architectures des produits évoluent (moins de matière critique par fonction, meilleure combinaison de matériaux) et la dépendance recule à la marge. Concrètement, **il s'agit moins de remplacer que d'optimiser** : concevoir différemment pour consommer un peu moins, arbitrer en continu pour tenir. Les intérêts français sont alors relativement préservés, au prix d'arbitrages sectoriels persistants et d'une dépendance qui demeure structurante. Dans ce scénario, la soutenabilité ne vient pas d'une transformation du modèle, mais de la capacité française à piloter la contrainte. La France ne parvient pas à s'extraire de la dépendance, elle l'organise.



3. LA RUÉE VERS L'INVISIBLE

Le scénario se base sur **l'émergence de nouvelles ressources accessibles** : une substituabilité des gisements s'opère entre des ressources terrestres traditionnelles et de nouveaux gisements découverts dans les milieux extrêmes (fonds marins, espace). Pour la France, la **criticité de la chaîne de valeur** déplace la compétition vers **l'exploration, le contrôle des infrastructures et la circulation des flux**, dans des chaînes de valeur plus fragmentées et vulnérables. **Les intérêts français sont préservés** de manière conditionnelle, **à la hauteur des capacités technologiques et financières mobilisées**, notamment dans l'offshore profond et le spatial, mais restent **limités par des contraintes d'investissement**.

En 2050, la découverte de nouvelles ressources accessibles (terrestres profondes, marines et spatiales) ne supprime pas la dépendance, mais la déplace. **La rareté ne disparaît pas : elle change de forme. La compétition ne se joue plus seulement sur l'accès aux gisements existants, mais sur la capacité à découvrir, exploiter, contrôler et surtout intégrer ces nouvelles ressources** dans des chaînes de valeur fragmentées et plus vulnérables, où le contrôle des infrastructures et des flux devient déterminant. La puissance ne tient plus à ce qu'un pays possède, mais à ce qu'il est capable de mobiliser et de faire circuler. Dès 2030, la France tire parti de quelques ajustements : un effort sur le recyclage permet de récupérer une partie des métaux critiques (batteries revalorisées, catalyseurs retraités) mais sans modifier la dépendance structurelle. Les tensions persistent, et les intérêts français restent contraints, faute de levier suffisant sur l'offre primaire. Le véritable basculement intervient à partir de 2035, lorsque l'exploitation des ressources sous-marines devient opérationnelle.

Concrètement, l'accès à des nodules polymétalliques dans les grands fonds permet d'alimenter certaines chaînes industrielles autrement dépendantes d'acteurs extérieurs. **Malgré des coûts initiaux élevés** (infrastructures lourdes, bases sous-marines, procédés complexes) **la hausse des prix des métaux rend ces projets viables**. La France, en mobilisant ses compétences dans l'offshore et ses capacités industrielles, parvient à s'insérer dans ce nouvel espace extractif et à réduire partiellement sa dépendance, gagnant un levier de négociation dans les échanges internationaux. Entre 2040 et 2050, les coûts d'exploitation diminuent, les infrastructures se structurent, et certaines capacités de transformation sont relocalisées, permettant à la France de sécuriser une partie des flux. **Les intérêts français sont alors mieux préservés, non pas parce que la dépendance a disparu, mais parce qu'elle est partiellement contournée et mieux négociée**, reconfigurant progressivement leur position sur l'ensemble de la chaîne de valeur des métaux critiques. Parallèlement, les ressources spatiales issues de l'exploration lunaire ou des corps stellaires ouvrent des perspectives, notamment pour les activités spatiales elles-mêmes, mais restent sans effet significatif sur les équilibres terrestres à cet horizon. Dans ce scénario, **la soutenabilité ne repose pas sur une rupture technologique, mais sur une extension du champ des possibles** : la dépendance est déplacée vers de nouveaux espaces, où la capacité d'action nationale dépend directement des moyens que le que les acteurs publics et privés sont prêts à engager.

4. LA FRANCE MINE SES PROPRES DÉCHETS

Ce scénario se déroule à la faveur d'une rupture impliquant l'émergence d'une **circularité franche**. Une **substituabilité matérielle** s'opère entre flux primaires (à partir de l'extraction) et **flux secondaires** (recyclage), transformant les déchets en ressources stratégiques. La chaîne de valeur bascule d'un modèle linéaire ouvert vers un **système circulaire fermé**, centré sur la maîtrise, l'optimisation et la traçabilité des cycles matières. Les intérêts français sont **progressivement préservés** par la réduction de la dépendance extérieure, la sécurisation des flux secondaires et un positionnement renforcé sur les segments de transformation, appuyés par un avantage énergétique et normatif.

