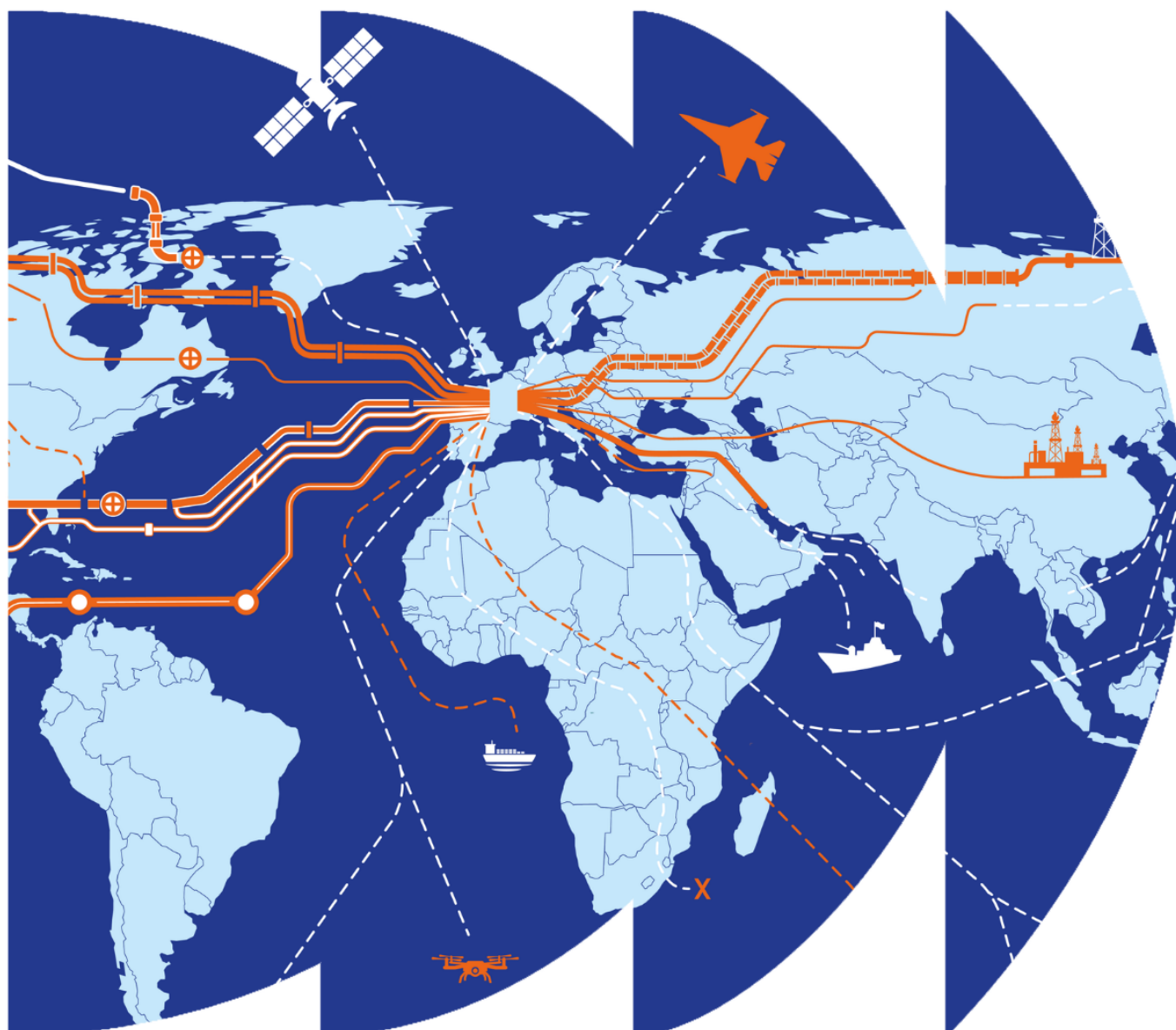


ÉNERGIE, RESSOURCES, CLIMAT : UNE DÉFENSE SOUS CONTRAINTES PHYSIQUES

Rapport introductif au programme DEFENDRE - Juin 2026

DANS LE CADRE DU
PLAN ROBUSTE POUR L'ÉCONOMIE FRANÇAISE



A LIRE

Chère relectrice, cher relecteur,

Ce rapport introductif à notre programme de travail pluriannuel DÉFENDRE vise à définir le cadre physique du problème afin de poser les bonnes questions. Bien que très avancé et déjà le fruit d'un travail collectif, il est publié ici en version intermédiaire : il reste évolutif et à finaliser.

Vous pouvez lire ce rapport intermédiaire :

- Sous [.pdf](#) et nous faire vos retours par mail à defense@theshiftproject.org
- Sous Google doc, à travers des commentaires et des « suggestions » directement dans le texte. Nous vous invitons, si possible, à **signer vos commentaires**, afin que nous puissions vous recontacter en cas de besoin.

Notez qu'en faisant des commentaires et suggestions dans ce document, vos propositions seront visibles par tout le monde. Si vous souhaitez faire des modifications directement dans le texte, ce que nous espérons, mais pas sur ce document public, vous pouvez télécharger directement ce document en version Word ou pdf et nous l'adresser par mail.

Vos corrections, amendements, suggestions, commentaires ou ajouts sont encouragés et contribueront à améliorer la qualité et la pertinence de notre rapport.

Toutes les sources de **données** que vous pourrez nous transmettre seront très utiles pour finaliser ce rapport.

Au plaisir d'avancer ensemble,

L'équipe DÉFENDRE du Shift Project

Table des matières :

Introduction	16
Chapitre 1 –	21
Changement climatique et défense, quelles interactions ?	21
I. Le changement climatique comme multiplicateur de risques	22
A. Le changement climatique : quelques éléments de contexte	22
1. Les origines du changement climatique	22
2. Les risques physiques associés	24
B. Instabilités climatiques et conséquences géopolitiques	25
1. Tensions intraétatiques, quelques exemples	26
2. Tensions inter-étatiques, quelques exemples	27
C. Élargissement du périmètre des missions des forces armées	28
1. Une augmentation de la fréquence des interventions de secours d'urgence des populations lors de catastrophes climatiques	28
2. Protection des intérêts stratégiques français à l'international	29
II. Des vulnérabilités systémiques croissantes	30
A. Sur les activités des armées	30
1. Des infrastructures déjà exposées et de plus en plus menacées	30
2. Risques sur le personnel militaire et le maintien en capacité opérationnelle des systèmes d'armes et équipements militaires	31
B. Sur les activités de la BITD	33
1. Les événements climatiques extrêmes parmi les principaux risques de rupture identifiés	33
2. Des projections préoccupantes pour les chaînes de valeur stratégique	34
C. Les enjeux environnementaux pour la défense	35
1. Les émissions de gaz à effet de serre	35
2. Les autres impacts environnementaux	36
3. La prise en compte des enjeux environnementaux par les armées	37
Chapitre 2 –	39
L'énergie, condition de puissance à l'ère de la transition	39
I. L'énergie : condition de la puissance	40
A. La France, une nation en transition, encore fortement dépendante des combustibles fossiles	41
1. Le rôle de l'énergie dans les sociétés thermo-industrielles	41
2. En France, une « exposition énergétique » dominée par les énergies fossiles importées	42
3. Une économie française en mutation	45
B. Le rôle de l'énergie pour les armées	47
1. Les flux énergétiques, conditions fondamentales au fonctionnement des armées	47
2. Un mix énergétique très largement dominé par le pétrole	48
3. Les consommations énergétiques « indirectes » : angle mort du bilan énergétique des armées	51
4. Une tendance : des besoins énergétiques croissants	52
C. L'énergie pour la base industrielle et technologique de défense	53

1. Une industrie structurellement dépendante des flux énergétiques	53
2. Des dépendances énergétiques peu documentées pour la BITD	54
3. Des besoins énergétiques croissants pour la BITD ?	55
II. Dynamiques et transformations énergétiques	56
A. Expérimentations et mesures dans le domaine énergétique	57
B. Des évolutions technologiques aux implications énergétiques difficilement quantifiables	61
1. Dronification et « guerre réseau-centrée » : vers une électrification massive du champ de bataille ?	61
2. Numérisation croissante, intelligence artificielle et data	62
3. Spatial : un essor dimensionnant ?	63
C. La transition énergétique : quels risques et opportunités pour le secteur de la défense ?	63
1. Les risques d'un décrochage du secteur de la défense dans la transition énergétique avec le secteur civil	64
2. Les opportunités d'un engagement actif dans la transition énergétique	67
Chapitre 3 –	70
Matériaux critiques : quels usages, quelles dépendances ?	70
I. Matériaux critiques : de quoi parle-t-on ?	71
A. Définitions et notion de criticité	71
1. La production des matériaux	71
2. L'évaluation de la disponibilité d'un matériau	73
3. Développement de filières industrielles	75
4. Les limites à la production de matériaux et notion de criticité	76
B. Structuration des chaînes de valeur des matériaux critiques	79
II. L'utilisation de matériaux critiques dans le secteur de la défense	84
A. Quelle utilisation des matériaux critiques dans l'industrie de défense ?	84
B. Quels sont les risques d'approvisionnement existants du secteur de la défense ?	89
1. Principaux risques d'approvisionnement identifiés	89
2. Conséquences des défaillances d'approvisionnement	93
C. Reprise en main des chaînes d'approvisionnement : contraintes et leviers pour la défense européenne	94
Conclusion	98
Équipe du programme	102
Parrains du programme	102
Soutiens du programme	103

Edito



Les armées françaises, tant dans leur conception que dans leurs actions, n'échappent pas aux effets du réchauffement climatique ainsi qu'à la dépendance aux énergies fossiles et matières minières dont la France est l'objet.

Aussi, dans un monde en transformation rapide, qui assiste à la radicalisation des postures étatiques comme à la désinhibition du recours à la force, leur liberté de manœuvre et leur capacité opérationnelle, dépendront avant tout, de la possibilité d'accroître leur indépendance à l'égard de certaines ressources.

C'est pour cela que je suis convaincu que DÉFENDRE, qui s'inscrit parfaitement dans ce cadre, apportera une plus value indéniable aux réflexions déjà en cours au sein du ministère des Armées.

**Laurent Lherbette, général de corps d'armée (2S)
et parrain du programme DÉFENDRE**

A propos du Shift Project

The Shift Project est un groupe de réflexion qui vise à éclairer et influencer le débat sur les défis climat-énergie. Nous sommes une association d'intérêt général. Nos membres sont pour la plupart des entreprises. Guidé par l'exigence de rigueur scientifique et technique, notre regard sur l'économie est avant tout physique et systémique. Nous réalisons des études sur les enjeux clés de la décarbonation. Nous constituons des groupes de travail qui produisent des analyses robustes, quantitatives et qualitatives, ainsi que des propositions pragmatiques.

Notre démarche de recherche est ouverte, itérative et collaborative. Nos publications sont librement accessibles à toute personne intéressée. Nous les diffusons auprès des professionnels, dirigeants et corps intermédiaires des secteurs et enjeux concernés. Ce réseau d'experts est mobilisé constamment, pour consolider nos travaux, et nous aider à les faire connaître. Nous favorisons les discussions entre parties prenantes, de manière apaisée.

Le Shift Project a été fondé en 2010 par plusieurs personnalités du monde de l'entreprise ayant une expérience de l'associatif et du public. Il est soutenu par plusieurs grandes entreprises françaises et européennes ainsi que par des organismes publics, des associations d'entreprises et, depuis 2020, par des dizaines de PME, d'ETI et de fondations. Plus rarement il fait appel, comme en 2025 avec la campagne de financement « Décarbonons la France ! » dans lequel ce travail s'inscrit, à des particuliers.

The Shifters est une association loi 1901, d'intérêt général, créée en 2014 pour apporter un soutien bénévole au Shift Project. Initialement conçu comme une structure permettant d'accueillir toute personne souhaitant supporter le Shift dans son travail de recherche, de relais ou de soutien, nous sommes aujourd'hui un mouvement citoyen d'ampleur rassemblant 20 000 Shifters, dont l'ambition est de « faire shifter » la France.

Le Plan robuste pour l'économie française : comment réussir la transition dans l'incertitude ?

Dans ce contexte énergétique et climatique contraint, la réussite de tout projet économique pour la France est conditionnée au succès de la décarbonation : celle-ci redonne de la liberté d'action et devient une condition de notre souveraineté.

Après le Plan de transformation de l'économie française publié en 2022, **le Shift Project franchit aujourd'hui une nouvelle étape avec le Plan robuste pour l'économie française**. Porté par des dizaines de milliers de donateurs, de membres des Shifters et de professionnels engagés, ce travail collectif et inédit par son ampleur vise à structurer des réponses concrètes aux multiples crises contemporaines. Un livre de synthèse, *Le Plan robuste pour l'économie française*, paraîtra le 14 octobre prochain en librairie.

À un an de l'élection présidentielle de 2027, le Shift Project poursuit un objectif clair : donner à la France les moyens de faire face aux crises et reprendre son avenir en main. Réussir cette transition, ce n'est pas seulement réduire nos émissions : c'est sécuriser notre économie, renforcer notre souveraineté et retrouver des marges de manœuvre dans un monde instable. **La décarbonation n'est pas seulement un défi, c'est une opportunité pour la France.**

Du Plan de transformation de l'économie française (PTEF) au Plan robuste pour l'économie française (PREF)

En 2022, le Shift Project présentait son Plan de transformation de l'économie française (PTEF), un ensemble de 15 rapports thématiques et une synthèse proposant des mesures concrètes pour réduire de 5 % par an les émissions de gaz à effet de serre de la France. Cette feuille de route réaliste et chiffrée de notre décarbonation veillait à la cohérence entre l'énergie bas-carbone disponible, les emplois nécessaires et la réduction de nos émissions nationales au bon rythme.

Cependant, notre plan supposait en filigrane un contexte stable et prévisible, sans explorer les risques liés à l'échec partiel ou total de certaines mesures. L'étude « Réussir la transition dans l'incertitude » réinterroge les analyses et recommandations du PTEF à l'aune des probables chocs, perturbations et aléas des 25 prochaines années. Notre objectif est de sécuriser la transition en tenant compte du fait que le monde sera incertain, et que les acteurs français ne pourront pas tout maîtriser dans les décennies à venir.

Notre Plan robuste pour l'économie française est un appel à l'action : subir les crises ou construire son avenir.

Pourquoi un plan robuste ?

La robustesse désigne la capacité d'un système à remplir ses fonctions malgré un certain nombre d'aléas extérieurs. Pour le Shift Project, rendre la décarbonation robuste signifie augmenter les chances qu'elle se réalise malgré les aléas des 25 prochaines années.

« Réussir la transition dans l'incertitude », premier volet du Plan robuste

Le rapport « [Réussir la transition dans l'incertitude](#) » (Avril 2026) présente la vision systémique du Shift et constitue le premier volet du [Plan robuste pour l'économie française](#) (PREF).

Cette analyse plonge au cœur de 20 grands chantiers, ceux sans lesquels la transition bas-carbone ne réussira pas : dans les **transports** (déploiement du vélo, extension des transports en commun, généralisation de la voiture électrique sobre, massification du train, décarbonation de l'aérien via les SAF et réduction du trafic, relance du fret ferroviaire et électrification des camions), le **logement** (rénovation massive et déploiement des pompes à chaleur), le **numérique** (maîtrise des centres de données), l'**industrie** (acier et hydrogène bas-carbone, captage et séquestration de CO₂), l'**agriculture** (réduction sélective des cheptels bovins, gestion durable de l'azote, préservation des puits de carbone naturels) et l'**énergie** (prolongation du nucléaire historique, lancement des EPR2, déploiement accéléré des renouvelables et des bioénergies durables).

Sans être exhaustifs, les chantiers retenus couvrent une large partie des enjeux de décarbonation et illustrent l'ensemble des familles d'actions que la France doit mener et accélérer.

Quels choix face aux incertitudes ?

Une analyse de robustesse pour sécuriser la transition

Nous avons mené une analyse de robustesse imaginant des trajectoires dégradées de décarbonation, pour mieux les éviter. Ces trajectoires chiffrées ont été construites à partir de variantes – en termes d'émissions de GES, de consommation d'énergie, de cuivre et d'emploi - supposant des issues plus ou moins optimistes pour chaque chantier.

La cartographie des possibles obtenue montre que **la France peut encore réussir sa décarbonation à condition d'en faire une priorité absolue dès le prochain quinquennat, et de mener de front tous les chantiers majeurs.** L'électrification massive des équipements est incontournable et demandera une hausse de la production bas-carbone (nucléaire et renouvelables), mais aussi une maîtrise de la consommation énergétique (carburants liquides, gaz, électricité) pour éviter les conflits d'usages, et une transformation profonde des compétences et de l'emploi.

Une démarche collective ancrée dans le réel

Le Shift Project conduit en parallèle une **série de consultations auprès des acteurs directement concernés** — agriculteurs, élus, soignants, professionnels du sport et de la distribution et de la réparation automobile. **Cette approche vise à confronter les analyses**

aux réalités du terrain et à co-construire des trajectoires avec celles et ceux qui auront à les mettre en œuvre.

- La [Grande Consultation des Agriculteurs](#), qui a recueilli près de 7 800 contributions, permettant de faire émerger et porter la voix des agriculteurs dans le débat public.
- La [Grande Consultation des Maires et des élus municipaux](#), qui a recueilli les contributions de plus de 3 000 élus sur le bilan tiré en fin de mandat et les priorités et besoins pour le prochain mandat municipal.
- La [Grande Consultation Santé](#) (en cours), qui s'adresse aux médecins, aux infirmiers et aux pharmaciens en les interrogeant sur le lien entre leur pratique, l'énergie et le climat.
- La Grande consultation des acteurs de la filière aval de l'automobile qui se lancera prochainement.

Par ailleurs, le Shift Project poursuit la publication de travaux sectoriels (alimentation, défense, textile, santé, transports...) jusqu'à 2027. Ces productions s'inscrivent dans une démarche collaborative et ouverte, menée en étroite coopération avec les professionnels concernés, fidèle à la méthode de travail du Shift.

Comité de rédaction

Auteurs

- **Noémie Rebière**, cheffe de projet DÉFENDRE, The Shift Project
- **Alexandre François**, chargé de projet DÉFENDRE, The Shift Project
- **Alan Lemoine**, chargé de projet DÉFENDRE, The Shift Project
- **Louis Ollion**, expert matières premières critiques, co-pilote du Chapitre III *“Matériaux critiques : quels usages, quelles dépendances ?”*
- **Wafa Houhamdi**, experte en ingénierie des matériaux, co-rédactrice du Chapitre III *“Matériaux critiques : quels usages, quelles dépendances ?”*
- **Jean-Noël Geist**, coordinateur du programme DÉFENDRE, The Shift Project
- **Laurent Lherbette**, général de corps d’armée (2S), Armée de l’Air et de l’Espace (AAE)

Relecteurs

Ce travail a bénéficié du soutien de nombreux professionnels du secteur, qui ont contribué bénévolement à sa relecture et à son enrichissement. Nous remercions tout particulièrement les nombreux relecteurs du **ministère des Armées**, dont les noms ne peuvent être cités pour des raisons de confidentialité. Nos remerciements s’adressent notamment à l’équipe projet chargée des relations avec le Shift Project, composée de représentants de SGA/DTIE, de DGA/SASD et de l’EMA/DIEO.