En 2050, la contrainte des métaux critiques n'est plus affrontée à la source, mais contournée par une rupture décisive : la circularité franche. **La dépendance aux flux primaires issus de l'extraction est progressivement substituée par la maîtrise des flux secondaires issus des déchets**. Sous l'effet conjugué de tensions géopolitiques (conflits, prédation), environnementales, sociales et juridiques pesant sur les approvisionnements, la France engage une bifurcation stratégique : ce qui était un déchet devient un gisement, et la capacité à récupérer, transformer et réinjecter la matière devient le véritable levier de puissance. À partir de 2032, cette transformation prend corps dans les chaînes industrielles. **Le recyclage ne se limite plus à un appoint : il permet déjà de préserver partiellement les intérêts français**. Concrètement, des métaux issus de batteries usagées, de catalyseurs ou d'équipements électroniques sont récupérés et réintroduits dans la production, réduisant la pression sur les importations.

Dès 2035, la signature de partenariats d'accès aux gisements secondaires (accords de collecte, de traitement ou de valorisation) sécurise ces flux et encadre la dépendance résiduelle. **La France ne subit plus uniquement le marché, elle organise une partie de son approvisionnement**. Le basculement intervient en 2042 avec l'optimisation de procédés technologiques qui permettent une circularité effective. La matière circule en boucle : un produit en fin de vie devient directement l'intrant du suivant. La dépendance aux flux primaires est alors fortement réduite, et **les intérêts français se trouvent durablement transformés : moins exposés aux ruptures d'approvisionnement, mieux sécurisés sur les segments critiques, et davantage ancrés dans une logique de maîtrise industrielle**.

Dès 2050, ce modèle circulaire assure une part significative des besoins français. L'objectif n'est plus seulement d'accéder à la ressource, mais d'en maîtriser l'ensemble du cycle. **Cette souveraineté reste toutefois sous tension**. Les infrastructures de recyclage, les usages de la matière et les choix de consommation deviennent à leur tour des enjeux de débat public et de contestation, tandis que certains acteurs extérieurs cherchent à freiner cette dynamique afin de préserver leur position sur les ressources primaires. La dépendance recule, mais ne disparaît pas : elle change de forme et se déplace désormais vers la capacité à maintenir, optimiser et faire accepter ce système circulaire.

5. LA GUERRE SILENCIEUSE DES STOCKS

Ce scénario novateur mais relativement défavorable pour la France met en œuvre une **substitution du modèle, passant d'un modèle de possession matérielle des métaux critiques à un modèle de possession dématérialisée** fondé sur leur représentation financière et numérique. La chaîne de valeur se reconfigure au profit des **acteurs maîtrisant les marchés, les flux et les instruments financiers**, au détriment des logiques industrielles. Cette transformation **déplace la criticité vers l'aval** (distribution, commercialisation, infrastructures de marché) et expose les intérêts français à une contrainte accrue liée à leur **capacité limitée à peser sur ces architectures globalisées**. La dépendance ne disparaît pas : elle se recompose autour du contrôle des droits d'accès aux ressources plutôt que de leur détention physique.

En 2050, la puissance ne réside plus dans la détention des métaux critiques, mais dans le contrôle de leur représentation. **La valeur bascule de la matière vers le droit d'y accéder** : contrats, titres et « jetons-métaux » deviennent l'équivalent des stocks. Dans un contexte de demande soutenue en métaux critiques, ces instruments, pilotés par des fonds souverains et des acteurs financiers via titrisation, produits dérivés et trading décentralisé reposant sur des registres distribués (*blockchain*), organisent l'accès aux ressources tout en alimentant des circuits opaques, mêlant marchés régulés et parallèles. Dès 2030, ce basculement se prépare sous l'effet d'une **financiarisation stratégique croissante** amorcée dès la fin des années 2020. Le recyclage progresse et sécurise marginalement certains flux, mais ne compense pas la dépendance. Dans le même temps, **la rareté se fabrique** : rétention de stocks, spéculation sur le raffinage, information asymétrique. Concrètement, les industriels arbitrent en permanence entre prix, délais et priorités d'usage, sans visibilité stabilisée sur les approvisionnements.

À partir de 2035, la France **relocalise partiellement l'aval de la chaîne de valeurs pour sécuriser certains segments**. Mais cette reprise reste fragile : les flux passent par des marchés fragmentés et opaques, au sein desquels la distribution et la contractualisation échappent largement au contrôle national. Même transformée sur le territoire, la ressource reste dépendante des logiques de marchés. À partir de 2040, la financiarisation s'impose partout et le système change de nature. **Sécuriser l'approvisionnement d'un matériau revient à se réserver des droits d'accès futur**. Les acteurs dominants verrouillent ces droits sur plusieurs années via des instruments financiers, orientant les flux sans les détenir physiquement. Les marchés deviennent alors de véritables actifs hybrides, à la frontière des logiques industrielles et financières. Dans ce cadre, les intérêts français sont contraints : faute de capacité financière suffisante, **la France peine à capter durablement ces droits, malgré ses outils institutionnels**.

En 2050, la chaîne de valeur est dominée par ces architectures de marché. **Le pouvoir s'exerce dans la capacité à organiser et prioriser les flux**. La dépendance française persiste, déplacée vers des systèmes financiers globalisés où l'accès prime sur la possession, dans un environnement marqué par la spéculation, l'opacité et l'asymétrie des puissances, et alimentée par l'action d'acteurs contournant les régulations, de réseaux criminels spécialisés et de marchés parallèles qui brouillent la frontière entre possession réelle et possession déclarée.

6. FRANCKENSTEEL, SYNTHÈSE AD-HOC

L'accumulation progressive d'innovations fondées sur une ingénierie avancée (alliages, composites, architectures multi-échelle) entraîne une **substitution fondamentale**, progressive, **des métaux critiques par des matériaux de synthèse** reproduisant leurs fonctions, fait émerger une nouvelle catégorie, « 5^{ème} colonne » aux côtés des catégories historiques de métaux critiques (métaux de base, métaux précieux, métaux spécialisés, actinides). La **criticité de la chaîne de valeur se déplace** de l'amont extractif **vers l'aval technologique**, centré sur la **conception et la transformation des matériaux**. Cette transformation permet d'alléger certaines dépendances, mais de manière incomplète et hétérogène, exposant les intérêts français à des **contraintes liées au passage à l'échelle, aux besoins d'investissement** et à la **prédation des innovations** dans un environnement concurrentiel ouvert.

En 2050, la soutenabilité des systèmes industriels français ne repose plus uniquement sur l'accès aux métaux critiques, mais sur la **capacité à en reproduire certaines fonctions par synthèse**. Cette trajectoire se déploie dans un contexte de tension durable (demande croissante en métaux critiques, sous l'effet conjugué des transitions énergétique et numérique, offre rigide, géopolitisation persistante des ressources, domination persistante de certains acteurs sur les capacités de raffinage et de transformation) où la France ne peut rivaliser sur les volumes mais cherche à agir sur la matière elle-même. Le mouvement s'engage dès 2030 : le recyclage ne se limite plus à récupérer, il devient un terrain d'expérimentation. Les sous-produits issus du traitement des déchets alimentent des pistes de synthèse, ouvrant la voie à **des matériaux ajustés fonctionnellement**. L'impact reste toutefois marginal : les chaînes industrielles continuent de dépendre des flux primaires.

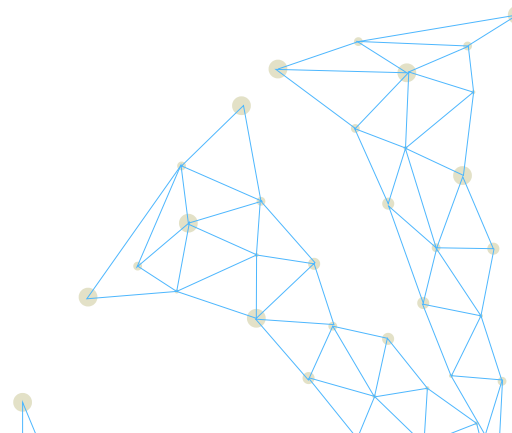
Vers 2035, ces avancées se traduisent dans les systèmes. Dans certains composants, des substitutions partielles apparaissent : **on ne remplace pas un métal, on redistribue ses fonctions, en combinant matériaux et architectures**. L'objectif n'est plus seulement de reproduire les propriétés des métaux critiques, mais également de les recombinaison, voire de les dépasser par ingénierie. Concrètement, cela permet d'alléger certaines contraintes d'approvisionnement ou de sécuriser des segments spécifiques. Mais cette dynamique reste inégale notamment dans les secteurs où la dépendance demeure forte (défense, énergie), limitant l'effet systémique. Toutefois, à partir de 2050, l'accumulation de ces progrès fait émerger **une nouvelle catégorie de matériaux de synthèse, conçus pour remplir des fonctions précises**. Ils réduisent certaines dépendances en offrant des alternatives crédibles dans des usages ciblés, sans transformer l'ensemble du système. **Le passage à l'échelle devient alors le point de friction** : industrialisation coûteuse, diffusion lente, concurrence d'acteurs disposant de moyens supérieurs dans un environnement marqué par une compétition accrue entre puissances et une fragmentation croissante des alliances économiques et industrielles. Dans ce cadre, les intérêts français sont partiellement préservés. La France capte de la valeur sur des segments de conception et d'ingénierie, mais peine à généraliser ses avancées. **La dépendance n'est pas levée : elle se reconfigure, se déplaçant des ressources vers les capacités d'industrialisation et de maîtrise technologique**, dans un environnement où l'avantage technologique français reste fragile et contesté.