- **Clément A.**
- **Christophe Achte**, lieutenant-colonel (2S), membre du CT Défense des Shifters
- **Guillaume Allart**, ingénieur de projet automobile et mobilités routières, Shift Project
- **Stéphane Audrand**, consultant en risques, historien et officier de réserve
- **Jean-Luc Bataille**, directeur RSE et bas-carbone, Roxel
- **Renaud Bellais**, chief defense economist, MBDA
- **Antonin Berthe**, PhD, expert des enjeux d’approvisionnement en pétrole
- **Yolan Blanchon**, ingénieur d’étude – enjeux matières de la transition écologique
- **Albert Bouffange**, doctorant en sciences économiques, Sciences Po Lyon / Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria) Grenoble-Alpes
- **Rémi Calvet**, ingénieur de projet Industrie, The Shift Project
- **Marjorie Cavarroc Weimer**, PhD, senior expert matériaux et procédés, Safran

- **Guillemette Chevreau**, chercheuse – adjointe au directeur de l'Observatoire « Armée de Terre 2040 », Fondation méditerranéenne d'études stratégiques (FMES)
- **Antoine Christment**, , PhD, professeur agrégé de physique, ministère de l'Éducation nationale
- **Raphaël Danino Perraud**, chercheur associé, IRSEM
- **Claire Dupré**, chargée de projet Cuivre, The Shift Project
- **Lilian Eudier**, responsable des affaires institutionnelles, Safran
- **Jean-Charles Ferré**, général (2S) ancien directeur du Service de l'énergie opérationnelle (SEO), ministère des Armées ; délégué général, Union des stockistes industriels (USI)
- **Nicolas Gourdain**, enseignant-chercheur, ISAE-SUPAERO / Institute for Sustainable Aviation
- **Alice Hefling**, ancienne chargée d'études sur les dépenses au ministère des Armées
- **Anne Jacod**, prospectiviste, ingénieure spécialisée dans le domaine des risques naturels majeurs au ministère de la Transition écologique
- **Sylvain Laviguerie**, chef de projets, Cider Engineering
- Sophie Lefeez, chercheuse associée à l'IRIS
- **Laurent Lherbette**, général de corps d'armée (2S), Armée de l'Air et de l'Espace (AAE)
- **Sylvain Lhuissier**, Vice President International Business Development, Bren-Tronics
- **Annabelle Livet**, chargée de recherche, Fondation pour la recherche stratégique (FRS)
- **Antoine M.**
- **Pierre-Antoine Nougé**, senior manager, AXA
- **Guillaume Sérazin**, enseignant-chercheur, École navale, Institut de Recherche et d'Études navales
- **Émilie Taupin**, officier de réserve, ministère des Armées
- **Jacques Treiner**, chercheur associé, Laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain (LIED) ; président du comité d'experts, The Shift Project
- **Olivier R.**
- **Thibault R.**
- **Julien Villain**, attaché de direction au Secours populaire français
- **Océane Zubeldia**, directrice du domaine armement et économie de défense, Institut de recherche stratégique de l'École militaire (IRSEM)

Remerciements

Nous tenons à remercier le **ministère des Armées** pour son soutien et la confiance accordée à ce travail. Nous exprimons également notre gratitude à l'ensemble des militaires et des agents civils qui ont accepté de nous accorder des entretiens, de partager leur expertise et de nous orienter tout au long de cette étude et dont les noms ne seront pas cités pour des raisons de confidentialité,

Nous adressons par ailleurs nos remerciements au général (2S) **Laurent Lherbette** pour son appui constant. Nous remercions également la **Fondation méditerranéenne d'études stratégiques** (FMES) pour la confiance accordée dans le cadre de l'Observatoire « Armée de Terre 2040 », ainsi que le général de corps d'armée (2S) **Bertrand Toujouse**, responsable du programme, et l'amiral (2S) **Pascal Ausseur**, directeur de la FMES.

Ce rapport introductif a également bénéficié du soutien d'un groupe de *Shifters* du **Cercle Thématique Défense** ainsi que **d'experts du secteur** qui ont accepté de nous accorder de leur temps. Par des entretiens, le partage de leur expertise, l'ouverture de leurs réseaux ou encore leurs retours méthodologiques et leurs relectures du présent rapport, ils ont contribué à enrichir et consolider ce travail. Nous tenons ici à les remercier chaleureusement pour leur disponibilité et leur contribution. Nous adressons également nos remerciements aux nombreux contributeurs qui ont préféré rester anonymes et dont les échanges, remarques et éclairages ont nourri ce travail.

- **Pierre d'Adhémar**, consultant, membre du CT Défense des Shifters
- **Pascal Ausseur**, amiral (2S), Fondation méditerranéenne d'études stratégiques (FMES)
- **Matthieu Auzanneau**, ancien directeur, The Shift Project
- **Baptiste Certain**, ex-Dassault Aviation
- **Mathieu Collet**, chef du bureau environnement – direction Ouest, Service d'infrastructure de la Défense (SID), Rennes
- **Marie-Caroline Debray**, Fondation méditerranéenne d'études stratégiques (FMES)
- **Frédéric Demailly**, chargé de résilience aux risques climatiques, ArianeGroup
- **François Deloumeau**, expert énergie, Arquus
- **Raphaël Danino-Perraud**, chercheur associé, Institut français des relations internationales (IFRI)
- **Ludovic Donati**, directeur projet Lithium Ageli - Alsace Géothermie Lithium, Eramet
- **Hugo Duterne**, économiste énergie-climat, Banque de France
- **Clara Girard**, chargée RSE, COGES Events
- **Jean-François Hardy**, chargé de mission stratégie nationale de résilience, Direction de la protection et de la sécurité de l'État (DPSE), Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale (SGDSN)
- **Alexandre Joly**, responsable du pôle énergie, Carbone 4
- **Guillaume Léger**, métallurgiste, responsable produit chez Lebronze alloys

- **Julia Lemonnier**, responsable des études, RSE et ressources humaines, Groupement des industries françaises de défense et de sécurité terrestres et aéroterrestres (GICAT)
- **Michel Lepetit**, vice-président, The Shift Project
- **Christophe M.**
- **Marie Perrin**, CEO de REEcover
- **Mathieu Picquenard**, directeur de filiale transport STEF, ex-membre du SEO
- **Mateo Mirollo**, consultant spécialiste des politiques énergétiques pour l'aviation
- **Sylvain Nizou**, co-fondateur et président, Hexana
- **Karen Pachot**, directrice ESG du groupe MBDA et présidente de la commission RSE du GICAT
- **Sami Ramdani**, enseignant-chercheur énergie et matières premières, Institut de relations internationales et stratégiques (IRIS)
- **Olivier Schmitt**, professeur, Centre for War Studies, University of Southern Denmark
- **Laure Soulier**, responsable veille et développement, Cider Engineering
- **Julia Tasse**, responsable du programme océan, Institut de relations internationales et stratégiques (IRIS)
- **Christophe Terrien**, responsable performance environnementale et enjeux climat, ArianeGroup
- **Bertrand Toujouse**, général de corps d'armée (2S), Fondation méditerranéenne d'études stratégiques (FMES)

Résumé aux décideurs

La capacité des armées à assurer le mandat confié par la Nation repose sur des capacités matérielles dont la pérennité a longtemps été perçue comme acquise par l'ensemble de la société : disponibilité de l'énergie, accès aux ressources, continuité des chaînes logistiques et robustesse des infrastructures. Dans un monde marqué par le retour de la conflictualité, le changement climatique et l'intensification de la compétition entre Etats (notamment pour l'accès aux ressources stratégiques), la maîtrise de ces dépendances devient une composante à part entière de la puissance militaire d'un Etat, et plus largement de son autonomie stratégique et de sa souveraineté.

Le programme DÉFENDRE, porté par The Shift Project, a pour objectif de quantifier les dépendances énergétiques et matérielles, directes et indirectes¹, puis d'identifier des leviers de transformation pour le secteur de la défense dans son ensemble (armées et base industrielle et technologique de défense) et, *de facto*, de contribuer à retrouver des marges de manœuvre.

Le rapport introductif « *Energies, ressources, climat : une défense sous contraintes physiques* » constitue la première brique du programme DÉFENDRE. Il a vocation à poser un cadre d'analyse général des interactions entre défense, climat, énergie, ressources minérales et grandes transformations contemporaines.

La défense exposée à des contraintes physiques

Les perturbations énergétiques mondiales engendrées par les guerres en Ukraine et au Moyen-Orient, l'aggravation des effets du changement climatique qui accentue les tensions sur les ressources et fragilise des infrastructures civiles dont dépend directement le système de défense, nous rappellent une réalité longtemps sous-estimée. Pour fonctionner, nos sociétés modernes reposent sur des infrastructures critiques et des flux mondialisés d'énergies fossiles, de matières premières et d'équipements industriels. Le secteur de la défense n'y fait pas exception. En effet, derrière chaque système d'armes, chaque capacité opérationnelle et chaque chaîne de soutien se trouvent des énergies, des matériaux, des infrastructures et des chaînes d'approvisionnement. Avec plus de 75% des consommations énergétiques directes reposant sur le pétrole², le ministère des Armées reste fortement dépendant des énergies fossiles importées. A l'aune de la compétition accrue pour l'accès aux ressources, cela constitue à moyen-terme une vulnérabilité stratégique pour les forces armées.

Toutefois, les dépendances les plus critiques ne sont pas nécessairement les plus visibles. Si l'inventaire des consommations directes (carburants pour la mobilité, gaz et électricité sur les emprises etc.) est connu du ministère, le fonctionnement des armées repose également sur un ensemble de consommations indirectes, associées à la fabrication et au maintien des équipements, à l'alimentation des soldats ou encore aux activités de la BITD, qui restent

¹ Les consommations directes correspondent aux ressources utilisées directement par les armées dans leurs activités (carburants, électricité, chauffage, etc.). Les consommations indirectes regroupent les ressources mobilisées en amont par l'ensemble de la chaîne de valeur nécessaire à leur fonctionnement, notamment pour la fabrication des équipements militaires, la construction des infrastructures et les activités de la base industrielle et technologique de défense.

² Stratégie énergétique de défense, Ministère des Armées, 2020.

aujourd'hui peu connues. Or, cette absence de visibilité sur les besoins énergétiques et matériels nécessaires au fonctionnement du secteur dans sa globalité souligne l'importance de développer une lecture systémique. C'est l'un des objectifs du programme DÉFENDRE.

Des évolutions énergétiques et matérielles à quantifier

La transition énergétique constitue une transformation structurelle et profonde de l'ensemble du système économique, industriel et de nos modes de vie. Or, le secteur de la défense dépend structurellement du tissu industriel civil pour ses chaînes d'approvisionnement, ses équipements, ses infrastructures de transport et d'énergie. À mesure que ce tissu se transforme, le secteur militaro-industriel est impacté, qu'il l'ait anticipé ou non.

Le réarmement mondial et les évolutions technologiques actuellement à l'œuvre (drones, robotisation, numérisation des opérations, intelligence artificielle et multiplication des systèmes électroniques) tendent à transformer les besoins et les dépendances du secteur. Dans le même temps, la transition énergétique et la transformation numérique des sociétés entraînent une augmentation rapide de la demande en énergies et matières premières stratégiques, en particulier en minerais critiques. L'Agence internationale de l'énergie prévoit des multiplications des consommations par 2,5 pour le cuivre, par 8 pour le nickel ou 13 pour le lithium. Ces dynamiques génèrent une compétition à l'échelle mondiale, ainsi que des conflits d'usages entre les différents secteurs.

Face à ces évolutions, des questions se posent : comment le secteur de la défense peut-il s'y adapter et en tirer parti ? Quels leviers peut-il actionner, pour quels gains opérationnels et avec quelles ressources ? Comment naviguer dans un environnement de plus en plus marqué par des conflits d'usage sur des ressources énergétiques, minérales et industrielles limitées ?

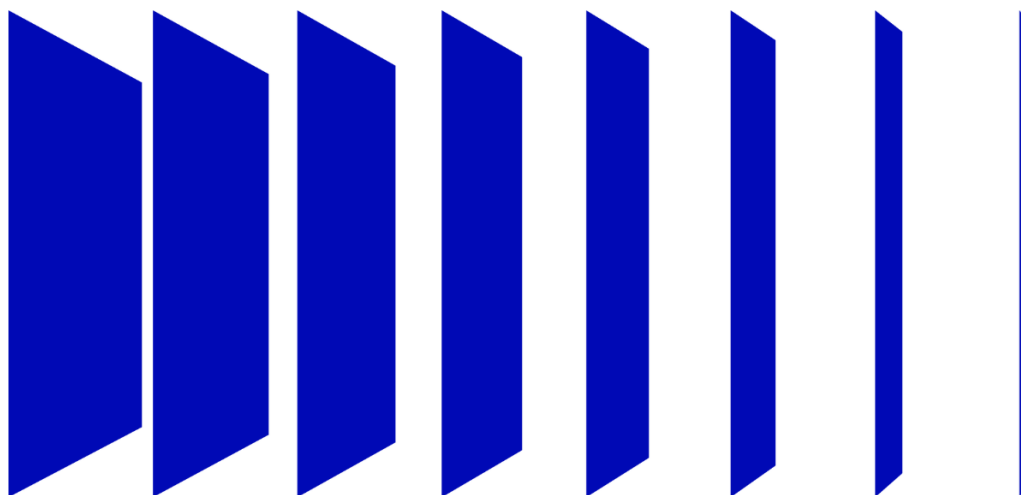
Préserver la liberté d'action dans la durée

Les grands équipements militaires, les infrastructures et les capacités industrielles nécessitent des temps longs de développement et sont conçus pour des durées d'utilisation de plusieurs décennies. Les choix réalisés aujourd'hui déterminent les capacités d'action des armées françaises et européennes à l'horizon 2040, 2050 et au-delà.

Dans ce contexte, les enjeux énergétiques et matériels ne peuvent plus être appréhendés comme des sujets périphériques. Ils touchent aux conditions mêmes de la souveraineté et de la résilience nationale.

Mieux connaître ces dépendances, identifier les vulnérabilités qu'elles génèrent et anticiper les transformations à venir constituent désormais des impératifs stratégiques. Telle est l'ambition du programme DÉFENDRE : contribuer à la préparation des capacités de défense dans un monde où les contraintes physiques redéfinissent les conditions de puissance.

Introduction



Un contexte géopolitique explosif

La période actuelle se caractérise par une forte instabilité, l'accumulation de crises et de chocs³ conduisant à une recomposition profonde des équilibres géostratégiques mondiaux. Pour ne citer que quelques exemples : embrasement du Moyen-Orient et blocage du détroit d'Ormuz – artère majeure du commerce mondial d'hydrocarbures, enlisement de la guerre en Ukraine, intervention américaine au Vénézuéla, guerre commerciale entre la Chine et les Etats-Unis... Dans ce contexte incertain, auquel s'ajoute le dérèglement du système Terre, la question de l'accès aux ressources énergétiques et minérales, facteur de puissance, devient un élément structurant des rivalités géopolitiques.

Depuis le début de la décennie, on assiste à une multiplication et à une intensification des conflits qui provoque une course aux armements à l'échelle mondiale. Selon le *Stockholm International Peace Research Institute* (SIPRI), les dépenses militaires mondiales ont atteint 2 700 milliards de dollars en 2024, marquant une dixième année consécutive de hausse (+9,4 % en termes réels par rapport à 2023)⁴. Au sein de l'Union européenne, celles-ci ont augmenté d'environ 37 % depuis 2015⁵, et les projections pour la période 2025-2028 laissent entrevoir une nouvelle augmentation. Dans le même temps, les États-Unis appellent les membres de l'OTAN à porter leurs dépenses de défense à hauteur de 5 % de leur PIB (dont 1,5% dédiés au renforcement sécuritaire et ne correspondant pas à des dépenses militaires *stricto sensu* : infrastructures critiques, logistique militaire, luttes contre les menaces hybrides incluant la cybersécurité, etc.)⁶.

Cette dynamique s'accompagne d'une compétition accrue entre puissances pour le développement et l'innovation technologique, dont l'intelligence artificielle (IA), qui connaît un développement rapide de ses usages militaires. Ainsi, la course aux armements, la transition énergétique et la transformation numérique des sociétés entraînent une augmentation rapide de la demande en matières premières stratégiques, en particulier en minerais critiques. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), l'atteinte des objectifs climatiques repose sur un déploiement massif à l'échelle mondiale des technologies bas-carbone (véhicules électriques, batteries, éoliennes, panneaux photovoltaïques, réseaux électriques, etc.). Ce déploiement pourrait conduire à un doublement de la demande mondiale de minéraux liés à l'énergie d'ici 2040⁷.

Par ailleurs, le secteur énergétique, ses nœuds logistiques – notamment les infrastructures critiques (points de passage stratégiques, réseaux électriques) et les chaînes d'approvisionnement industrielles dans leur ensemble occupent une place centrale dans les stratégies militaires (guerre en Ukraine, au Moyen-Orient) et géoéconomiques. Leur contrôle demeure un levier de puissance, tandis que leur destruction ou leur sabotage constituent des

³ Dans ce rapport, le terme « choc » désigne une perturbation brutale ou progressive susceptible d'altérer durablement les conditions de fonctionnement d'un système. À la différence d'une crise, généralement perçue comme un épisode temporaire appelant un retour à un état d'équilibre antérieur, un choc peut révéler ou provoquer une transformation structurelle du système concerné. Les tensions énergétiques, climatiques et géopolitiques étudiées ici sont ainsi appréhendées moins comme des crises conjoncturelles que comme des facteurs susceptibles de modifier durablement les conditions d'exercice de la puissance et de la défense.

⁴ SIPRI (Stockholm International Peace Research Institute), "Trends in World Military Expenditure", 2024, SIPRI Fact Sheet, avril 2025.

⁵ Agence européenne de défense (EDA), "Defence Data 2024-2025", Bruxelles, 2025.

⁶ OTAN, "Déclaration du Sommet de La Haye", 25 juin 2025.

⁷ IEA (2021), "The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions", IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

moyens pour fragiliser la stabilité politique et sociale, ainsi que les capacités économiques et militaires d'un adversaire.

Ces évolutions géopolitiques s'inscrivent dans un contexte de dégradation rapide des conditions d'habitabilité de la Terre. L'intensification et la fréquence croissante des événements climatiques extrêmes, ainsi que le dépassement des limites planétaires dans leur ensemble constituent des facteurs supplémentaires de déstabilisation géopolitique, économique et sociétale. Les conflits armés eux-mêmes contribuent à aggraver cette dynamique, notamment par les émissions de gaz à effet de serre associées aux opérations militaires, aux destructions d'infrastructures et aux reconstructions post-conflit. S'y ajoute une remise en question de l'Alliance Atlantique qui a assuré la sécurité européenne depuis la seconde moitié du XX^e siècle. Les débats récents autour de l'engagement des États-Unis dans la défense du continent européen alimentent des incertitudes quant à la pérennité et à la solidité du dispositif de sécurité transatlantique. Dans ce contexte, les États européens apparaissent particulièrement exposés en raison de dépendances structurelles, à la fois énergétiques, industrielles et militaires.

Comment la France et l'Europe peuvent-elles renforcer leur résilience face aux chocs énergétiques, climatiques et géopolitiques et gagner en souveraineté, tant sur le plan énergétique que militaire ? En quoi réduire la dépendance aux énergies fossiles du secteur de la défense pourrait constituer un levier stratégique pour conserver la liberté d'action des forces armées à opérer en toutes circonstances ?

Dans ce contexte de tensions multiples, regagner en souveraineté et en résilience énergétique et militaire devient un enjeu stratégique central pour la France et l'Europe. Leur dépendance aux énergies fossiles les expose à des chocs de plus en plus fréquents. Réduire cette dépendance constitue donc un levier stratégique pour renforcer la liberté d'action des forces armées pour opérer en toutes circonstances, au service de la sécurité européenne et de son influence dans le monde.

Périmètre des travaux

Le programme DÉFENDRE (Défense, Énergies, Durabilité et Résilience) fait le choix d'aborder le système de défense dans son ensemble, en intégrant à la fois les activités militaires et son écosystème industriel et technologique. **Cette approche vise à analyser les dépendances énergétiques et matérielles qui conditionnent le fonctionnement des armées françaises, de leur base industrielle et de leurs chaînes d'approvisionnement, ainsi que les vulnérabilités susceptibles d'affecter leur capacité à opérer dans la durée.**

Le secteur de la défense peut être appréhendé comme un système structuré autour de deux acteurs principaux : d'une part l'institution politico-militaire qu'est le ministère des Armées (MinArm), chargée de la définition et de la mise en œuvre de la politique de défense ; d'autre part, la base industrielle et technologique de défense (BITD), qui comprend les secteurs industriels stratégiques impliqués dans la conception des systèmes d'armes navals, aérospatiaux, terrestres et cyber.

Le ministère des Armées, qui compte environ 270 000 emplois (militaires et civils), est responsable de l'organisation, de l'équipement et de l'emploi des forces armées françaises. Il regroupe notamment l'État-major des armées, qui assure, entre autres, la planification et la

conduite des opérations militaires, ainsi que la Direction Générale de l'Armement, chargée de la préparation et de la conduite des programmes d'armement. La politique de défense française est également structurée par des instruments de planification, tels que la Loi de programmation militaire, qui fixe sur plusieurs années les orientations budgétaires et capacitaires des forces armées.

Le second pilier du système de défense français est constitué par la BITD. Traditionnellement, les industries situées en amont (mines, sidérurgie, chimie de base) ne sont pas comptabilisées dans la BITD, même si elles sont indispensables à celle-ci. La BITD est composée de neuf grands groupes industriels (Airbus, Dassault, ArianeGroup, Safran, Naval Group, KNDS, Thales, MBDA, Arquus) et plus de 4000 PME et ETI représentant environ 220 000 emplois. Elles sont réparties sur plusieurs secteurs d'activités : les domaines techniques (énergie propulsion, métallurgie, composants électroniques, cyber, technologies numériques), et les phases de projets (R&D, fabrication, maintenance). Le fonctionnement de la BITD est intrinsèquement lié aux secteurs civils, il repose sur des chaînes d'approvisionnement complexes impliquant de nombreux sous-traitants, fournisseurs de matériaux, entreprises de maintenance. Les acteurs de BITD entretiennent également des liens avec des établissements publics à caractère industriel et commercial, comme le Centre de l'énergie atomique (CEA) ou l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), ou avec des centres de recherche, comme l'institut franco-allemand de recherche Saint-Louis, et depuis 2021 le centre interdisciplinaire d'études pour la défense et la sécurité (CIEDS).

L'ensemble constitue un écosystème industriel qui contribue à l'équipement des forces françaises, mais également à la capacité d'exportation de la France sur les marchés internationaux de l'armement. Selon le SIPRI, la France a représenté 9,6 % des exportations mondiales d'armes sur la période 2020-2024, derrière les États-Unis (43 %) et devant la Russie (7,8 %)⁸. Elle est ainsi devenue le deuxième exportateur mondial d'armement. Cette position est portée principalement par les ventes de Rafale, de sous-marins, de frégates, de missiles et de systèmes électroniques de défense.

Positionnement du rapport introductif et objectifs du programme DÉFENDRE

Ce rapport introductif intitulé « Energies, ressources, climat : une défense sous contraintes physiques » constitue la première brique du programme de recherche DÉFENDRE porté par le Shift Project. Il a vocation à poser un cadre d'analyse général des interactions entre défense, climat, énergie, ressources minérales et grandes transformations contemporaines.

L'objectif de ce premier travail est d'établir un état de l'art des connaissances nécessaires à l'ouverture d'un champ d'étude encore peu documenté en France : celui des dépendances énergétiques et matérielles des systèmes de défense, dans un monde marqué par le dérèglement climatique et par des tensions croissantes sur les ressources et les chaînes d'approvisionnement. Il ne s'agit pas ici de proposer des leviers opérationnels au secteur de la défense, ni d'apporter des réponses définitives à l'ensemble des enjeux soulevés.

Ce rapport introductif poursuit ainsi un double objectif. D'une part, il vise à documenter les grandes tendances structurelles qui façonnent l'environnement

⁸ SIPRI, "Trends in International Arms Transfers", 2024, Stockholm, mars 2025.

stratégique contemporain : retour des conflits de haute intensité⁹, dépendances aux énergies fossiles, électrification croissante des systèmes militaires et civils, compétition pour les minerais critiques, vulnérabilité des infrastructures énergétiques et industrielles, ou encore impacts géopolitiques du changement climatique. **D'autre part, il cherche à réaliser un état des lieux des connaissances existantes sur les interactions entre défense, climat, énergie et ressources minérales**, afin de poser les bases conceptuelles des futurs travaux du programme DÉFENDRE. Dans cette perspective, ce premier rapport doit être compris comme une introduction destinée à ouvrir un champ de réflexion encore émergent, et à préparer des travaux futurs davantage orientés vers l'analyse quantitative, les scénarios prospectifs et l'identification de solutions concrètes pour le secteur de la défense.

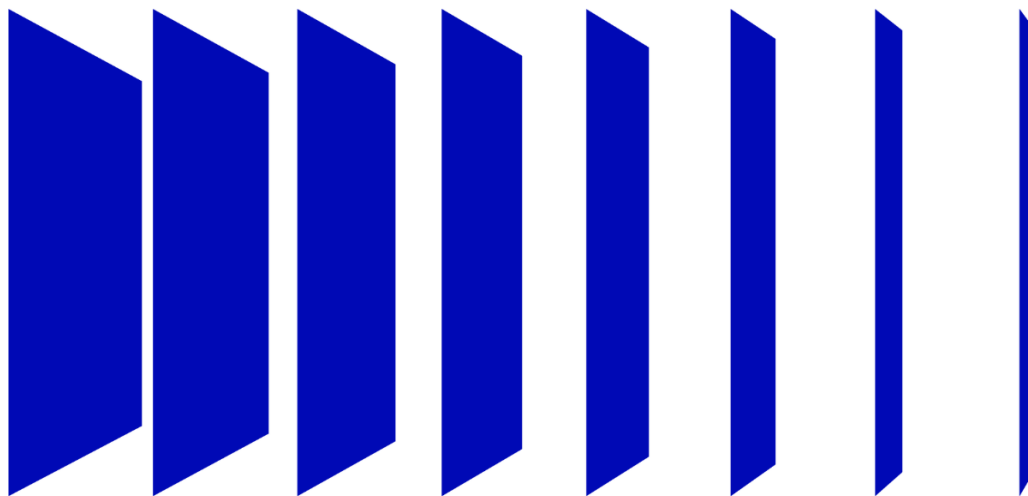
Le changement climatique ainsi que les enjeux environnementaux sont abordés dans ce rapport introductif en tant que facteur de transformation du contexte stratégique global et multiplicateur de risques. Néanmoins, le programme DÉFENDRE n'a pas vocation à travailler sur l'adaptation ni sur les enjeux climatiques et environnementaux. Cela est dû au fait que la littérature académique française et internationale sur les interactions défense et climat est abondante¹⁰. Dans ce contexte, nous avons donc souhaité apporter de la connaissance sur des aspects actuellement moins traités dans les recherches sur le domaine de la défense. Ainsi, le cœur du programme porte sur les contraintes physiques (énergétiques, industrielles et minérales) qui conditionnent la capacité des armées et des industries de défense à fonctionner dans la durée.

L'ambition du programme DÉFENDRE est de mettre en évidence les synergies entre transition énergétique et capacités militaires. Il s'agira d'identifier des leviers de transformation, comme par exemple l'électrification de certains usages, la diversification des approvisionnements, la résilience énergétique des infrastructures militaires, la sécurisation des chaînes de valeur critiques, le développement de carburants alternatifs, l'intégration de solutions low-tech ou encore la relocalisation de certaines capacités industrielles stratégiques. **En effet, l'hypothèse structurante de ces travaux est qu'une meilleure maîtrise des dépendances énergétiques et matérielles constitue un levier de résilience, d'autonomie stratégique et de continuité opérationnelle pour les forces armées et l'industrie de défense françaises.**

⁹ Un conflit de haute intensité désigne une guerre où des États ou de grandes armées s'affrontent avec des moyens militaires importants et sur une longue durée. Contrairement à des opérations limitées ou à des conflits contre des groupes armés peu équipés, ce type de guerre mobilise massivement des soldats, des chars, des avions, des navires, des missiles, des drones et des capacités industrielles.

¹⁰ L'Institut de relations internationales et stratégiques (IRIS) coordonne l'Observatoire Défense et Climat, piloté par la Direction générale des relations internationales et de la stratégie (DGRIS) du ministère des Armées. Cet observatoire constitue l'un des principaux centres d'expertise en France sur la « sécurité climatique ». Ses travaux portent sur l'identification et la cartographie des risques climatiques susceptibles d'affecter la stabilité internationale, l'impact des crises environnementales sur les dynamiques de conflits, ainsi que les implications du changement climatique pour les missions, les capacités et l'adaptation des forces armées. La Fondation pour la Recherche Stratégique (FRS) intègre les risques climatiques dans ses travaux de prospective sur l'adaptation des forces armées et l'évolution de l'environnement stratégique et des conflits. L'Institut français des relations internationales (IFRI), l'Institut du développement durable et des relations internationales (IDDRI) ou encore la Fondation pour la maîtrise des enjeux stratégiques (FMES) participent également à la réflexion stratégique en matière d'enjeux énergétiques et climatiques.

Chapitre 1 – Changement climatique et défense, quelles interactions ?



Le changement climatique occupe désormais une place croissante dans les réflexions stratégiques nationales et internationales. Ses conséquences dépassent les seuls enjeux environnementaux : elles affectent directement les conditions de stabilité politique, les infrastructures, les chaînes d'approvisionnement et les capacités opérationnelles des forces armées. À ce titre, il constitue un facteur supplémentaire de transformation de l'environnement stratégique dans lequel évoluent les armées et les industries de défense.

Ce premier chapitre a pour objectif de poser les principaux constats permettant de comprendre dans quelle mesure le changement climatique peut interagir avec les enjeux de défense, en particulier sous l'angle des vulnérabilités physiques, énergétiques, logistiques et industrielles.

Le cœur du programme DÉFENDRE porte sur l'analyse des dépendances énergétiques et matérielles du système de défense français, ainsi que sur les leviers permettant d'en renforcer la robustesse, la résilience et la capacité à opérer dans un contexte de tensions croissantes sur les ressources, les infrastructures et les chaînes de valeur. **Le changement climatique est ici abordé comme un facteur aggravant et multiplicateur de risques, qui contribue à reconfigurer les contraintes stratégiques auxquelles les armées devront faire face au cours des prochaines décennies.**

« **Le réchauffement [est] un facteur de déstabilisation, un catalyseur de chaos** »

Général Thierry Burkhard, ancien Chef d'Etat-Major des Armées

I. Le changement climatique comme multiplicateur de risques

A. Le changement climatique : quelques éléments de contexte

1. Les origines du changement climatique

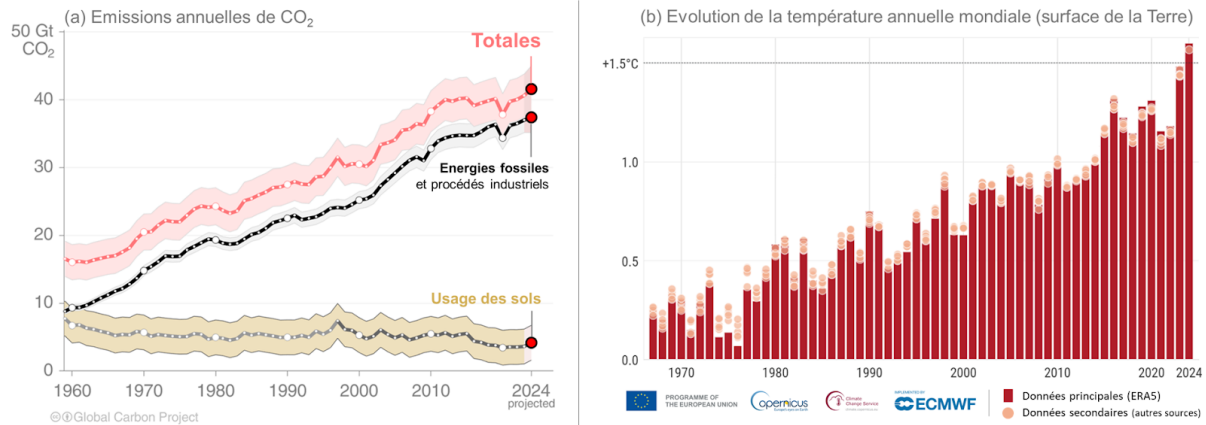
Depuis la révolution industrielle, l'humanité a émis des quantités de gaz à effet de serre (GES) à un rythme sans précédent depuis des millions d'années. Le dioxyde de carbone (CO₂) est le principal GES émis qui s'accumule dans l'atmosphère pour des milliers d'années. Avant la révolution industrielle, la température moyenne à la surface de la Terre était relativement stable depuis plus de 15 000 ans, permettant la sédentarisation et le développement de l'agriculture. Dorénavant, les activités humaines amplifient l'effet de serre naturel, augmentant brusquement la température de la planète avec une modification significative de tout l'équilibre climatique (cycle de l'eau, etc.) et environnemental. L'accumulation des GES dans l'atmosphère conduit à un réchauffement global estimé à 1,3 °C en 2023 par rapport à l'époque préindustrielle. A ce jour, les émissions mondiales de GES continuent de croître, et un réchauffement planétaire de l'ordre de 1,5°C d'ici le début de la décennie 2030 est désormais inéluctable. Ce seuil a déjà été ponctuellement dépassé sur l'année 2024.

Figure 1 - Hausse des émissions de CO₂ et de la température annuelles au niveau mondial**a. A gauche : Hausse des émissions annuelles de CO₂**

Source : Global Carbon Project 2024, traduction par The Shift Project

b. A droite : Hausse de la température moyenne annuelle mondiale à la surface de la Terre, en anomalie par rapport à l'époque préindustrielle

Source : Global Climate Highlight 2024, Copernicus, traduction par The Shift Project



Les émissions globales de gaz à effet de serre se sont élevées en 2024 à un niveau record. Elles peuvent être décomposées en deux catégories :

- 1. Les émissions liées à l'utilisation d'énergies fossiles et aux procédés industriels.** Elles sont les plus importantes et représentent 53 milliards de tonnes de CO₂eq/an¹¹. Les émissions de CO₂ représentent 78% de ces émissions, soit environ 38 milliards de tonnes par an. Ces émissions proviennent principalement de la combustion des énergies fossiles (pétrole, gaz ou charbon), par exemple dans les transports (avions, voitures thermiques), pour le chauffage des bâtiments (au fioul ou gaz) ou pour la production d'électricité dans de nombreux pays encore. Plus marginalement, ces émissions proviennent de procédés industriels, soit par "l'oxydation chimique" des énergies fossiles (par exemple pour le raffinage de l'aluminium), soit par "la décomposition des carbonates" (dans la production de ciment).
- 2. Les émissions liées à l'usage des terres, au changement d'affectation des sols et à la foresterie.** Elles représentent près de 4 milliards de tonnes de CO₂eq/an¹². Ces émissions proviennent de l'agriculture, de la déforestation, de l'artificialisation, etc. Ces activités s'accompagnent d'émissions d'autres gaz à effet de serre comme le méthane, le protoxyde d'azote, etc

¹¹ SERVICE DES DONNÉES ET ÉTUDES STATISTIQUES (SDES), Chiffres clés du climat. France, Europe et Monde. Édition 2025, La Défense, 2025, URL : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-du-climat-france-europe-et-monde-edition-2025?rubrique=&dossier=1381>

L'équivalent dioxyde de carbone (équivalent CO₂) est une mesure métrique utilisée pour comparer les émissions de divers gaz à effet de serre sur la base de leur potentiel de réchauffement global (PRG) , en convertissant les quantités des divers gaz émis en la quantité équivalente de dioxyde de carbone ayant le même potentiel de réchauffement planétaire

¹² CLIMATE CHANCE, Premier rapport annuel de l'Observatoire mondial de l'action climatique non-étatique, Paris, Climate Chance, 2018.

2. Les risques physiques associés

Les risques physiques sont ceux associés aux conséquences du réchauffement climatique : hausse de la fréquence et de l'intensité des extrêmes climatiques (canicules, vagues de chaleur, incendies, inondations, sécheresses, ouragans etc.), élévation du niveau des mers, perturbation du cycle de l'eau et des périodes de gel, changements de régime des vents etc.

Parmi ces événements extrêmes, citons les vagues de chaleur. De plus en plus étendues – du début du mois de juin jusqu'à mi-septembre dans une France à $+2,7^{\circ}\text{C}$ ¹³ – leur longueur et leur fréquence vont augmenter à mesure que le réchauffement climatique s'intensifie en France. Dans une France à $+2,7^{\circ}\text{C}$, la probabilité d'occurrence d'une vague de chaleur au cours de l'été est d'environ 50%, et le nombre de jours de vagues de chaleur est multiplié par 5 par rapport à la référence climatologique calculée sur 1976-2005¹⁴. Ces effets sont déjà ressentis aujourd'hui : depuis 2000, une vague de chaleur se produit quasiment tous les ans, et même deux canicules par an depuis 2015. Avant 1989, c'était un été sur cinq en moyenne¹⁵.