7. AU-DELÀ DE LA MATIÈRE

Une rupture par **substitution techno-énergétique** permet le passage d'un modèle en **2D (matière, chaîne de valeur)** à un **modèle en 3D intégrant l'énergie** comme levier structurant, permettant de **relativiser la rareté matérielle**. La transformation repose sur une capacité à substituer partiellement l'intensité énergétique à l'intensité matérielle via des procédés industriels énergivores rendus viables par la **fusion nucléaire**. Les intérêts français sont renforcés par la maîtrise des étapes intermédiaires de la chaîne de valeur (raffinage, transformation, intégration) et par un **pouvoir de négociation supérieur** offert par la **détention d'énergie**, mais restent contraints par la persistance de dépendances sur certains métaux non substituables. Composante idéale typique autour du levier énergétique (3D), ce scénario est à explorer toutes choses étant égales par ailleurs sur les éléments du modèle 2D (chaîne de valeur et métaux).

En 2050, la soutenabilité des systèmes industriels et technologiques français fondés sur les métaux critiques repose sur une rupture silencieuse mais structurante : le **découplage progressif entre la performance et la matière, rendu possible par l'émergence d'une énergie abondante issue de la fusion nucléaire**. La contrainte matérielle ne disparaît pas, mais elle change de statut. La rareté des ressources cesse d'être le déterminant unique de la puissance industrielle ; elle est progressivement relativisée par la capacité à mobiliser une puissance énergétique massive. Elle devient une contrainte parmi d'autres, susceptible d'être contournée, compensée ou reconfigurée. **Le système bascule ainsi d'un modèle en deux dimensions (matière et chaîne de valeur) vers un modèle en trois dimensions** où l'énergie devient un levier stratégique à part entière, reconfigurant les rapports de force et les marges de manœuvre. Cette transformation s'inscrit dans une logique de substitution techno-énergétique : **l'énergie n'est plus un simple facteur de production, mais un véritable levier de transformation systémique**.

Ce basculement prend corps à partir de 2048, lorsque l'industrialisation de la fusion nucléaire devient effective. L'abondance énergétique transforme concrètement les chaînes industrielles : des procédés jusque-là prohibitifs deviennent accessibles. Produire des alliages alternatifs par électrolyse à haute température, intensifier la transformation de matériaux moins critiques, ou encore compenser l'usage de métaux rares par des architectures plus énergivores mais techniquement viables devient économiquement pertinent. **Là où la contrainte matérielle imposait des choix, l'énergie ouvre des marges de manœuvre**. La dépendance ne disparaît pas, mais elle se négocie autrement : la capacité à transformer la matière devient plus déterminante que la capacité à l'extraire. Le pouvoir de négociation, historiquement associé à la détention de ressources critiques, se déplace progressivement vers la capacité à produire et à mobiliser de l'énergie à grande échelle. À l'horizon 2050, les intérêts français sont ainsi mieux préservés. **L'avantage ne réside plus dans l'accès aux ressources, mais dans la maîtrise des étapes intermédiaires** (raffinage, transformation, intégration) désormais soutenues par une capacité énergétique hors norme. Cette position permet de réduire la vulnérabilité aux chocs d'approvisionnement et de renforcer le pouvoir de négociation dans les échanges internationaux. Toutefois, cette reconfiguration reste incomplète : certains métaux spécialisés, difficilement substituables, continuent de structurer des dépendances résiduelles. L'équilibre du système repose alors sur un arbitrage permanent entre intensité énergétique et intensité matérielle, où l'énergie élargit les possibles sans jamais abolir totalement la contrainte.



8. LE MONDE À FRONT RENVERSÉ

Le scénario explore la **substitution d'un modèle de performance** fondé sur la rareté matérielle **par un modèle centré sur l'architecture**, combinant optimisation technologique et refonte normative autour du statut de bien commun. Les six maillons de la chaîne de valeur se retrouvent dominés par un « **7^{ème} maillon** » qui les embrassent tous, et par des acteurs **maîtrisant les architectures de calcul, d'allocation et de gouvernance des ressources**. Cette transformation permet à la France, qui serait en pointe dans les capacités de calcul et sur les applications quantiques, de transformer sa dépendance en ressources vers des leviers qu'elle maîtrise davantage (gestion des allocations, normes) fort d'un **pouvoir de négociation supérieur** et d'une légitimité historique sur les questions éthiques, renforcés par ses savoir-faire dans les solutions d'optimisation et de calcul, garantissant ainsi ses intérêts par l'influence et la capacité de pilotage d'une **nouvelle gouvernance internationale de la rareté**, résolument plus éthique, mais qui reste contestée par les acteurs historiques.

En 2050, la **puissance ne se mesure plus à la détention de métaux critiques, mais à la capacité à en organiser l'usage**. La valeur stratégique bascule de la matière vers l'architecture : **ce sont désormais les systèmes qui allouent, optimisent et arbitrent les ressources qui structurent la performance**. L'architecture est alors entendue à la fois comme organisation technique des systèmes et comme cadre normatif et éthique de leur usage. **La dépendance ne disparaît pas, elle devient pilotable**. Dès 2030, la France engage cette transition en intégrant l'optimisation au cœur des systèmes industriels. Batteries, composants ou infrastructures énergétiques sont conçus pour atteindre des performances équivalentes avec des intrants moins critiques, grâce à l'ajustement logiciel et algorithmique des usages. **Des propriétés telles que la conductivité, la résistance thermique ou le stockage énergétique ne dépendent plus exclusivement de la présence de métaux rares, mais de la capacité à optimiser les architectures matérielles et logicielles**. L'intelligence artificielle, puis le calcul quantique, permettent d'arbitrer en temps réel entre matériaux, cycles d'usage et contraintes d'approvisionnement : la ressource n'est plus seulement consommée, elle est gérée comme un flux optimisé.

À l'horizon 2045, cette maîtrise devient un levier de puissance. Les outils français d'optimisation, capables de modéliser des chaînes de valeur complètes et de prioriser les usages critiques, s'imposent progressivement comme référentiels. Cette trajectoire s'inscrit dans une tradition française où l'influence normative et la capacité d'innovation conceptuelle compensent des contraintes matérielles structurelles. Dans un contexte de rivalités accrues entre grands blocs économiques et technologiques et de domination persistante sur l'amont, notamment sur les segments de raffinage et de transformation, **cette capacité à organiser la rareté confère à la France un pouvoir de négociation supérieur à ses moyens matériels**. En 2050, l'équilibre se recompose autour d'une gouvernance où les métaux critiques tendent vers un statut de bien commun, piloté par des architectures de calcul avancées. L'allocation des ressources repose moins sur la possession que sur la capacité à en définir les règles d'usage. **Cette transformation normative demeure toutefois intrinsèquement conflictuelle** dans un environnement où les grandes puissances continuent de rivaliser pour la sécurisation des ressources critiques. Les intérêts français sont alors durablement préservés : en maîtrisant les systèmes qui gèrent la dépendance, la France transforme une contrainte structurelle en levier d'influence, au cœur d'un ordre où la puissance réside dans le contrôle des architectures plutôt que dans celui des stocks.

EXPÉRIMENTATION IA

Dans le cadre de cette étude prospective sur les métaux critiques, l'équipe rouge, composée d'experts pluridisciplinaires, occupe une fonction essentielle de consolidation, de mise à l'épreuve et de validation des scénarios. Ceux-ci ne sont ainsi pas considérés comme des conclusions, mais comme des hypothèses de travail devant être confrontées à la contradiction. L'équipe rouge intervient précisément pour tester leur solidité et identifier leurs fragilités selon une démarche structurée en quatre temps : **clarifier, challenger, reformuler et décider**.

La première étape, clarifier, vise à établir une compréhension commune du scénario et à expliciter ses hypothèses de travail. L'équipe rouge cherche notamment à faire apparaître les éléments implicites dont dépend la cohérence du scénario. Cette phase accorde également une place importante aux questions dites « naïves », considérées comme utiles pour révéler des évidences qui ne sont plus suffisamment interrogées.

La deuxième étape, challenger, constitue le cœur de la contribution de l'équipe rouge. Il s'agit d'attaquer le scénario sans chercher immédiatement à le corriger. L'équipe recherche les acteurs oubliés, les réactions adverses susceptibles de le fragiliser, les effets de second ordre, les incertitudes dissimulées derrière certaines évidences ainsi que les biais ou erreurs d'appréciation. Elle confronte également le scénario à un autre, utilisé comme scénario « révélateur », afin de déterminer quelles hypothèses résistent, vacillent ou s'effondrent lorsque les conditions de l'environnement changent. Cette approche permet ainsi de faire apparaître les angles morts du raisonnement et, surtout, d'identifier les hypothèses critiques dont dépend l'ensemble du scénario. L'équipe rouge ne cherche donc pas à démontrer que le scénario est faux, mais à déterminer jusqu'où il résiste. À l'issue de cette phase, l'équipe rouge contribue à la reformulation du scénario. Il ne s'agit pas de construire un nouveau scénario, mais de conserver ce qui a résisté à la critique, de corriger ou de retirer les éléments fragilisés et de reformuler les hypothèses de travail. Cette consolidation doit permettre de disposer d'un scénario robuste tout en conservant les tensions et incertitudes qui font sa valeur prospective.

Enfin, cette analyse débouche sur une décision concrète à instruire, accompagnée de son impact attendu et des indicateurs permettant d'en suivre la pertinence.