Pour réduire les risques physiques liés au changement climatique, il est essentiel, d'une part, de s'adapter en réduisant l'exposition des populations et leur vulnérabilité, et d'autre part, de minimiser l'ampleur des conséquences physiques par la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Chaque dixième de réchauffement additionnel aggravera ces risques en :

- Menaçant la sécurité alimentaire planétaire (avec la baisse des rendements agricoles sur certaines cultures et zones géographiques)
- Augmentant le stress thermique et hydrique (avec la multiplication de pénuries d'eau et des conflits d'usage), questionnant l'habitabilité de certaines régions et alimentant des déplacements massifs de populations et des instabilités géopolitiques et sociales
- Menaçant la santé publique (avec la migration des vecteurs de maladies, menaçant l'homme et les animaux d'élevage, la hausse de l'incidence de maladies infectieuses, l'exposition croissante aux chaleurs extrêmes, la dégradation de la santé mentale)
- Favorisant des crises humanitaires systémiques, liés à des famines de grande ampleur ou à la submersion de larges parties de littoraux
- Perturbant les activités économiques et leurs localisations, particulièrement les activités de production industrielle et agricole et les chaînes d'approvisionnement
- Mettant sous tension les infrastructures publiques, menacées par la montée des eaux et les inondations, l'érosion des côtes ou encore le retrait-gonflement des argiles. Ces dégradations ont des effets sur l'ensemble des activités des sociétés humaines
- Plus généralement, dégradant les conditions élémentaires de vie des populations.

¹³ $2,7^{\circ}\text{C}$ correspond à l'horizon 2050 de réchauffement prévu par la Trajectoire de Référence d'Adaptation au Changement Climatique (TRACC) sur le territoire hexagonal

¹⁴ MÉTÉO-FRANCE, Changement climatique : quel impact sur les vagues de chaleur, Paris, Météo-France, 2026, URL : <https://meteofrance.com/le-changement-climatique/quel-climat-futur/changement-climatique-quel-impact-sur-les-vagues-de>.

¹⁵ MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE, *Canicule : à quoi s'attendre et comment s'adapter*, Paris, s.d., URL : <https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/dossiers-thematiques/impacts/canicule>.

Ces risques physiques liés au changement climatique se distinguent de beaucoup d'autres risques (juridiques, professionnels, technologiques, etc.), notamment par les aspects suivants :

- Leur caractère global, parfois irréversible, et donc leur ampleur, qui fait d'eux des risques potentiellement systémiques : ils affectent de façon directe et/ou indirecte tous les secteurs de l'économie et sont donc en mesure de déstabiliser le secteur financier et celui des assurances.
- Les incertitudes concernant leur temporalité, la manière de se manifester, leur combinaison. Deux exemples récents en témoignent : les inondations massives ayant frappé Valence en 2024 et nécessité le déploiement d'unités militaires d'urgence, ou encore l'incendie massif du massif des Corbières dans l'Aude en août 2025.
- Le chemin, existant mais très fin, pour limiter ce réchauffement par des actions soutenues de manière cohérente sur le long terme. The Shift Project défend une planification de la décarbonation des activités humaines, rendue possible par une connaissance fine des émissions de gaz à effet de serre de chaque secteur.
- La difficulté croissante à résoudre le problème à mesure que sa résolution est retardée. De nombreux facteurs complexifient la transition autant que le réchauffement continue : le coût matériel croissant des dégâts à court-terme et la fragmentation géopolitique et sociale associée, le difficile passage à l'échelle de certaines technologies avec la limitation des ressources disponibles (combustibles fossiles, minerais, ...), la limite des solutions fondées sur la nature comme la reforestation (par manque d'espace, etc.).

L'impossibilité de raisonner en silo, au risque d'aggraver d'autres enjeux (comme la préservation de la biodiversité) et d'aller vers une « maladaptation » en adoptant des solutions contre-productives à plus long terme (comme la climatisation, génératrice d'îlots de chaleur et d'émissions de gaz à effet de serre sous ses formes actuelles).

Ces risques physiques climatiques ont toujours fait partie intégrante des considérations des armées. Néanmoins, ils tendent à s'intensifier en fréquence comme en magnitude — un phénomène déjà perceptible dans de nombreuses régions du monde — au point d'affecter durablement la sécurité nationale et internationale.

B. Instabilités climatiques et conséquences géopolitiques

Le changement climatique aggrave de nombreux phénomènes naturels et perturbe l'équilibre de régions entières. En amplifiant les catastrophes (sécheresses, inondations, cyclones), en raréfiant des ressources essentielles (eau, terres arables) ou en rendant certaines zones inhabitables une partie de l'année, il fragilise les équilibres sociaux, économiques et politiques sur lesquels repose la sécurité internationale.

Dans un contexte de conflictualité croissante, le changement climatique agit comme un multiplicateur de risques : s'il n'est pas encore en soi générateur direct de conflits, il exacerbe les tensions préexistantes, déstabilise les États et crée les conditions propices à

l'émergence de nouvelles crises. Ce faisant, il élargit mécaniquement le périmètre d'intervention des armées, appelées à opérer dans des environnements physiques dégradés et des contextes géopolitiques plus instables. Le caractère systémique des changements bio-physiques qu'il engendre en fait désormais un axe central pour toute analyse de risque. Le concept de sécurité climatique fait d'ailleurs désormais référence aux effets de la crise climatique sur la paix et la sécurité, en particulier dans les zones fragiles et touchées par des conflits.

« Hormis la guerre nucléaire, le réchauffement du climat causé par l'activité humaine est la plus grande menace pesant sur l'humanité »

Chris Barrie, ancien chef des Forces de Défense de la Royal Australian Navy

1. Tensions intraétatiques, quelques exemples

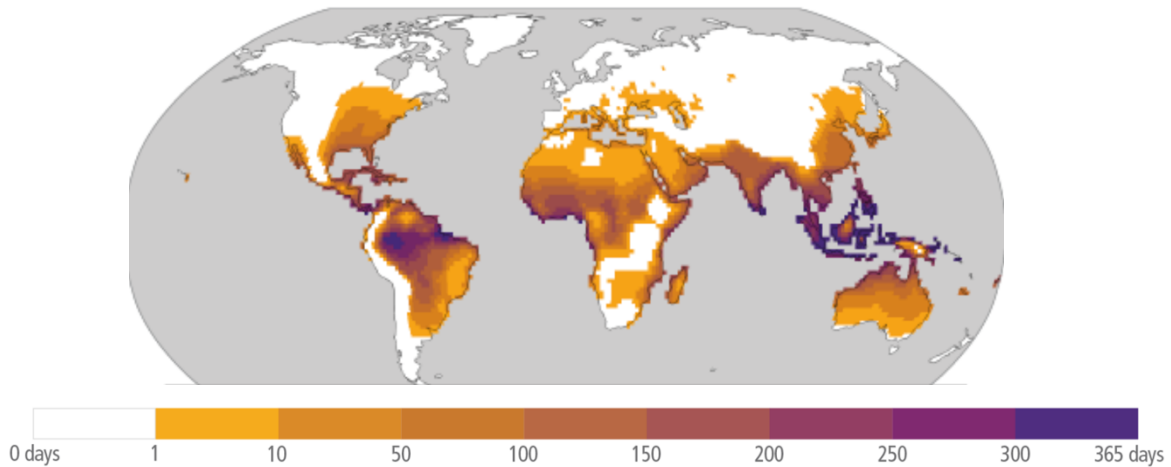
Les difficultés d'exploitation et d'accès à certaines ressources critiques (eau, terres arables, pêche) qui sont renforcées par le changement climatique, créent des conflits d'usage et alimentent des tensions au sein des populations locales¹⁶. Ces conflits prennent racine notamment dans la dégradation et la réduction des terres agricoles disponibles à cause des catastrophes climatiques¹⁷. De façon générale, le changement climatique fait déjà peser des risques importants sur la résilience alimentaire internationale : en 2021, les sécheresses en Éthiopie, au Kenya et en Somalie ont placé 58 millions de personnes dans une situation d'insécurité alimentaire aiguë. Ces risques sont amenés à augmenter avec l'intensification du réchauffement climatique, puisque qu'il est estimé qu'un réchauffement de 2°C de la température mondiale moyenne engendrerait une baisse de 10% à 20% des rendements agricoles de l'Afrique subsaharienne¹⁸.

Au-delà des tensions autour de l'accès aux ressources et des conflits qui en découlent, le GIEC avertit que dans un scénario de réchauffement de 2,4 à 3,1°C (figure 1), plus de la moitié de la population mondiale (54%) résiderait dans des zones aux conditions climatiques potentiellement létales au moins 20 jours par an d'ici 2050. Plus préoccupant encore, près de 10% de la population mondiale actuelle résideraient dans des zones incompatibles avec la survie humaine toute l'année.

¹⁶ The Shift Project a mené ce travail sur l'accès aux ressources locales sur le territoire hexagonal dans son projet Atlas 2050.

¹⁷ FLINTAN, Fiona, NASSEF, Magda, BA, Baba, BA, Boubacer El Hadji, SULIEMAN, Hussein, MOMALE, Saleh et DOMINGO, Pilar, *Causes profondes des conflits entre agriculteurs et éleveurs et leur impact sur les systèmes alimentaires locaux : études de cas au Soudan, au Nigeria et au Mali*, Nairobi, ILRI, 2025.

¹⁸ MUNANG, Richard, « Despite climate change, Africa can feed Africa », Africa Renewal, 18 février 2014, URL : <https://africarenewal.un.org/en/magazine/despote-climate-change-africa-can-feed-africa>



**Figure 2 - Nombre de jours par an supérieur au seuil mortel d'humidité et de chaleur
Scénario 2,4°C – 3,1°C**

Source : GIEC, 2023, Rapport de synthèse du sixième rapport d'évaluation, Figure SPM.3b page 16

Une partie de la France hexagonale serait concernée. Quelques 800 millions de personnes à l'échelle mondiale seraient contraintes de fuir des territoires devenus invivables, alimentant ainsi les flux migratoires. La Banque mondiale estime ainsi que 216 millions de personnes seraient forcées de se déplacer¹⁹. Les populations les plus précaires, qui représentent également les populations les plus exposées au changement climatique, sont et continueront à être les plus affectées par ces conséquences.

Ces bouleversements, par leur impact déstabilisant et profondément inégal sur les populations, contribuent à éroder la légitimité des gouvernements et peuvent offrir aux groupes armés un terreau fertile pour prospérer²⁰. Sans tisser de lien de causalité directe, la conjonction de régimes autoritaires, de privations sociales, d'opportunités économiques limitées et de dégradations environnementales (sécheresses, pénuries d'eau, déclin agricole) constitue un environnement particulièrement propice à l'essor du terrorisme. Les groupes armés exploitent ces fragilités en prenant le contrôle des terres agricoles et des ressources en eau, se substituant ainsi aux États défaillants pour asseoir leur emprise sur les populations²⁰.

2. Tensions inter-étatiques, quelques exemples

Aux échelles nationales et régionales, l'accès aux ressources, notamment hydriques, constitue une source de tensions entre États, et les sécheresses de plus en plus fréquentes renforcent son caractère critique. La construction du grand barrage de la Renaissance (GERD) en Éthiopie, achevée en 2025, est à l'origine de tensions fortes avec ses voisins égyptiens, israéliens et soudanais, qui y voient « une menace existentielle » pour leurs approvisionnements en eau. L'Égypte, dépendante à 96% des eaux du Nil, craint une

¹⁹ VIVIANE CLEMENT, Kanta Kumari Rigaud, Alex de Sherbinin, Bryan Jones, Susana Adamo, Jacob Schewe, Nian Sadiq et Elham Shabahat, *Groundswell Part II : Acting on Internal Climate Migration*, Washington (D.C.), World Bank, 2021. [World Bank – Groundswell Part II report](#)

²⁰ MIDDENDORP, Tom, VAN CAMPEN, Antonie, « Champ libre pour les djihadistes », dans MIDDENDORP, Tom, VAN CAMPEN, Antonie, *Le Général Climat : Intensifier la lutte*, Paris, Éditions La Butineuse, 2023. De la même manière, la longue sécheresse en Syrie entre 2008 et 2011 aurait favorisé le déclenchement des grandes manifestations contre le régime en 2011.

réduction de son apport en eau à cause d'un détournement en Éthiopie, alors que le débit du Nil varie déjà fortement à cause du changement climatique²¹.

Le changement climatique amène également une recomposition des enjeux stratégiques et géopolitiques dans certaines régions. Au niveau du cercle Arctique, le réchauffement rapide – l'Arctique se réchauffe quatre fois plus vite que la moyenne planétaire²². Or la Russie, par exemple, voit en la fonte de l'Arctique l'ouverture d'une multitude de possibilités : nouvelles routes commerciales dans la région située entre la Chine et l'Europe, dégel de la mer de Barents qui offre un accès libre aux océans toute l'année²³. Elle a d'ailleurs lancé un programme de modernisation militaire dans la région, avec la construction de nouvelles bases le long des 6 000 km de sa côte Nord. L'attrait américain récent pour le Groenland s'inscrit dans cette même dynamique.

C. Élargissement du périmètre des missions des forces armées

Le changement climatique élargit progressivement le périmètre d'action des armées. La multiplication des catastrophes naturelles, les tensions croissantes autour des ressources et l'ouverture de nouvelles zones stratégiques peuvent augmenter les besoins d'intervention des forces armées, sur le territoire national comme à l'international.

1. Une augmentation de la fréquence des interventions de secours d'urgence des populations lors de catastrophes climatiques

Les effets physiques du changement climatique, tels qu'examinés précédemment : multiplication en nombre et intensité des sécheresses, ouragans, inondations, feux de forêts et vague de chaleur affectent directement la sécurité des populations dans ses dimensions les plus fondamentales : sécurité alimentaire, stabilité sociétale, secours et protection physique des populations lors d'événements extrêmes. Lorsque les moyens civils sont jugés inexistantes, insuffisants, inadaptés ou indisponibles, règle dite des « 4i », les armées sont sollicitées en complément des forces de sécurité civile, sur le territoire national comme à l'étranger. Ces missions, désignées par l'acronyme HADR (*Humanitarian Assistance and Disaster Relief*), sont mécaniquement amenées à croître à mesure que se multiplient les catastrophes climatiques.

Pour illustrer ce propos, l'Observatoire Défense et Climat rattaché à la DGRIS a mené un travail de recensement des HADR des forces armées en réponse à des catastrophes climatiques et en appui aux forces de sécurité civile, entre 2007 et 2023²⁴. Ce travail montre

²¹ Reporterre, « Sur le Nil, le mégabarrage de la discorde », Reporterre, 11 septembre 2025, URL : <https://reporterre.net/Sur-le-Nil-le-megabarrage-de-la-discorde> et CNES, « Éthiopie, Soudan, Égypte : barrage de la Renaissance sur le Nil bleu, entre développement énergétique et tensions », CNES GEOimage, s.d., URL : <https://cnes.fr/geoimage/ethiopie-soudan-egypte-barrage-de-renaissance-nil-bleu-entre-developpement-energetique-tensions>.

²² RANTANEN, Mika, KARPECHKO, Alexey Yu., LIPPONEN, Antti et al., « The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 », *Communications Earth & Environment*, vol. 3, n° 168, 2022, DOI : <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>.

²³ MIDDENDORP, Tom, VAN CAMPEN, Antonie, « Partie de Stratego dans le cercle Arctique », dans MIDDENDORP, Tom, VAN CAMPEN, Antonie, *Le Général Climat : Intensifier la lutte*, Paris, Éditions La Butineuse, 2023

²⁴ Marine de Guglielmo Weber, Éléonore Duffau et Clarisse Van den Bossche, « Interventions de secours d'urgence en réponse aux catastrophes climatiques : quel rôle et quels enjeux pour les forces armées françaises ? », Observatoire Défense & Climat, 21 juin 2024, URL : <https://www.iris-france.org/187259-interventions-de-secours-durgence-en-reponse-aux-catastrophes-climatiques-quel-role-et-quels-enjeux-pour-les-forces-armees-francaises-2/>.

une augmentation du nombre des HADR sur cette période, avec par exemple l'élargissement en 2023 à l'ensemble du territoire hexagonal d'Héphaïstos, l'opération militaire annuelle de lutte contre les feux de forêts. Dans ce même contexte, le 4^e régiment d'instruction et d'intervention de la sécurité civile (4^e RIISC) – unité du génie basée à Libourne et rattachée à la brigade des militaires de la sécurité civile – a été créé en 2024 en réaction aux feux de forêt ayant affecté la Gironde en 2022. Enfin, le passage du cyclone tropical Chido sur Mayotte le 14 décembre 2024, le plus intense connu par l'île depuis 90 ans (rafales atteignant 250 km/h, 39 morts, près de 800 millions d'euros de dégâts), a donné lieu à l'une des opérations HADR les plus importantes conduites récemment par les armées françaises.

Si le contrat opérationnel des armées était amené à les intégrer de plus en plus, ces interventions pourraient élargir le périmètre d'action des armées et la nature de leurs missions faisant peser un risque de suractivité : sur-sollicitation des soldats, indisponibilité de certains matériels ou encore usure prématurée des pièces. Comme le souligne le général Tom Middendorp, ancien chef d'état-major des armées néerlandaises, l'aide d'urgence, qui constituait historiquement une mission secondaire, est appelée à représenter une part croissante de l'activité militaire. Cette problématique est encore plus aiguë dans les territoires ultramarins, particulièrement situés dans la bande intertropicale et donc structurellement exposés aux cyclones tropicaux. Les capacités des forces armées permettent un déploiement rapide dans ces territoires, à l'aide notamment d'aéronefs A400M ou de porte-hélicoptères amphibies. Au-delà de l'enjeu capacitaire, l'essor des HADR soulève une question de soutenabilité énergétique et matérielle : ces opérations, très dépendantes de vecteurs fortement consommateurs de carburants (avions stratégiques, hélicoptères, navires de projection), reposent sur l'accès aux hydrocarbures et sur des chaînes logistiques résilientes. Leur conduite dans la durée pourrait ainsi être prise entre deux dynamiques croisées : une pression climatique qui accroît la demande d'intervention et une pression sur les ressources énergétiques et industrielles qui limite les moyens disponibles.

2. Protection des intérêts stratégiques français à l'international

Au-delà de la protection du territoire national, le changement climatique élargit également le périmètre d'intervention des armées françaises à l'international. Elles peuvent être engagées en soutien de pays étrangers déstabilisés par des tensions renforcées par le changement climatique, mais aussi pour DÉFENDRE les intérêts français dans des zones fragilisées. Ainsi, depuis 2008, l'opération Atalante, coordonnée par la France et engageant plusieurs pays européens, vise à lutter contre l'insécurité et la piraterie dans le golfe d'Aden, au large de la Somalie. En réchauffant les eaux et en déplaçant les bancs de poissons, le changement climatique aggrave la situation dans une région déjà marquée par la pauvreté et l'insécurité alimentaire, où la pêche illicite et la piraterie se développent sur fond de pauvreté et insécurité alimentaire.