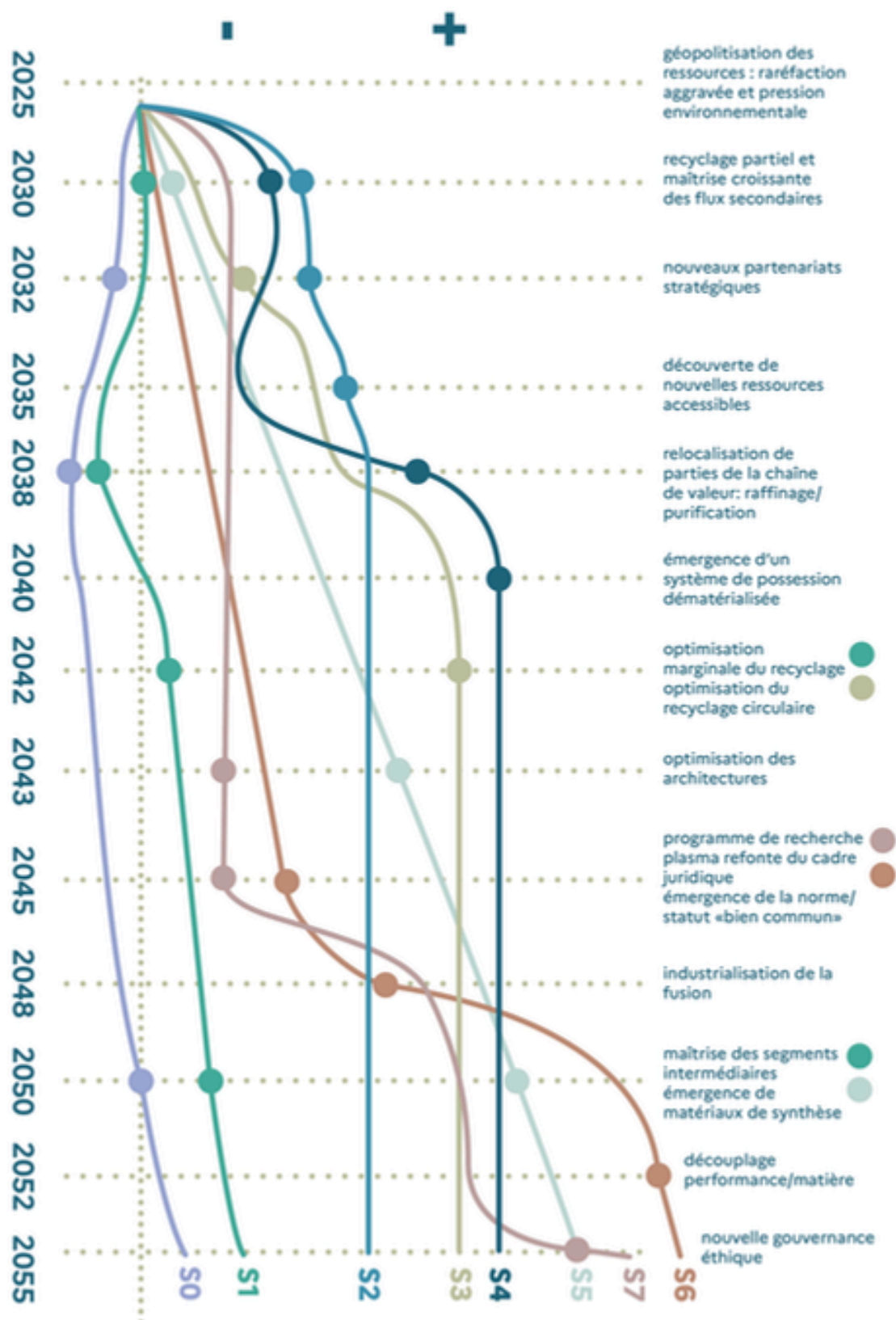
L'intelligence artificielle a été intégrée à chaque étape comme **outil d'appui au raisonnement**, et non comme substitut à l'expertise humaine. Son utilisation vise principalement à accélérer la réflexion, faciliter l'entrée dans le sujet et multiplier les points de vue susceptibles d'être discutés par les participants. L'IA joue notamment un rôle particulièrement intéressant lors du challenge en étant explicitement sollicitée pour jouer le rôle d'une équipe rouge et rechercher systématiquement les acteurs oubliés, les réactions adverses, les effets de second ordre, les incertitudes et les biais. Elle permet ainsi de générer rapidement une première série d'objections que les membres de l'équipe rouge peuvent ensuite examiner, discuter, compléter ou réfuter.

Son utilisation est toutefois encadrée par un principe fondamental : « l'IA propose, l'humain dispose ». L'outil ne décide ni ne valide. Les résultats sont systématiquement soumis au regard des experts. La vérification des sources, l'absence de consensus artificiel et l'arbitrage humain constituent les trois garde-fous de cette utilisation. L'apport de l'IA doit ainsi être compris comme un levier de controverse et d'exploration. Elle permet d'élargir et d'accélérer le champ des objections, mais c'est l'équipe rouge, forte de son expertise, de son expérience et de sa capacité de jugement, qui donne leur valeur aux résultats. L'IA contribue donc à renforcer le dispositif de *red teaming* sans se substituer au travail d'analyse, de confrontation et de décision des experts.

ANNEXE I

SCÉNARIOS DYNAMIQUES

L'ÉVOLUTION DES INTÉRÊTS FRANÇAIS SOUS L'INFLUENCE DE DIVERS FACTEURS (RUPTURES/TENDANCES) IMPACTANT LES SUBSTITUABILITÉS SUR LA CHAÎNE DE VALEUR.