De manière plus générale, l'intensification des tensions autour des ressources naturelles, notamment halieutiques, accroît le besoin de surveiller et de DÉFENDRE les Zones Économiques Exclusives françaises (ZEE) contre la pêche illégale, non déclarée et non réglementée (INN), que ce soit en eaux européennes ou dans les ZEE ultramarines, vastes et particulièrement exposées à ces pressions. C'est par exemple l'objectif de l'opération Mokarran lancée en février 2026 par les forces armées en Guyane (FAG).

Enfin, le réchauffement climatique renforce paradoxalement l'importance des capacités d'action en milieu grand froid pour les armées françaises. Dans ce contexte, la France développe progressivement ses capacités d'action en environnement polaire, notamment via sa participation aux exercices de l'OTAN en milieu grand froid. Cette montée en puissance s'est notamment illustrée en 2026 par le déploiement de chasseurs alpins au Groenland dans le cadre de l'opération Endurance Arctique²⁵. L'École militaire de haute montagne a également intégré un module spécifique dédié au combat arctique dans ses cursus²⁶.

Le changement climatique ne constitue pas uniquement un facteur de déstabilisation environnementale, il agit également comme un facteur de recomposition géostratégique. En transformant certaines régions, comme l'Arctique en nouveaux espaces de compétition entre puissances, et en accentuant les tensions autour des ressources et des routes stratégiques, **il modifie progressivement les zones dans lesquelles les armées françaises doivent être capables d'intervenir, de projeter des forces et de DÉFENDRE les intérêts stratégiques nationaux.**

II. Des vulnérabilités systémiques croissantes

Cette partie vise à analyser les risques que le changement climatique fait peser sur les activités du secteur de la défense. Il convient toutefois de rappeler que ces risques ne se limitent pas au seul ministère des Armées et à la BITD. **Ils affectent plus largement l'ensemble des systèmes économiques, industriels, énergétiques et logistiques dont dépend le fonctionnement des sociétés contemporaines, au sein desquels les armées sont structurellement imbriquées.**

A. Sur les activités des armées

1. Des infrastructures déjà exposées et de plus en plus menacées

Un rapport du Pentagone de 2019 se penchant sur les vulnérabilités des infrastructures militaires américaines démontre que deux tiers des infrastructures militaires américaines étudiées²⁷ sont exposées à des risques d'inondations récurrentes, et la moitié à des risques de sécheresse extrême. La base navale de Norfolk, plus grande base navale du monde, est déjà sujette à des inondations récurrentes, presque annuelles. La ville entière, incluant la base militaire, fait l'objet d'un plan de protection contre la montée des eaux à hauteur de 2,6 milliards de dollars.

²⁵ LE POINT, « Chasseurs alpins et forces spéciales : l'élite française du "grand froid" déployée au Groenland », Le Point, 18 janvier 2026, URL : <https://www.lepoint.fr/monde/chasseurs-alpins-et-forces-speciales-lelite-francaise-du-grand-froid-deployee-au-groenland-IC5OB AH6TBHLBFUMKXLS5NKYMQ/>.

L'Observatoire de l'Arctique publie également de nombreuses études sur la région.

²⁶ Julia Tasse (dir.), « L'adaptation des armées françaises face aux milieux grand froid », dans *Sur le front climatique*, podcast de l'Observatoire Défense & Climat, épisode avec le colonel Gaëtan Dubois, date de diffusion : 27 avril 2026, durée : 45 min, URL : <https://podcast.ausha.co/sur-le-front-climatique/ladaptation-des-armees-francaises-face-aux-milieux-grand-froid>

²⁷ DEPARTMENT OF DEFENSE, Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition and Sustainment, *Report on Effects of a Changing Climate to the Department of Defense*, Washington (D.C.), U.S. Department of Defense, janvier 2019. Le *Department of Defense* américain s'est concentré sur 79 emprises militaires jugées prioritaires pour la sécurité des missions, en fonction de leur rôle opérationnel

Les emprises militaires accusent d'ores et déjà des dégâts significatifs — matériels, économiques et opérationnels — dont l'ampleur est appelée à croître avec l'intensification du changement climatique. L'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (Onerc) a ainsi calculé que la montée des eaux d'un mètre²⁸ submergerait plus de 15 500 km de routes communales, 4 300 km de routes départementales, près de 2 000 km de voies ferrées, ainsi que de nombreuses centrales électriques, aéroports et bases militaires littorales. Comme le souligne Alexandre Magnan, chercheur à l'IDDRI et cosignataire du rapport du GIEC, « *sans mesures d'adaptation fortes, les littoraux situés à moins de 10 mètres d'altitude s'exposent à des niveaux de risques élevés, qu'il s'agisse de pays développés ou en développement*²⁹ ».

Face à ces constats, des politiques d'adaptation infrastructurelle sont mises en place : le poste de commandement de la caserne lieutenant-colonel Broche en Polynésie française, conçu aux normes anticycloniques, en constitue une illustration encourageante, qui devra être généralisée à l'ensemble des territoires ultramarins.

Le changement climatique affecte ainsi directement la disponibilité des infrastructures militaires, la continuité des opérations et la capacité des armées à soutenir durablement leurs activités.

2. Risques sur le personnel militaire et le maintien en capacité opérationnelle des systèmes d'armes et équipements militaires

• Risques sur le personnel militaire

La littérature scientifique regorge de documents illustrant l'impact du changement climatique sur la santé humaine, et sur l'exposition accrue à des risques sanitaires³⁰.

Des risques sanitaires documentés tels que les coups de chaleur d'exercice (en entraînement ou en opération) pourraient devenir plus fréquents et menacer la santé du personnel militaire³¹. S'ajoute à cela la question du bien-être et de la santé mentale des soldats soumis à des conditions climatiques extrêmes. L'institut de recherche biomédicale des armées (IRBA) rattaché au Service de santé des armées (SSA) mène des recherches sur les conséquences physiologiques des engagements en milieu grand chaud et grand froid.

La stratégie Climat et Défense du ministère des Armées souligne l'émergence de nouveaux risques sanitaires pour les troupes, liés à l'extension géographique de maladies vectorielles (dengue, chikungunya, Zika) portées par le moustique tigre, dont l'aire d'implantation s'étend à mesure que le climat se réchauffe.

²⁸ QUAAS, Johannes, ANDREWS, Timothy, BELLOUIN, Nicolas et al., « Adjustments to climate perturbations—mechanisms, implications, observational constraints », AGU Advances, vol. 5, 2024, URL : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2023EF003550> dans lequel l'ensemble des scénarios 2300 prévoient un dépassement large du mètre

²⁹ Aurore Coulaud, Aude Massiot, « Montée des eaux : la France littoralement menacée », Libération, 25 septembre 2019, URL : https://www.liberation.fr/france/2019/09/25/montee-des-eaux-la-france-littoralement-menacee_1753621/.

³⁰ IPCC, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report*, Genève, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2022.

³¹ Marc Gozlan, « Coup de chaleur d'exercice en milieu militaire : un cas de survie avec une température centrale à 44,3 °C », Le Monde, 8 août 2025, URL : <https://www.lemonde.fr/realites-biomedicales/article/2025/08/08/coup-de-chaleur-d-exercice-en-milieu-militaire-un-cas-de-survie-avec-une-temperature-centrale-a-44-3-c>.

- **Risques pour le maintien en condition opérationnelle des systèmes d'armes**

Les équipements et les systèmes d'armes voient également leur performance diminuer, leur longévité se réduire et leur maintien en capacité opérationnelle se complexifier. Ces phénomènes sont pour beaucoup d'entre eux documentés et déjà expérimentés, et alimentent des programmes de recherche et développement au sein des armées pour adapter les systèmes d'armes aux théâtres de demain. Pour illustrer ces conséquences sur les trois armées, quelques exemples non-exhaustifs ci-dessous :

- **Marine** : Les évolutions physico-chimiques des océans accélèrent l'accumulation de micro-organismes sur les coques – ce qui augmente la résistance à l'avancement des navires, accroissent leur consommation énergétique et augmentent la fréquence des arrêts à quai pour maintenance. Par ailleurs, le réchauffement des océans modifie l'intensité des signaux acoustiques émis par les sous-marins, pouvant entraîner des difficultés dans la lutte anti sous-marine, ou la cartographie des fonds marins.
- **Armée de l'air** : La densité de l'air diminue lorsque la température augmente, dégradant les performances des aéronefs à toutes les phases de vol, réduisant les capacités d'emport et allongeant les distances de décollage. Le ministère des Armées mène des études avec l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA) pour comprendre les limitations technologiques de 3 hélicoptères différents soumis à des chaleurs extrêmes pendant plusieurs jours – jusqu'à 57°C, température probable au Moyen-Orient.
- **Armée de terre** : L'intensification des crues réduit les capacités de franchissement à gué des véhicules terrestres en raison de l'inondation des prises d'air moteur et de la vulnérabilité des composants électroniques aux infiltrations d'eau. Des RETEX, notamment au Mali, rapportent plusieurs immobilisations de véhicules, alimentant les réflexions sur une augmentation de leur hauteur afin d'améliorer leurs capacités de franchissement³². Par ailleurs, l'accroissement des amplitudes thermiques journalières sur certains théâtres d'opération favorise la condensation dans les réservoirs de carburant, pouvant entraîner le développement de micro-organismes susceptibles d'obstruer les filtres moteur.
- Plus largement, les systèmes d'armes intégrant des missiles, conçus selon d'anciennes spécifications environnementales définies sans véritables prises en compte du changement climatique, pourraient voir leur fiabilité et leur performance (voire leur durée de vie) affectées par les conditions d'emploi futures³³, notamment sur leurs composantes électroniques croissantes. Enfin, l'intensification des événements climatiques extrêmes complique la planification et le soutien des opérations militaires en réduisant les fenêtres météorologiques favorables, en perturbant les transports et en fragilisant les infrastructures logistiques.

³² Entretien avec expert du secteur

³³ Entretien avec expert industriel du secteur

Encadré 1 – Stratégie Climat et Défense du ministère des Armées

En avril 2022, dans le prolongement de la déclaration conjointe des ministres de la Défense « Changement climatique et forces armées », adoptée au Forum de Paris sur la paix en novembre 2021 et désormais soutenue par 26 États, l'État-major des armées a présenté à la ministre des Armées une stratégie globale Climat & Défense. Celle-ci s'inscrit à la fois dans le cadre des stratégies climat de l'Union européenne et de l'OTAN, et sous le chapeau de la stratégie ministérielle de défense durable, qui se décline en six volets : climat, énergie, eau, déchets, préservation de la biodiversité, pollutions et nuisances.

Pilotée par le Secrétariat permanent Climat & Défense (SPCD) et placée sous la responsabilité du Major général des Armées, cette stratégie vise à renforcer la connaissance des effets du changement climatique sur la sécurité internationale, sur les activités du ministère et sur les capacités opérationnelles, à adapter durablement l'outil de défense à ces évolutions, et à consolider la contribution du ministère aux efforts de transition écologique.

Sa mise en œuvre repose sur cinq ateliers structurants :

- « **Conflictualité et emploi des forces** », chargé notamment d'élaborer la feuille de route d'adaptation des armées au changement climatique ;
- « **Capacitaire et innovation** », afin d'intégrer les évolutions climatiques des théâtres d'opération dans la conception des capacités, en s'appuyant notamment sur la TRACC et les scénarios du GIEC, et sur des partenariats de recherche académiques et institutionnels, avec l'ONERA, Météo-France, le Cerema etc. ;
- « **Résilience des infrastructures** » pour évaluer exposition et vulnérabilité des emprises et installations du ministère et les adapter durablement ;
- « **Normes et environnement** », consacré à la veille réglementaire, à l'intégration des législations environnementales, à la transposition des textes européens dans les activités du ministère, et qui rend compte de l'obtention, lorsque nécessaire, des dérogations indispensables à la continuité opérationnelle ;
- « **Coopération internationale** », centré sur l'analyse prospective des risques sécuritaires et la coordination avec les partenaires étrangers.

Cette dynamique repose également sur un important effort de diffusion des connaissances au sein du ministère, via l'ensemble des activités (conférences, études, notes, séminaires) et coopérations au niveau national (entreprises, recherche) et international (UE, OTAN) du SPCD et sur l'Observatoire Défense & Climat (DGRIS).

B. Sur les activités de la BITD

1. Les événements climatiques extrêmes parmi les principaux risques de rupture identifiés

À la suite du passage de l'ouragan Maria en 2017, le site industriel de Lockheed Martin à Porto Rico a été contraint de fermer pendant plus d'un mois, interrompant les activités de production et affectant les délais de livraison.³⁴ Ces risques affectent également déjà les entreprises de la BITD françaises, puisqu'un fort épisode de grêle en 2022 sur le site

³⁴ LOCKHEED MARTIN CORPORATION, *Climate Change 2022* (CDP Climate Change Response / Sustainability disclosure), Bethesda (MD), Lockheed Martin Corporation, 2022, URL : <https://sustainability.lockheedmartin.com/sustainability/content/2022/2022-cdp-climate-change-report.pdf>.

d'ArianeGroup de production du propergol pour leur missile M51 à Saint-Médard-en-Jalles a entraîné l'arrêt de ses activités pendant plus d'un an³⁵.

Au-delà de ces perturbations déjà constatées, les données disponibles montrent que la vulnérabilité des industries de défense face au changement climatique s'inscrit dans une tendance plus large et systémique affectant l'ensemble des chaînes de valeur internationale. Les analyses de gestion des risques sectoriels placent désormais les événements climatiques extrêmes parmi les menaces majeures pesant sur la continuité des sites industriels du secteur. Selon les évaluations publiées par le cabinet d'analyse de risque Resilinc, les catastrophes naturelles figurent parmi les cinq principaux facteurs de rupture des chaînes de valeur et de perturbation des activités industrielles de la défense à l'échelle mondiale³⁶.

Par ailleurs, les données sectorielles font état d'une augmentation de 35 % des perturbations liées aux événements climatiques entre 2023 et 2024 pour les industries internationales de l'aéronautique et de la défense³⁶.

Les événements climatiques extrêmes constituent désormais un risque industriel majeur pour la BITD, au même titre que les tensions géopolitiques, les cyberattaques ou les ruptures d'approvisionnement critiques.

2. Des projections préoccupantes pour les chaînes de valeur stratégique

Les industries de défense reposent sur des chaînes de valeur hautement spécialisées, mondialisées et concentrées autour d'un nombre limité de fournisseurs. Cette configuration accroît leur vulnérabilité aux chocs climatiques localisés. Au-delà des coûts directs de réparation, ces perturbations engendrent des retards de production, une désorganisation des chaînes logistiques et une augmentation des primes d'assurance, affectant la compétitivité globale des entreprises concernées.

Un exemple révélateur concerne les semi-conducteurs, composants essentiels d'un large éventail d'équipements de défense (systèmes de guidage, capteurs, communications sécurisées, systèmes embarqués, etc.). En 2020, une sécheresse majeure à Taïwan a affecté la production de micro-puces, fortement dépendante de l'accès à l'eau³⁷. Or, de nombreux industriels aéronautiques et de défense — dont Airbus — dépendent des semi-conducteurs produits par TSMC (*Taiwan Semiconductor Manufacturing Company*). La réduction des capacités de production taïwanaises a contribué à des tensions d'approvisionnement et à un ralentissement des cadences industrielles. Et les projections renforcent ce constat. Selon une analyse de McKinsey & Company, la probabilité d'ouragans d'intensité suffisante pour perturber significativement les chaînes de valeur des semi-conducteurs pourrait doubler, voire quadrupler, d'ici 2040³⁸.

³⁵ Denis Lherm, « Gironde : le site secret-défense d'ArianeGroup toujours au ralenti depuis la grêle du 20 juin », Sud Ouest, 2023, URL : <https://www.sudouest.fr/economie/gironde-le-site-secret-defense-d-arianegroup-toujours-au-ralenti-depuis-la-grêle-du-20-juin-1211631.php>.

³⁶ RESILINC, « Aerospace and Defense Supply Chain Challenges », Resilinc Blog, s.d., URL : <https://resilinc.ai/blog/aerospace-and-defense-supply-chain-challenges/>.

³⁷ MSCI, « How Climate Change Affected Thirsty Chipmakers », MSCI Research & Insights, 9 novembre 2021, URL : <https://www.msci.com/research-and-insights/blog-post/how-climate-change-affected-thirsty-chipmakers>.

³⁸ MCKINSEY & COMPANY, « Could climate become the weak link in your supply chain? », McKinsey Sustainability / McKinsey Global Institute, 6 août 2020, URL : <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/could-climate-become-the-weak-link-in-your-supply-chain>.

Le caractère systémique du risque réside précisément dans les interdépendances des chaînes de valeur de la défense : une perturbation localisée dans un segment très spécialisé peut générer des conséquences globales, affectant simultanément plusieurs programmes industriels et plusieurs États.

Enfin, les risques climatiques peuvent, dans certains cas, remettre en cause l'assurabilité de certains contrats en raison de l'aléa climatique. C'est pourquoi plusieurs industriels plaident, notamment auprès de la DGA, pour l'intégration explicite de cette notion dans les contrats, afin de mieux se protéger contre une partie de ces vulnérabilités³⁹. D'autant plus que les contrats d'armement s'étendent généralement sur plusieurs années, voire plusieurs décennies, ce qui complexifie largement l'intégration de politiques d'adaptation ou d'atténuation une fois les accords passés.

C. Les enjeux environnementaux pour la défense

Les développements précédents ont montré que le changement climatique affecte directement les capacités opérationnelles des armées, les infrastructures militaires et les chaînes de valeur industrielle de défense. **Il convient également d'examiner la relation inverse : celle des impacts environnementaux générés par les activités militaires et industrielles de défense, ainsi que la manière dont ces enjeux sont progressivement intégrés par les acteurs du secteur.**

Rappelons que ni la question climatique, ni celle de ces autres impacts environnementaux, ne feront l'objet des travaux suivants du programme DÉFENDRE.

1. Les émissions de gaz à effet de serre

De manière générale, la quantification et la déclaration des émissions de gaz à effet de serre des armées reposent encore largement sur des démarches volontaires, ce qui complexifie le recensement et la comparaison internationale des émissions liées à leurs activités.

Une étude de *The Conflict and Environment Observatory* indique que les forces armées mondiales et leurs chaînes d'approvisionnement généreraient environ 2750 millions de tonnes CO₂eq (équivalent CO₂), ce qui représenterait environ 5,5 % à 6 % des émissions mondiales³⁰. Le périmètre de l'étude englobe les activités opérationnelles dites « stationnaires » (les émissions liées aux activités des emprises) et les émissions opérationnelles de mobilités (aéronefs, véhicules terrestres, marine, espace) ainsi qu'une évaluation des émissions liées à l'amont des chaînes de valeur. Si la méthodologie – notamment l'extrapolation des résultats de quelques pays à l'ensemble des armées mondiales – et la fiabilité des résultats sont limitées par le manque de transparence des données d'émissions militaires, elle permet d'illustrer l'importance des volumes d'émissions du secteur.

Dans un contexte de réarmement accéléré à l'échelle internationale qui se traduit par une hausse des dépenses militaires, ces niveaux d'émissions sont appelés à croître. La littérature scientifique met en évidence une corrélation entre le niveau de militarisation et les émissions de gaz à effet de serre :

³⁹ Entretien auprès d'un acteur de la BITD

- Émissions directes liées à la consommation de carburants des équipements (de combat ou non), à la consommation d'énergie pour le chauffage sur les emprises militaires etc.
- Émissions indirectes liées aux consommations d'énergie tout au long des chaînes d'approvisionnement industrielles militaires et duales, aux consommations d'énergies des secteurs fournissant des services à la défense – cybersécurité, centres de données, logistique
- Émissions comptabilisées depuis peu : destruction de puits de carbone par certains conflits (forêts), émissions liées aux destructions d'infrastructures énergétiques fossiles, ou encore aux reconstructions post-conflit

Dans ce contexte, bien que les niveaux d'incertitude demeurent élevés et que les études sur le sujet peinent à converger, une augmentation généralisée des dépenses de défense entraînerait très probablement une hausse des émissions de GES.

L'impact climatique des forces armées ne s'arrête pas à leurs activités opérationnelles en temps de paix, mais se doit d'intégrer les émissions engendrées par les conflits armés. La prise en compte de leur empreinte constitue cependant un sujet éthiquement sensible. Analyser une guerre à travers ses émissions de gaz à effet de serre ne saurait résumer l'ampleur de ses conséquences humaines, sociales, matérielles et sanitaires, ni relativiser les souffrances qu'elle engendre ; il s'agit d'une dimension parmi d'autres de ses impacts. En mai 2024, des études ont estimé qu'au moins 175 millions de tonnes de CO₂ avaient été émises par la guerre en Ukraine, depuis février 2022. Ces émissions ont des origines très variées, allant des émissions liées directement aux activités de guerre, aux reconstructions massives des infrastructures détruites, aux incendies, aux migrations forcées ou encore aux détours forcés d'une large partie de l'aviation mondiale. Les attaques sur les infrastructures énergétiques libèrent également des millions de tonnes de GES, avec par exemple 14 Mt de CO₂ relâchées dans l'océan après la destruction du pipeline Nord Stream 2, ou 40t de SF₆ (gaz jusqu'à 23 000 fois plus réchauffant que le CO₂) liées aux attaques russes sur le réseau haute-tension ukrainien.

En contribuant à l'aggravation de la crise climatique, les conflits armés produisent des effets environnementaux et sociaux. Ces impacts, comme illustré précédemment, peuvent également accentuer les tensions internationales et fragiliser certaines régions, contribuant ainsi à l'émergence de nouveaux conflits.

2. Les autres impacts environnementaux

Les conséquences environnementales liées au secteur de la défense dépassent la seule question climatique. Nous les recensons ici sans prétendre à l'exhaustivité. Elles englobent notamment la pollution des sols et des eaux, la destruction d'habitats naturels, la perte de biodiversité, la pollution atmosphérique ainsi que la dégradation des terres cultivables.

Comme pour les émissions de GES, les conséquences environnementales des activités militaires sont exacerbées en temps de guerre. Non seulement les combats obèrent la résilience d'un territoire sur la durée du conflit (dégradation des sols, pollution des eaux, de l'atmosphère ou de sols, incendies ravageurs etc.) mais ces dommages massifs peuvent s'étendre sur plusieurs siècles.

La guerre déclenchée en 2022 par la Russie en Ukraine illustre l'ampleur et la diversité des atteintes environnementales susceptibles de s'inscrire dans la durée, au-delà des seules émissions de gaz à effet de serre. Les phases intensives de bombardements ont entraîné des pics extrêmes de pollution atmosphérique : autour de Kiev, les concentrations de particules fines ont été mesurées jusqu'à 27 fois supérieures aux niveaux habituels, principalement en raison des explosions, des incendies d'infrastructures et de la combustion incontrôlée de carburants et de matériaux de construction⁴⁰. La destruction par les Russes du barrage de Kakhovka a constitué un tournant important : les inondations consécutives ont entraîné la remise en suspension de polluants accumulés dans les sédiments, une modification brutale de la salinité de l'estuaire du Dniepr et des atteintes massives à la biodiversité aquatique et terrestre⁴¹. Plus largement, la fragmentation des habitats, les incendies et les bombardements répétés ont provoqué la destruction d'écosystèmes entiers et la décimation de populations animales locales, y compris dans des zones protégées, compromettant la résilience écologique régionale à long terme.

Les exemples précédents mettent en évidence les pressions que la guerre exerce sur les écosystèmes. **Une maîtrise insuffisante de ces impacts environnementaux peut générer des risques significatifs pour le secteur lui-même, qu'ils soient opérationnels, sanitaires, économiques, réputationnels ou liés à l'attractivité et au recrutement.**

3. La prise en compte des enjeux environnementaux par les armées

Afin de prendre en compte ces risques liés à la dégradation des écosystèmes, le ministère des Armées a produit ces dernières années une série de stratégies sur les thèmes de la défense durable, de l'énergie, du climat, de la biodiversité, des déchets et de l'eau (pour plus de détails sur la stratégie Climat & défense, voir encadré 1). Ces stratégies sectorielles ont permis de dresser un premier bilan des enjeux et des vulnérabilités auxquels les armées sont confrontées sur le plan environnemental. Cette dynamique se traduit notamment par la mise en par la réalisation de son bilan d'émissions de gaz à effet de serre (BEGES), mais aussi par plusieurs initiatives relatives à la préservation de la biodiversité sur les emprises militaires. Sur les quelque 275 000 hectares utilisés par le ministère, une part importante fait l'objet de dispositifs de protection ou d'inventaires écologiques (Natura 2000, ZNIEFF, etc.). Plusieurs programmes européens LIFE, comme LIFE Défense Nature 2Mil ou LIFE NaturArmy, ont ainsi été déployés afin de concilier maintien des capacités opérationnelles et gestion écologique des terrains militaires⁴².

Ces démarches traduisent une évolution progressive de la prise en compte des enjeux environnementaux au sein du secteur de la défense. Elles ne remettent pas en cause la priorité donnée aux impératifs opérationnels, mais traduisent la montée en puissance d'une approche visant à mieux intégrer les contraintes physiques, énergétiques et environnementales dans la planification, la résilience et la soutenabilité des capacités militaires.

⁴⁰ Shereena Qazi, « 'An Ecocide': How the conflict in Ukraine is bombarding the environment », TRT World, 28 avril 2022, URL : <https://www.trtworld.com/magazine/an-ecocide-how-the-conflict-in-ukraine-is-bombarding-the-environment-56730>.

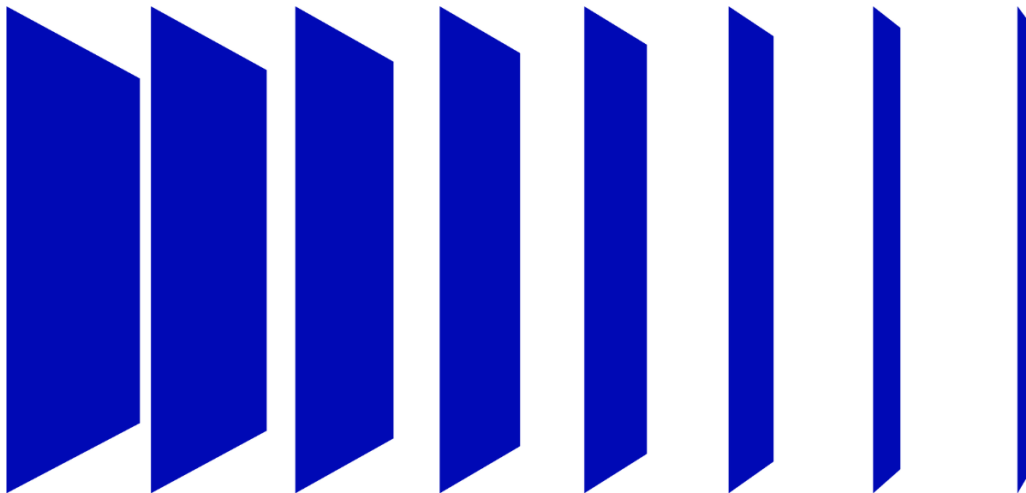
⁴¹ IRIS, Julia Tasse (dir.), « L'environnement, victime collatérale ou objet de la guerre en Ukraine ? Avec François Grünewald », dans *Sur le front climatique*, podcast de l'Observatoire Défense & Climat, épisode n° non précisé, 19 décembre 2025, durée : 35 min

⁴² MINISTÈRE DES ARMÉES, *LIFE NaturArmy – Les sites pilotes*, Armée et Biodiversité, s.d., URL : <https://www.lifeterrainsmilitaires.fr/life-naturarmy/les-sites-pilotes/>.

A retenir :

- **Le changement climatique comme catalyseur de chaos.** En accentuant la pression sur les ressources critiques (eau, terres arables, pêche), en alimentant les migrations climatiques et en redéfinissant certains équilibres géostratégiques, l'aggravation des risques physiques du changement climatique renforce les tensions existantes, fragilise les États ou encore accroît le risque de nouvelles crises.
- **Élargissement du périmètre des missions des forces armées.** Entre 2007 et 2023, la hausse de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles a doublé les missions d'appui des forces armées à la sécurité civile, au risque d'accroître leur suractivité. Parallèlement, l'ouverture de nouvelles zones stratégiques, notamment en Arctique, élargit leur champ d'action et renforce paradoxalement l'importance des capacités d'intervention en milieu grand froid.
- **Des emprises militaires et infrastructures industrielles vulnérables.** Les événements climatiques extrêmes affectent de plus en plus les infrastructures industrielles de la défense, pouvant aller jusqu'à des interruptions complètes des activités de production. Les perturbations d'activités industrielles de la défense liées aux événements climatiques ont augmenté de 35 % entre 2023 et 2024. Les emprises militaires – notamment aériennes – sont également de plus en plus vulnérables.
- **Une littérature déjà riche sur les interactions entre enjeux climatiques et de défense.** De nombreux acteurs français (IRIS, FRS, IFRI, IDDRI etc.) produisent des analyses sur les conséquences géopolitiques, opérationnelles et industrielles du changement climatique pour le secteur de la défense. Dans ce contexte, **le programme DÉFENDRE n'a pas vocation à approfondir l'analyse de ces interactions.**

Chapitre 2 – L'énergie, condition de puissance à l'ère de la transition



L'énergie constitue l'un des fondements matériels des sociétés industrielles contemporaines. Les systèmes de production, les transports, les infrastructures, les réseaux numériques et les capacités industrielles reposent tous sur des flux énergétiques abondants, continus et accessibles. Les armées et les industries de défense ne font pas exception : mobilité des forces, fonctionnement des systèmes d'armes, infrastructures, production industrielle et chaînes logistiques dépendent directement ou indirectement de la disponibilité en énergie.

Dans un contexte marqué à la fois par le durcissement des tensions géopolitiques, l'accélération de la transition énergétique et les contraintes croissantes pesant sur les ressources fossiles, ces dépendances deviennent un enjeu stratégique majeur. Les crises énergétiques récentes ont rappelé la vulnérabilité des économies européennes aux ruptures d'approvisionnement, à la volatilité des prix et aux tensions géopolitiques affectant les infrastructures et les flux énergétiques mondiaux.

Le secteur de la défense se trouve au croisement de ces dynamiques. Les armées demeurent fortement dépendantes des hydrocarbures, en particulier pour la mobilité opérationnelle, tandis que les infrastructures industrielles, technologiques et logistiques dont elles dépendent connaissent des transformations rapides : électrification croissante des usages et équipements, numérisation, évolution des infrastructures, nouvelles contraintes réglementaires et tensions sur certaines ressources stratégiques.

Par ailleurs, les vulnérabilités énergétiques du secteur de la défense dépassent largement les seules consommations directes de carburants et d'électricité. Elles englobent également l'ensemble des dépendances industrielles, logistiques et matérielles nécessaires à la production et au maintien des capacités militaires. Or, ces dépendances indirectes demeurent aujourd'hui encore largement insuffisamment documentées.

Ce chapitre propose ainsi d'analyser le rôle structurant de l'énergie pour les armées et la BITD françaises, les vulnérabilités associées à leurs dépendances actuelles, ainsi que les transformations énergétiques susceptibles de reconfigurer durablement leur environnement opérationnel, industriel et stratégique.

I. L'énergie : condition de la puissance

Comprendre les enjeux énergétiques du secteur de la défense suppose de revenir sur le rôle fondamental de l'énergie à la fois dans les sociétés industrielles, et dans les opérations militaires. Les crises énergétiques de 2022-2023 et 2026, conséquences respectivement du conflit russo-ukrainien et du blocage du détroit d'Ormuz, rappellent avec force que les flux énergétiques structurent et conditionnent le fonctionnement de l'ensemble des activités économiques. C'est ainsi que tout choc ou rupture énergétique se propage à l'ensemble du corps social et industriel.

A. La France, une nation en transition, encore fortement dépendante des combustibles fossiles

1. Le rôle de l'énergie dans les sociétés thermo-industrielles

D'un point de vue physique, toute activité de production est un ensemble de « transformations » impliquant l'utilisation d'une quantité d'énergie. Dès lors, pour produire des biens et services, nos sociétés humaines « transforment » ou, plus précisément, elles extraient, travaillent et déplacent des ressources énergétiques, minérales ou biologiques puisées dans l'environnement. L'importante augmentation des flux physiques qui servent de base à l'activité productive a été concomitante à l'expansion économique, sociale et démographique des sociétés humaines actuelles.

L'énergie, aujourd'hui encore principalement d'origine fossile (près de 80 % du mix énergétique primaire mondial), demeure un facteur essentiel du développement des sociétés modernes. L'ensemble des biens et services repose, directement ou indirectement, sur les flux d'énergie pour extraire les ressources, les transformer et les transporter.

Tous les secteurs de l'économie sont concernés : agriculture, industrie, transports, bâtiment, services, numérique et bien entendu, défense. L'accès à l'énergie joue un rôle essentiel dans l'expansion économique, sociale et démographique des sociétés humaines

Comme nous le verrons, de la même façon qu'elle conditionne le fonctionnement de toute économie, la disponibilité énergétique – et, par conséquent, la capacité à mobiliser, transformer et projeter des ressources – constitue un facteur central de la puissance militaire.

Encadré 2 - Les mots et les choses : Qu'est-ce que l'énergie ?

Dans la langue courante, l'énergie est considérée comme une « chose » : elle est produite, on l'achète et on la vend, c'est elle qui fait marcher les machines etc. Pourtant, du point de vue de la physique, l'énergie n'est pas une chose, c'est un concept abstrait qui permet de *quantifier les transformations de la matière*, d'accrocher des nombres à ces transformations.

Prenons l'exemple d'une centrale hydroélectrique : lorsqu'on ouvre les vannes, l'eau d'un barrage s'écoule dans les canalisations où *elle perd de l'altitude et gagne de la vitesse*.

- Cette transformation physique est la première étape d'une série où ce mouvement de l'eau permet de mettre une turbine en rotation, puis un système électromécanique met des électrons en mouvement dans un conducteur : on a produit de l'électricité.
- Le concept d'énergie s'introduit dès la première étape, lorsqu'on s'interroge sur la relation entre *la perte d'altitude* et *le gain de vitesse*. En effet, pour faire court on dira que *la perte d'énergie gravitationnelle est exactement compensée par le gain d'énergie cinétique* : forme que prend dans ce cas la grande loi de conservation de l'énergie dans toute transformation.
- Dans le cas qui nous intéresse, c'est un débit d'eau qui est en jeu, c'est-à-dire une masse par unité de temps, et c'est ainsi que s'introduit la *puissance*, c'est-à-dire *l'énergie par unité de temps* que l'installation permet de mettre en jeu.
- Un bilan énergétique suppose donc de suivre toutes les transformations ayant lieu, ne serait-ce que le fait que l'eau *frotte* contre la paroi des canalisations, ce qui la ralentit un peu, et l'on doit introduire une *énergie de frottement* que l'on peut calculer ou mesurer. Il y a d'autres types de frottement en jeu dans la centrale.
- En tout cas, l'énergie électrique (associée au mouvement des électrons dans les fils

électriques) que la centrale produit est directement reliée à l'énergie potentielle gravitationnelle de l'eau dans le barrage. Le bilan énergétique permet ainsi de dimensionner les installations.

Généralisons le propos : la physique est capable d'introduire autant de *formes* d'énergie qu'il y a de types de transformation dans un processus de production de tout bien ou tout service, si bien que cette production peut être exprimée en termes énergétiques : énergie associée à la chaleur, au travail mécanique, aux transformations chimiques, biologiques etc. Notons que l'activité humaine peut également être exprimée en termes énergétiques : pour son réapprovisionnement, l'organisme s'alimente. Une ressource énergétique primaire⁴³ est ainsi un ensemble de matériaux subissant la première d'une suite de transformations conduisant à la production d'un bien ou d'un service. En général, cette production fait appel à plusieurs ressources énergétiques œuvrant de concert.

Et toutes ces formes peuvent s'exprimer avec *la même unité*. L'unité officielle est le Joule, mais pour caractériser les systèmes énergétiques, on préfère utiliser des multiples de cette unité de base.

- Ainsi, la tonne-équivalent-pétrole (tep), qui désigne la chaleur produite par la combustion (transformation chimique) d'une tonne de pétrole : 1 tep = 42 milliards de Joules. L'humanité consomme aujourd'hui environ 15 milliards de tep par an (Gigatep ou Gtep).
- On peut aussi utiliser la puissance. Comme, par définition, 1 Watt = 1 Joule/seconde, on déduit 1 tep = 11,6 MWh. La puissance correspond à un débit d'énergie : deux systèmes de puissances différentes pourront fournir le même travail (la même énergie), mais plus un système est puissant plus il pourra le faire dans un laps de temps plus court.

Une dernière remarque, sous forme de métaphore, illustrant le fait que l'énergie n'est pas une « chose » au même titre que les autres productions de l'économie : le secteur énergétique contribue pour moins de 10% au PIB national, mais juger de l'importance de l'énergie à la part du secteur dans le PIB équivaut à juger de l'importance du cerveau ou du sang à leur contribution au poids du corps. Il en va évidemment de même pour les armées.

NB : Peut-on appliquer la notion de puissance au sens énergétique à la puissance des armées ? Si oui comment, et avec quelles précautions méthodologiques ? Nous sommes preneurs de vos retours sur ce point.

2. En France, une « exposition énergétique » dominée par les énergies fossiles importées

b. Le concept « d'exposition énergétique »

L'équipe du Shift Project a développé un outil de modélisation permettant de mettre en évidence notre exposition énergétique. Celle-ci inclut l'énergie consommée sur le territoire, celle associée à nos importations de biens et de services, et celle contenue dans nos propres exportations – autrement dit, l'énergie nécessaire au fonctionnement du pays :

- Pour soutenir les modes de vie des Français : alimenter une chaudière pour se chauffer, cultiver et transformer les denrées alimentaires pour se nourrir, faire tourner le moteur des véhicules particuliers, assurer la production - sur le territoire et à l'international - des biens consommés en France etc.