L'ÈRE DES MÉTAUX RARES : ENTRE DÉPENDANCE STRATÉGIQUE ET INNOVATION CONTRAINTE

— SCÉNARIO 0

Ce scénario de base repose sur l'absence de rupture fondamentale et n'explore aucun mode de substituabilité. Les tendances existantes se prolongeant entraînent pour la France une aggravation de sa dépendance structurelle aux métaux critiques qui réagit de manière contrainte par l'innovation. La transformation est subie repose sur des ajustements défensifs (sécurisation des accès, stocks, relocalisation partielle) sans modification de fond de la chaîne de valeur. Les intérêts français se dégradent durablement, pénalisés par une dépendance aux importations, une capacité d'action limitée et une perte de maîtrise sur les segments stratégiques, avant une stabilisation sans gain net à l'horizon 2050.

LA FRANCE MINE SES PROPRES DÉCHETS

— SCÉNARIO 3

Ce scénario se déroule à la faveur d'une rupture impliquant l'émergence d'une circularité franche. Une substituabilité matérielle s'opère entre flux primaires (à partir de l'extraction) et flux secondaires (recyclage), transformant les déchets en ressources stratégiques. La chaîne de valeur bascule d'un modèle linéaire ouvert vers un système circulaire fermé, centré sur la maîtrise, l'optimisation et la traçabilité des cycles matières. Les intérêts français sont progressivement préservés par la réduction de la dépendance extérieure, la sécurisation des flux secondaires et un positionnement renforcé sur les segments de transformation, appuyés par un avantage énergétique et normatif.

AU-DELA DE LA MATIÈRE

— SCÉNARIO 6

Une rupture par substitution techno-énergétique permet le passage d'un modèle en 2D (matière, chaîne de valeur) à un modèle en 3D intégrant l'énergie comme levier structurant, permettant de relativiser la rareté matérielle. La transformation repose sur une capacité à substituer partiellement l'intensité énergétique à l'intensité matérielle via des procédés industriels énergivores rendus viables par la fusion nucléaire. Les intérêts français sont renforcés par la maîtrise des étapes intermédiaires de la chaîne de valeur (raffinage, transformation, intégration) et par un pouvoir de négociation par la détention d'énergie, mais restent contraints par la persistance de dépendances sur certains métaux non substituables. Composante idéale typique autour du levier énergétique (3D), ce scénario est à explorer toutes choses étant égales par ailleurs sur les éléments du modèle 2D (chaîne de valeur et métaux).

LE MONDE SOUS CONTRAINTE

— SCÉNARIO 1

Les reposant sur une raréfaction aggravée sans rupture technologique majeure, ce scénario explore la substituabilité matérielle contrainte (recyclage, substitutions partielles, dépendance persistante). L'activité de la chaîne de valeur se déplace vers les capacités intermédiaires (raffinage, transformation, intégration), devenues les véritables points de contrôle. Les intérêts français sont partiellement préservés par des arbitrages sectoriels et une dépendance structurelle aux chaînes de valeur globalisées.

LE MONDE SOUS CONTRAINTE

— SCÉNARIO 4

Ce scénario novateur mais relativement défavorable pour la France met en œuvre une substitution du modèle, passant d'un modèle de possession matérielle des métaux critiques à un modèle de possession dématérialisée fondé sur leur représentation financière et numérique. La chaîne de valeur se reconfigure au profit des acteurs maîtrisant les marchés, les flux et les instruments financiers, détriment des logiques industrielles, cette transformation déplace la criticité vers l'aval (distribution, commercialisation, infrastructures de marché) et expose les intérêts français à une contrainte accrue liée à leur capacité limitée à peser sur ces architectures globalisées. La dépendance ne disparaît pas : elle se recompose autour du contrôle des droits d'accès aux ressources plutôt que de leur détention physique.

LE MONDE À FRONT RENVERSÉ

— SCÉNARIO 7

Le scénario explore la substitution d'un modèle de performance fondé sur la rareté matérielle par un modèle centré sur l'architecture, combinant optimisation technologique et refonte normative autour du statut de bien commun. Les six maillons de la chaîne de valeur se retrouvent dominés par un « 7ème maillon » qui les embrassent, par des acteurs maîtrisant les architectures de calcul, d'allocation et de gouvernance des ressources. Cette transformation permet à la France, qui serait en pointe dans les capacités de calcul et sur les applications quantiques, de transformer sa dépendance en ressources vers des leviers qu'elle maîtrise davantage (gestion des allocations, normes) fort d'un pouvoir de négociation supérieur et d'une légitimité historique sur les questions éthiques, renforcés par ses savoir-faire dans les solutions d'optimisation et de calcul, garantissant ainsi ses intérêts par l'influence et la capacité de pilotage d'une nouvelle gouvernance internationale de la rareté, résolument plus éthique, mais qui reste contestée par les acteurs historiques.