⁴³ The Shift Project recommande généralement de raisonner autant que faire se peut en énergie finale pour répondre aux besoins énergétiques, éclairer le débat et guider les choix et investissements de manière plus efficace. L'énergie finale correspond à l'énergie utilisée par les consommateurs ou les entreprises pour leur fournir un service énergétique, comme l'électricité pour un four micro-ondes. En règle générale, l'énergie finale se traduit par une facture pour les consommateurs ou les entreprises. Elle se distingue de l'énergie primaire, directement accessible dans la nature mais pas consommable telle quelle.

- Pour alimenter les activités économiques françaises : faire fonctionner des usines, maintenir des réseaux, transporter des marchandises, alimenter des engins agricoles, chauffer des bâtiments, etc.

Cette méthode de calcul permet de mettre en évidence nos dépendances énergétiques.

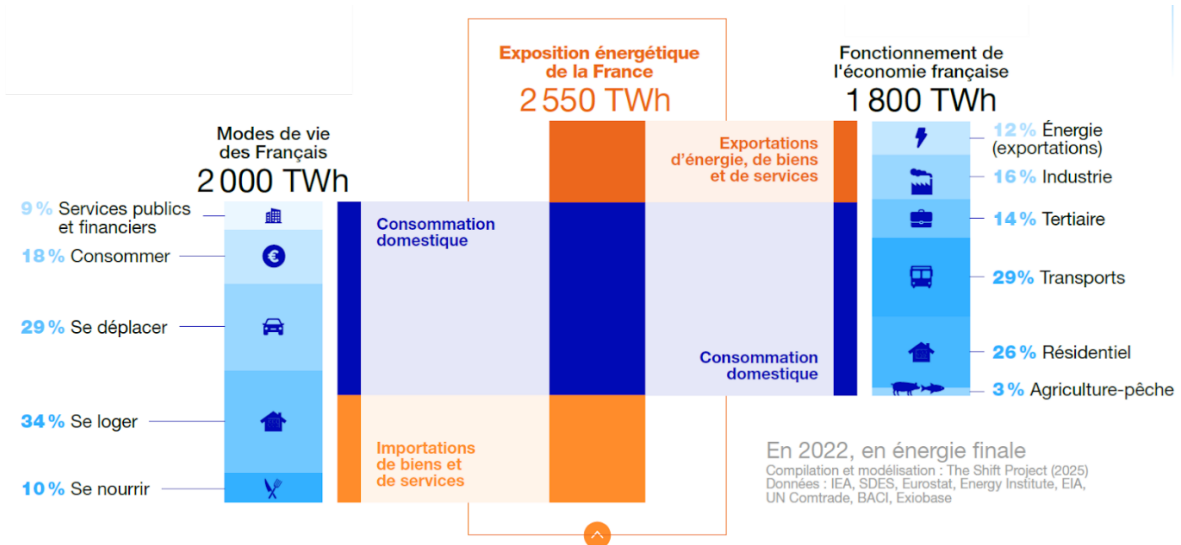


Figure 3 - Exposition de la France en 2022 en utilisation d'énergie finale

Source : La Souveraineté par la Décarbonation, The Shift Project (2025)

Une quantité de 2550 TWh est nécessaire par an au fonctionnement de la France en 2022 pour soutenir les modes de vie des Français et l'économie nationale. Cela représente :

- 5 fois plus d'énergie que celle produite sur le territoire français.
- 70 % d'énergies fossiles (principalement du pétrole et du gaz naturel). Bien que la France produise globalement assez d'électricité pour couvrir sa consommation électrique actuelle, cela ne doit pas masquer la part d'énergies fossiles encore utilisée, en France comme à l'étranger, pour se déplacer et se chauffer, et pour produire les biens et services que nous consommons.
- 1/4 de notre exposition énergétique est liée à l'énergie « grise » incorporée dans les biens et services importés par la France – soit davantage que la totalité de l'énergie que le pays produit annuellement.

c. Des ressources fossiles sous contraintes physiques

Le début du XXI^e siècle marque une évolution structurelle de l'approvisionnement pétrolier. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la production mondiale de pétrole conventionnel a atteint son pic en 2008⁴⁴. Depuis, la croissance de l'offre pétrolière mondiale ne provient plus majoritairement des gisements conventionnels historiques, mais du développement de ressources dites « non conventionnelles », plus complexes à exploiter. Parmi celles-ci figurent principalement le pétrole de schiste américain (*tight oil* ou *shale oil*), les sables bitumineux, les liquides de gaz naturel (*Natural Gas Liquids*) ainsi que les productions *offshore* profondes.

⁴⁴ International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook 2010*, Paris, IEA, 2010, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2010>

Dans un rapport publié en 2021⁴⁵, The Shift Project estime que la **production pétrolière totale des principaux fournisseurs actuels de l'Union européenne risque de s'établir dans le courant de la décennie 2030 à un niveau inférieur de 10 % à 20 % à celui atteint en 2019**. L'AIE a également publié en 2025⁴⁶ un rapport attestant que des investissements continus seraient nécessaires pour enrayer les déclinés naturels des puits pétroliers existants. En cas de chute de ces investissements, les déclinés pourraient être bien plus rapides que prévus initialement.

Dans le cas de la France, 7 de ses 10 principaux fournisseurs de pétrole risquent de voir leur production fortement décliner d'ici à 2050. Le volume de production de 6 d'entre eux (Algérie, Angola, Libye, Nigeria, Norvège, Russie) pourrait passer en dessous de leur propre volume de consommation, menaçant leurs capacités d'exportation et donc l'approvisionnement de la France. Par ailleurs, la consommation du Moyen-Orient, de l'Afrique et de l'Asie pourrait continuer d'augmenter d'ici à 2050, posant des risques d'éviction au détriment de la France. Dans ces scénarios, l'écart croissant entre la production et la consommation de pétrole pourrait exacerber les tensions autour des approvisionnements à l'échelle mondiale. Cela rappelle que la dépendance à cette ressource peut être utilisée comme levier dans les rapports de force internationaux.

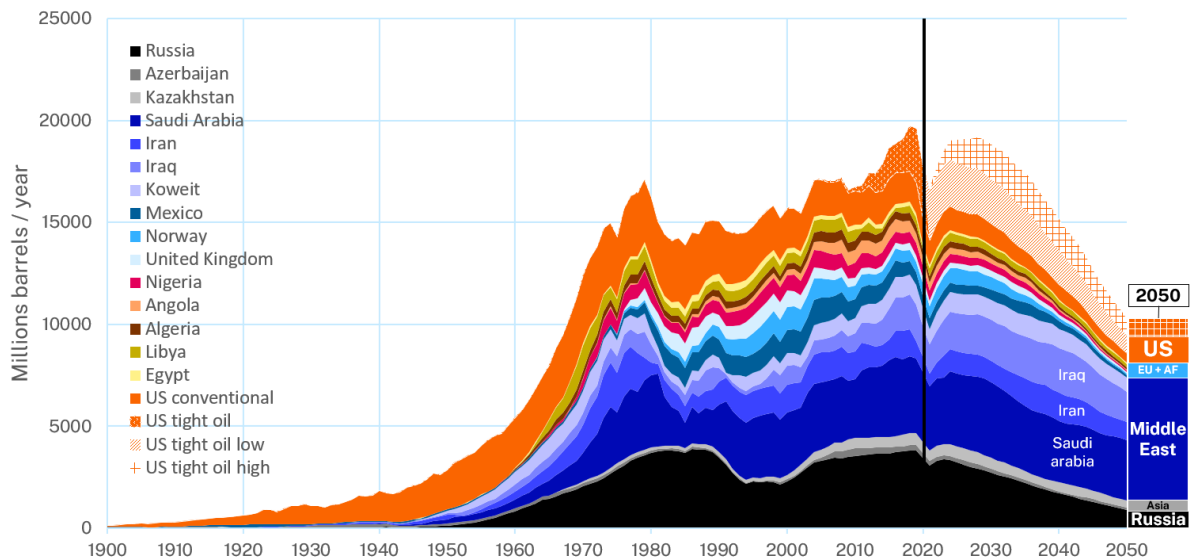


Figure 4 - Production de pétrole brut des 16 principaux pays fournisseurs de l'Europe

Source : The Shift Project (2021) *The future of oil supply in the European Union: State of reserves and production prospects for major suppliers* (données Rystad Energy)

Le développement massif du pétrole de schiste aux États-Unis a joué un rôle déterminant en repoussant temporairement les perspectives d'un déclin rapide de la production pétrolière mondiale. Cette expansion a permis de soutenir l'offre mondiale durant plus d'une décennie et a modifié profondément les équilibres énergétiques et géopolitiques internationaux. Toutefois, ce modèle présente des fragilités structurelles. Cette augmentation de l'offre pétrolière s'est accompagnée d'une modification de sa composition.

⁴⁵ The Shift Project, *Possible déclin de l'approvisionnement en pétrole de l'Union européenne d'ici 2030*, Paris, The Shift Project, s.d., <https://theshiftproject.org/publications/ue-approvisionnement-petrole-2030/>

⁴⁶ International Energy Agency (IEA), *The Implications of Oil and Gas Field Decline Rates*, Paris, IEA, 2025, <https://www.iea.org/reports/the-implications-of-oil-and-gas-field-decline-rates>

Une part croissante de la production mondiale provient de liquides de gaz naturel, de condensats et de pétroles non conventionnels, qui ne présentent pas les mêmes caractéristiques que le pétrole brut conventionnel et génèrent généralement moins de distillats moyens (gazole et kérosène), essentiels au fonctionnement des transports, de l'industrie et des armées. De plus, les productions de schiste se caractérisent notamment par des taux de déclin très rapides des puits, une forte dépendance au maintien des investissements et des besoins continus de forage pour stabiliser les niveaux de production. À cela s'ajoutent des contraintes croissantes liées à la qualité des gisements restants, à l'inadéquation entre les moyens de raffinage américains optimisés historiquement pour des pétroles lourds et les produits légers produits localement, aux coûts de financement ainsi qu'aux rendements énergétiques décroissants. **La dynamique observée depuis les années 2010 repose ainsi largement sur des ressources nécessitant des investissements financiers plus importants, des technologies d'extraction plus complexes et une intensité énergétique accrue.**

Du côté du gaz naturel, en 2024, plus de la moitié de la production mondiale était concentrée aux Etats-Unis, en Russie et au Moyen-Orient. D'ici à 2050, cet oligopole pourrait s'accroître davantage, la production de la Norvège, de l'Afrique et de l'Amérique du Sud apparaissant en déclin à cet horizon⁴⁷. Diversifier ses approvisionnements et rester libre du choix de ses fournisseurs de gaz naturel pourrait donc se complexifier. La Norvège, dernier grand producteur européen et principal fournisseur de la France, pourrait voir ses capacités d'exportation fortement décliner. Dans une tendance de hausse mondiale de la demande en gaz, tout particulièrement des pays émergents, des risques d'éviction en défaveur de la France existent d'ici à 2050. A cela s'ajoutent des risques d'instrumentalisation de notre dépendance dans le cadre des rapports de force internationaux entre blocs de nations.

Sans transition massive des économies européennes vers un modèle fortement affranchi des énergies fossiles, des contraintes d'approvisionnement significatives (dites « contraintes physiques ») se matérialiseront à moyen et long terme et ce en ne considérant que les seules contraintes géologiques et les capacités de production physique. Les chocs géopolitiques pouvant accélérer ces tensions bien en amont. **La France et l'Union européenne, donc les armées et la base industrielle de défense européenne, se trouvent ainsi exposées à un double risque : celui d'une raréfaction structurelle des ressources fossiles dont elles demeurent très largement dépendantes, et celui de ruptures conjoncturelles liées à l'instabilité croissante des zones de production et de transit.** Ces vulnérabilités ne sont pas hypothétiques — elles se manifestent déjà, comme l'ont illustré la crise gazière de 2022 consécutive à l'invasion russe à grande échelle de l'Ukraine, ou le blocage autour du détroit d'Ormuz en 2026.

3. Une économie française en mutation

La transition énergétique actuellement à l'œuvre constitue une transformation structurelle et profonde de l'ensemble du système économique, industriel et de nos modes de vie. Mobilité, industrie, bâtiment, agriculture, production d'énergie, numérique : aucun pan du fonctionnement de nos sociétés n'y échappe.

⁴⁷ The Shift Project, *Gaz naturel : quels risques pour l'approvisionnement de l'Union européenne ?*, Paris, The Shift Project, 2022, <https://theshiftproject.org/publications/gaz-naturel-risques-approvisionnement-union-europeenne/>

Le Shift Project a décliné, dans son *Plan Robuste pour l'Économie Française*⁴⁸ (avril 2026), vingt chantiers clés pour réussir cette transition. Parmi eux : l'électrification de la mobilité individuelle et des poids lourds, le développement massif du fret ferroviaire, la décarbonation du secteur aérien, le déploiement de l'hydrogène bas-carbone, l'essor de l'éolien et du photovoltaïque, le développement des bioénergies, ou encore la maîtrise de l'empreinte énergétique des centres de données. Chacun de ces chantiers implique des reconfigurations profondes des filières industrielles, des infrastructures et du mix énergétique national.

L'électrification généralisée fait partie des points cruciaux de ces transformations. La réduction de la dépendance aux énergies fossiles passe nécessairement par l'électrification d'un nombre croissant de procédés et de technologies : industrie, mobilité individuelle et lourde, logements, production de chaleur etc. Par exemple, la seule électrification de la mobilité individuelle va impacter à la fois l'industrie automobile, qui doit convertir ses lignes de production et ses compétences, mais aussi en amont ses fournisseurs (allant jusqu'à l'extraction et la transformation des matériaux nécessaires à la fabrication des batteries) et toute la chaîne aval (réparateurs, concessionnaires, stations-services). Les infrastructures de transport et les réseaux électriques devront être massivement renforcés pour absorber ces nouveaux usages. Les financements publics et les efforts de recherche et développement se concentreront sur ces technologies. Sur le marché du travail, de nouveaux métiers émergeront tandis que d'autres verront leur activité se réduire progressivement⁴⁹.

Autre exemple, la question des carburants bas-carbone. L'usage de carburants alternatifs (biocarburants, biogaz, hydrogène ou carburants de synthèse etc.) est envisagé dans de nombreux secteurs (transport aérien, maritime, industrie lourde) comme solution de substitution aux combustibles fossiles pour les usages difficiles à électrifier. Au-delà des barrières technologiques (maturité de la technologie) et de déploiement à dépasser (par exemple, une flotte aérienne commerciale se renouvelle sur plusieurs décennies), ces ressources ne seront disponibles qu'en quantités structurellement limitées. Le Shift Project insiste sur le fait que les gisements de bioénergie mobilisables de manière soutenable en France sont physiquement contraints⁵⁰ : les terres agricoles, les forêts et les déchets organiques ne peuvent fournir qu'un volume limité de biomasse valorisable en énergie, sans menacer la sécurité alimentaire, la biodiversité et les puits de carbone naturels. Il en va de même pour l'électricité nécessaire à la fabrication de carburants synthétiques ou d'hydrogène⁵¹. Des arbitrages s'imposeront donc inévitablement entre secteurs pour l'accès à ces ressources rares.

Or, le secteur de la défense ne fonctionne pas en autarcie. Il dépend structurellement du tissu industriel civil pour ses approvisionnements, sa *supply chain*, ses équipementiers, ses infrastructures de transport et d'énergie. À mesure que ce tissu se transforme, le secteur militaro-industriel sera impacté, qu'il l'ait anticipé ou non.

⁴⁸ The Shift Project, *Réussir la transition dans l'incertitude : la méthode Shift en 20 chantiers*, Paris, The Shift Project, 2026, <https://theshiftproject.org/publications/reussir-la-transition-dans-lincertitude/>

⁴⁹ The Shift Project, *Emploi et formation : des leviers essentiels pour décarboner*, Paris, The Shift Project, s.d., <https://theshiftproject.org/publications/emploi-et-formation-des-leviers-essentiels-pour-decarboner/>

⁵⁰ The Shift Project, *Réussir la transition dans l'incertitude : la méthode Shift en 20 chantiers*, Paris, The Shift Project, 2026, <https://theshiftproject.org/publications/reussir-la-transition-dans-lincertitude/>

⁵¹ The Shift Project, « Décarboner le secteur aérien (STROB) », dans *Réussir la transition dans l'incertitude : la méthode Shift en 20 chantiers*, Paris, The Shift Project, 2026, <https://theshiftproject.org/app/uploads/2026/04/Reussir-dans-lincertitude-SHIFT-PROJECT-avril-2026.pdf>

Les compétences, les technologies, les emplois, les infrastructures et les filières industrielles vont profondément évoluer. Face à ces mutations, des questions se posent : **comment le secteur de la défense peut-il s'y adapter, les anticiper, voire en tirer parti ? Quelles contraintes devra-t-il absorber ? Quels leviers peut-il actionner, pour quel potentiel physique et avec quelles ressources ? Comment naviguer dans un environnement de plus en plus marqué par des conflits d'usage sur des ressources énergétiques et industrielles limitées ?** Ce sont précisément ces questions fondamentales que le programme DÉFENDRE se propose d'instruire dans ses prochains livrables.

B. Le rôle de l'énergie pour les armées

La relation entre énergie et fait militaire s'articule autour de trois grands types d'enjeux. Premièrement, disposer de réserves d'énergie suffisantes est une condition nécessaire pour conduire la guerre, en alimentant les hommes, les équipements et les systèmes d'armes (pour leur fabrication et leur fonctionnement)⁵². Ensuite, la maîtrise des ressources ou des infrastructures énergétiques peut constituer un objectif de guerre, un moyen d'action, ou un facteur aggravant de conflit : si le contrôle de ressources énergétiques n'est que rarement la cause unique d'un affrontement, il se combine avec d'autres types d'enjeux ou d'intérêts. Enfin, l'énergie peut être mobilisée comme une arme ou un levier de puissance, que ce soit par des moyens physiques (sabotage d'infrastructures, destruction de capacités de production⁵³), géopolitiques (embargo, contrôle des voies d'approvisionnement) ou économiques (manipulation des prix, sanctions ciblées)⁵⁴.

Si les deux derniers types d'enjeux font déjà l'objet de nombreuses analyses d'ordre géopolitique⁵⁵, c'est sur le premier point que nous concentrerons notre attention : l'énergie comme fondement physique de l'action militaire.

1. Les flux énergétiques, conditions fondamentales au fonctionnement des armées

Les flux énergétiques sont consubstantiels au fonctionnement des armées. On peut en identifier plusieurs usages, non exhaustifs.

La projection et la mobilité des forces constituent la première d'entre elles. Les carburants fossiles sont indispensables aux déplacements des troupes par moyens terrestres, navals ou aériens. La capacité de projection des forces est conditionnée par le soutien énergétique, qui repose sur des moyens logistiques permettant la distribution et le stockage

⁵² Noémie Rebière, « L'énergie, ça sert d'abord à faire la guerre », *Les Grands Dossiers de Diplomatie*, n° 72, Areion Group, 2023, <https://www.areion24.news/2023/08/17/lenergie-ca-sert-dabord-a-faire-la-guerre-1/>

⁵³ Le sabotage ou la destruction d'infrastructures et de capacités de production peuvent, selon le contexte et la nature des cibles (notamment civiles), constituer des violations du droit international humanitaire.