LA RUÉE VERS L'INVISIBLE

— SCÉNARIO 2

Le scénario se base sur l'émergence de nouvelles ressources accessibles : une substituabilité des gisements s'opère entre des ressources terrestres traditionnelles et de nouveaux gisements découverts dans les milieux extrêmes (fonds marins, espaces). Pour la France, la criticité de la chaîne de valeur déplace la compétition vers l'exploration, le contrôle des infrastructures et la circulation des flux, dans des chaînes de valeur plus fragmentées et vulnérables. Les intérêts français sont préservés de manière conditionnelle, à la hauteur des capacités technologiques et financières mobilisées, notamment dans l'offshore profond et le spatial, mais restent limités par des contraintes d'investissement.

FRANCKENSTEEL, SYNTHÈSE AD-HOC

— SCÉNARIO 5

L'accumulation progressive d'innovations fondées sur une ingénierie avancée (alliages, composites, architectures multi-échelle) entraîne une substitution fondamentale, progressive, des métaux critiques par des matériaux de synthèse reproduisant leurs fonctions, faisant émerger une nouvelle catégorie, « 5ème colonne » aux côtés des catégories historiques de métaux critiques. La criticité de la chaîne de valeur se déplace de l'amont extractif vers l'aval technologique, centré sur la conception et la transformation des matériaux. Cette transformation permet d'alléger certaines dépendances, mais de manière incomplète et hétérogène, exposant les intérêts français à des contraintes liées au passage à l'échelle, aux besoins d'investissement et à la prédation des innovations dans un environnement concurrentiel ouvert.

ANNEXE II

L'ACADEM remercie les contributeurs suivants :

RAPPORTEUR :

COL Dr. (HDR) Jérôme Clech

COMPOSITION DES GROUPES DE TRAVAIL :

GROUPE VERT

Rôle et mission : génération et production

Composition :

CESA :

COL Dr. (HDR) Jérôme Clech

CDT Ludovic Le Jariel

CNE Malcolm Pinel

ASP Mélanie Frangein-Libault

GROUPE ROUGE

Rôle et mission : consolidation, validation

Composition :

Equipe ACADEM :

CA Bertrand Dumoulin, secrétaire général de l'ACADEM

Nicolas Bronard, secrétaire général adjoint de l'ACADEM

LCL Anne de Luca, responsable du projet "prospective" à l'ACADEM

Gabriel Yabrir, chargé de mission prospective à l'ACADEM

CNE Yves Auffret, chercheur en cyberspace à l'IRSEM

Oxana Auquier, stagiaire au pôle Anticipation stratégique et orientations

François Chambon, délégué à la prospective à l'IHEMI

Perrine Choppick, membre de la Fédération Atlas

Louis Dallier, stagiaire au département des études et de la recherche de l'IHEDN

LCL Raphaël Danino-Perraud, chercheur associé à l'IRSEM

COL Diane Geribaldi, officier traitant au pôle Anticipation stratégique et orientations

Léa Gobin, cheffe de section Sécurité énergétique à la DGRIS

Martial Foucault, directeur de l'IRSEM

Thibaud Frossard, vice-président et directeur Défense et Sécurité chez Capgemini

Stéphane Giron, dirigeant de Futuring Lab

Fabien Gouttefarde, chef de département à la DGRIS

Jean-Marie Kowalski, chef du département des sciences humaines de l'École navale

Cécile Maisonneuve, présidente fondatrice de DECYSIVE

Nicolas Marescaux, président Movin'On

Florian Merviel, stagiaire analyste Énergie et souveraineté économique à la DGRIS

COL Arnaud Pellabeuf, officier traitant au pôle Anticipation stratégique et orientations

Mayottine Peyret, analyste économique à l'UIMM

Christophe Polaert, prospectiviste à l'IHEMI

Philippe Quintin, administrateur de l'État au MEAE

Andrée de Saint-Affrique, directrice de programme « Transformation pour l'anticipation stratégique » à la DGA

Cléo Stepien, chargée de mission Prospective à l'IHEMI

CV Guillaume Tandonnet, officier de la Marine nationale

Ian Ouaknine, avocat associé DWF

ICA Xavier Truel, chef de département au CGArm

GROUPE EXPERTS

Rôle et mission : consultation, expertise

Composition :

Alexandre François, chargé de projet du programme DEFENDRE, The Shift Project

Stéphane Bourg, directeur de l'OFREMI

Laurent Goychman, expert en prospective stratégique

Alexandre Marciel, expert en métaux critiques, nouvelles énergies et souveraineté

Noémie Rebière, cheffe de projet du programme DEFENDRE, The Shift Project

Yan St-Pierre, CEO et consultant en politique de contre-terrorisme, Mosecon

Vincent Donnen, associé fondateur de la Compagnie des Métaux Rares France

Pierre Bollinger