⁵⁴ Les trois enjeux sont intimement liés : c'est parce que l'énergie est indispensable à la conduite des opérations qu'on peut être tenté, pour nuire à un adversaire, d'entraver sa disponibilité avant même un conflit (par exemple avec un embargo), ce qui, en retour, peut être un facteur déclenchant de conflit lorsqu'il apparaît à la partie qui subit la pénurie que prendre la ressource énergétique par la force est plus « rentable » que d'essayer de l'obtenir par les marchés ou que c'est devenu impossible.

⁵⁵ IRIS, « Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques », <https://www.iris-france.org/observatoire/observatoire-de-la-securite-des-flux-et-des-matieres-energetiques/>

IFRI, « Énergie et climat », <https://www.ifri.org/fr/thematiques/energie-climat/>

de carburants. En conséquence, une disponibilité limitée en énergie contraint directement la liberté d'action⁵⁶.

Le fonctionnement des systèmes d'armes repose également sur plusieurs formes d'énergie : l'énergie chimique pour la propulsion (notamment via les propergols solides ou liquides) et l'alimentation de certains équipements embarqués (piles thermiques), ainsi que l'énergie électrique embarquée pour les capteurs, le guidage et les télécommunications. Ces besoins vont croissants avec l'évolution des technologies militaires et la multiplication des besoins électroniques. La montée en puissance du numérique, des activités militaires dans le cyberspace et de l'intelligence artificielle tendent à accroître fortement les besoins électriques des armées modernes, même si les unités restent statiques.

Le fonctionnement des emprises (hébergement, vie courante) repose sur les énergies dites « d'infrastructures », à savoir principalement l'électricité et le gaz, qui dépendent directement des réseaux et des opérateurs civils.

À ces consommations directes s'ajoute une dimension souvent invisible mais tout aussi fondamentale : l'énergie consommée indirectement dans l'ensemble de la chaîne de valeur militaire. La fabrication des systèmes d'armes, des équipements, la production des munitions, des carburants, de l'habillement et de l'alimentation des soldats mobilisent des quantités considérables d'énergie en amont de tout déploiement. Il en va de même pour l'ensemble des acteurs internalisés et externalisés qui concourent au soutien des forces : fret amont, approvisionnement en pièces détachées, maintenance industrielle, construction et entretien des infrastructures. Cette empreinte énergétique indirecte, difficile à mesurer mais structurellement liée aux activités militaires, rappelle que la dépendance énergétique des armées dépasse largement le seul périmètre des opérations.

2. Un mix énergétique très largement dominé par le pétrole

Le fonctionnement d'une armée repose sur plusieurs sources et formes d'énergie. La Stratégie énergétique de la défense (SED) publiée en 2020⁵⁷ dresse un état des lieux des consommations énergétiques directes du ministère des Armées (figure 5) en 2019.

Sur l'année 2019, près de 10,6 TWh d'énergie finale ont été consommés. Le pétrole est de loin la première source de consommation directe pour le ministère des Armées. Cette énergie est utilisée majoritairement pour la mobilité et la projection des forces. Il sert également, et dans une moindre mesure, à la production d'électricité sur les bases et en opérations (via des groupes électrogènes), au chauffage (chaudières fioul) et comme intrant industriel pour certains équipements, lubrifiants et matériaux militaires (non comptabilisés dans les calculs ci-dessus)⁵⁸.

⁵⁶ Matthieu Auzanneau, *L'or noir*, Paris, La Découverte, 2015. / Daniel Friedmann, *Le pétrole pendant la Seconde Guerre mondiale*, s.l., 2026.

⁵⁷ NB : la SED a fait l'objet d'une actualisation en 2026. Etant donné qu'aucun document public n'a été partagé, nous nous basons sur la version 2020

⁵⁸ Ministère des Armées, *Stratégie énergétique de défense*, Paris, ministère des Armées, 2020, <https://www.defense.gouv.fr/sites/default/files/ministere-armees/Strat%C3%A9gie%20%C3%A9nerg%C3%A9tique%20de%20d%C3%A9fense.pdf>

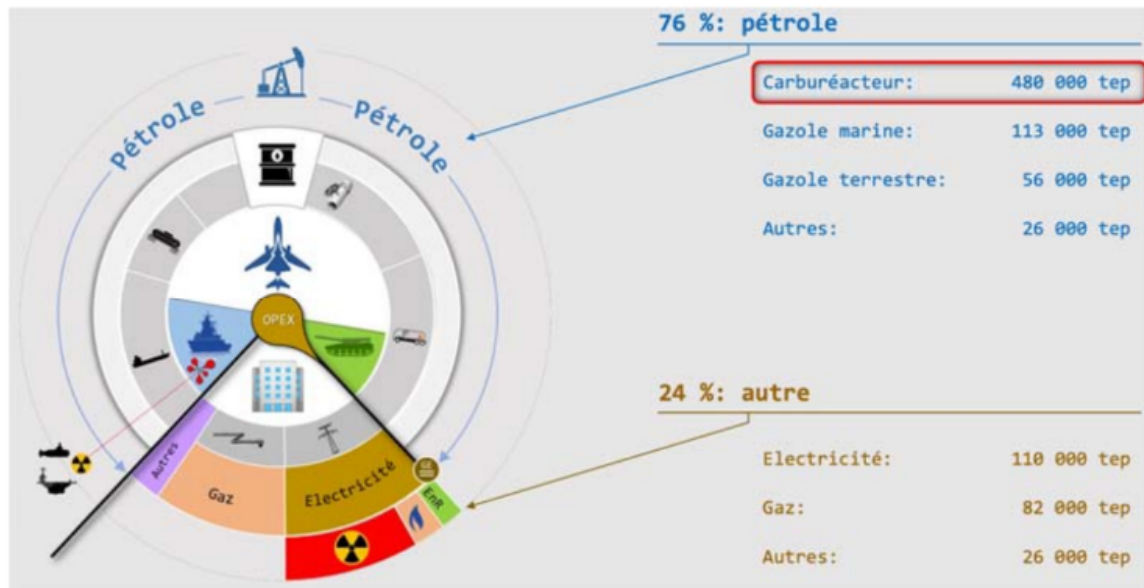


Figure 5 - Répartition des consommations énergétiques directes du ministère des Armées

Source : Commission de la défense nationale et des forces armées, *Rapport d'information sur les enjeux de la transition écologique pour le ministère des Armées*, Assemblée nationale, mai 2021

d. La mobilité, premier poste de consommation énergétique des armées

Selon la SED, l'énergie liée à la mobilité représente 76% des consommations énergétiques directes.

Le carburant à usage aéronautique (ou carburéacteur) constitue le principal poste de consommation de pétrole. Il représente à lui seul la moitié des consommations de carburant. Le carburant maritime en représente quant à lui près d'un quart, et le carburant à usage terrestre environ un cinquième. D'après ces mêmes données et rapportée à l'échelle nationale, la part du ministère s'élève à 0,8 % de la consommation pétrolière française, dont 0,2 % des carburants terrestres, 5 % des gazoles de navigation et 7 % du carburéacteur. Pour l'année 2019, cela représente 835 000 m³ de produits pétroliers.

Comme le montre le graphique 6, la consommation de carburant fossile nécessaire aux mobilités opérationnelles n'a globalement pas varié depuis 2010. Il convient toutefois de noter que ces chiffres n'intègrent pas la mobilité à propulsion nucléaire, comme les chaufferies du porte-avions *Charles de Gaulle* ou celles de la flotte sous-marine (4 sous-marins nucléaires lanceurs d'engins, dit SNLE, et 6 sous-marins nucléaires d'attaque, SNA).

Cette dépendance pétrolière structure profondément l'organisation logistique des armées. Au sein de l'OTAN, la politique dite de « carburant unique » (*Single Fuel Policy*), mise en œuvre progressivement depuis les années 1970, vise à simplifier le soutien opérationnel et garantir l'interopérabilité entre forces alliées en standardisant les carburants utilisés sur les théâtres d'opérations. Cette logique permet de réduire la complexité logistique des approvisionnements, du stockage et de la distribution des carburants en opérations.

En France, cette fonction est assurée par le Service de l'énergie opérationnelle (SEO), chargé de l'approvisionnement, du stockage, du transport et de la distribution des produits

pétroliers nécessaires aux armées. Le SEO constitue ainsi un acteur central de la chaîne logistique militaire, laquelle est dépendante des infrastructures et marchés civils situés en amont, notamment pour l'extraction, le raffinage et le transport des hydrocarbures.

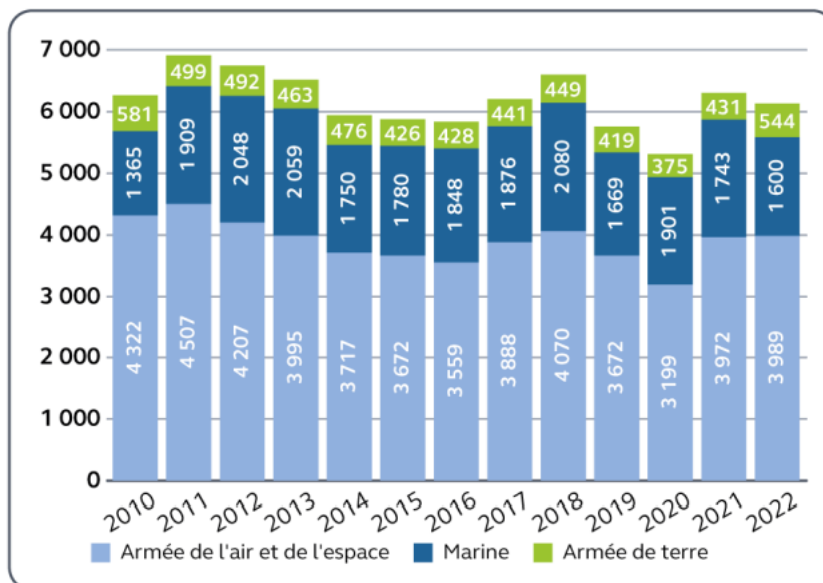


Figure 6 - Consommation d'énergie des armées sur la période 2010-2022 (GWh)

Source : Cour des comptes, ministère des Armées⁵⁹, 2024

e. Les infrastructures, un mix énergétique également dépendant des énergies fossiles

24% des consommations énergétiques directes sont dédiées aux infrastructures (ensemble du patrimoine immobilier et des installations fixes nécessaires au fonctionnement des forces armées). Leur mix énergétique repose essentiellement sur l'électricité (44%) et le gaz (41%), les 15% restants se répartissant entre le fioul (6%), les réseaux de chaleur urbains (4%) et d'autres sources marginales telles que le charbon, le solaire thermique ou la biomasse⁶⁰. Au total, cette consommation représentait 2,6 TWh en 2019.

⁵⁹ Cour des comptes, *Le ministère des armées face aux défis du changement climatique*, Paris, Cour des comptes, 2024, <https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2024-03/20240312-RPA-2024-CDVI-ministere-armee-face-defis-changement-climatique.pdf>

⁶⁰ Depuis 2021 (date des dernières données disponibles publiquement), la part d'énergie d'infrastructures issue des réseaux de chaleur urbain et des chaudières biomasse a augmenté de manière significative et la dernière chaudière au charbon a été fermée.

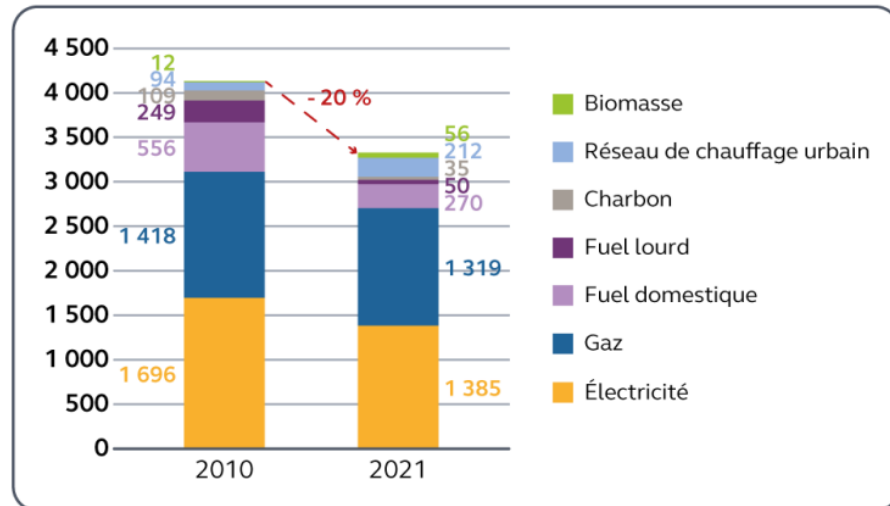


Figure 7 - Évolution de la consommation d'énergie (GWh) des infrastructures du ministère des Armées entre 2010 et 2021

Source : Cour des comptes, ministère des Armées

Le bilan de ces consommations (figure 7) montre que le ministère des Armées a réduit la consommation d'énergie de ses infrastructures de 20 % entre 2010 et 2021. D'après la Cour des Comptes⁶¹ (CdC), cette réduction résulte pour une part de l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et d'une autre part par la diminution des surfaces utilisées qu'a entraînée la réduction du format des armées, sans que « le *ministère des armées (ne soit) en mesure d'évaluer l'impact de ce second facteur, les méthodes de comptabilisation des surfaces ayant été modifiées depuis 2010*⁶². »

Toujours selon le rapport de la CdC, « l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments provient essentiellement du remplacement ou de la moindre utilisation des chaudières fonctionnant au fioul ou au charbon, et de la mise en œuvre de contrats de performance énergétique (CPE), portant sur près de 5 % de la consommation d'énergie du ministère (hors activités opérationnelles). Le regroupement sur le site de Balard des centres de décision du ministère, jusqu'alors disséminés sur une douzaine d'emprises, a aussi contribué à améliorer l'efficacité énergétique globale des bâtiments. »

3. Les consommations énergétiques « indirectes » : angle mort du bilan énergétique des armées

Le bilan énergétique des armées occulte une part probablement significative des consommations énergétiques nécessaires à son fonctionnement : l'énergie consommée indirectement, c'est-à-dire l'ensemble de l'énergie mobilisée en amont et aval des activités militaires pour produire, acheminer et maintenir les capacités militaires.

⁶¹ Cour des comptes, *Le ministère des armées face aux défis du changement climatique*, Paris, Cour des comptes, 2024, <https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2024-03/20240312-RPA-2024-CDVI-ministere-armee-face-defis-changement-climatique.pdf>

⁶² Ibid.

Cette énergie indirecte recouvre plusieurs grandes catégories. Les intrants courants constituent un premier poste : alimentation, eau, pièces détachées, équipements vestimentaires ou matériel médical impliquent tous, en amont, des processus de production et d'acheminement consommateurs d'énergie. La fabrication des systèmes d'armes (cf. partie suivante pour plus d'éléments) en représente un second : munitions, vecteurs, systèmes électroniques et plateformes diverses mobilisent de l'énergie à chaque étape de leur cycle de vie, de l'extraction des matières premières à l'assemblage final. La construction et l'entretien des infrastructures militaires (mais aussi démantèlement) constituent un troisième poste : énergie incorporée dans les matériaux de construction des bâtiments ou des centres de données par exemple. Enfin, les flux de transport et les prestations de services externalisées : fret amont, mobilité du personnel civil et militaire entre le domicile et les emprises, déplacements logistiques, mais aussi l'ensemble des prestataires intervenant pour le compte du ministère des Armées sans relever directement de ses services.

À ce jour et à notre connaissance, **aucune quantification des consommations indirectes n'a été réalisée pour les armées françaises. Cette analyse fait partie des objectifs du programme DÉFENDRE.**

Il est probable que ces consommations indirectes représentent un pourcentage non négligeable des dépendances énergétiques des armées. Dans le rapport du Shift Project « *La souveraineté par la décarbonation* » (2025)⁶³, il a été établi que l'énergie incorporée dans les biens et services consommés en France mais produits à l'étranger représentait environ un quart de l'énergie⁶⁴ nécessaire au fonctionnement de l'économie française et au soutien du mode de vie des Français.

4. Une tendance : des besoins énergétiques croissants

La partie précédente a montré que ni le mix énergétique, ni les volumes d'énergie consommés au sein du ministère des Armées n'ont connu d'évolution substantielle au cours des dernières années. Toutefois, cette relative stabilité apparaît de plus en plus fragile au regard des évolutions du contexte stratégique et des besoins opérationnels des forces. Le durcissement de l'environnement international, les orientations fixées par la *Revue nationale stratégique*⁶⁵ et la **montée en puissance des moyens alloués dans le cadre de la loi de programmation militaire⁶⁶ laissent entrevoir une augmentation des besoins énergétiques, tant pour les armées que pour la base industrielle et technologique de défense, tout particulièrement dans un contexte de préparation à un conflit de haute intensité.**

Les besoins en protection des véhicules, l'accueil de nouvelles capacités, la complexification des technologies, la numérisation et digitalisation des équipements, le développement du

⁶³ The Shift Project, *La souveraineté par la décarbonation : voie nécessaire pour la France et l'Europe*, Paris, The Shift Project, 2025, <https://theshiftproject.org/publications/souverainete-decarbonation-france-exposition-energie/>

⁶⁴ Ce chiffre ne peut toutefois être transposé directement aux armées, qui s'approvisionnent majoritairement auprès de fournisseurs nationaux. Cette relative autonomie de premier rang doit cependant être nuancée : les fournisseurs de rangs 2, 3 et plus ne sont pas nécessairement nationaux.

⁶⁵ Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale (SGDSN), *Revue nationale stratégique 2025*, Paris, SGDSN, 2025, <https://www.sgdsn.gouv.fr/publications/revue-nationale-strategique-2025>

⁶⁶ Ministère des Armées, *Actualisation de la loi de programmation militaire 2024-2030 – Avril 2026*, Paris, Ministère des Armées, 2026, <https://www.defense.gouv.fr/sites/default/files/ministere-armees/Actualisation%20de%20la%20LPM%202024-2030%20-%20Avril%202026.pdf>

domaine cyber et des technologies de l'information pour la collecte, le traitement et l'analyse des données, engendrent une demande en énergie, notamment électrique, croissante. Cela génère des contraintes technologiques pour embarquer toujours plus d'énergie à bord des moyens de mobilité et implique une augmentation des consommations électriques des infrastructures militaires à la fois sur le territoire national et en opérations extérieures et ce, malgré l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de production énergétique⁶⁷.

Ce constat est partagé dans la Stratégie énergétique de défense de 2020 :

« La consommation énergétique des armées n'a fait que croître depuis l'avènement des guerres modernes et les projections confirment la poursuite de cette tendance. L'arrivée de nouveaux systèmes énergivores se traduit par une augmentation des besoins en carburant pour les matériels terrestres (environ 30%) et une électro-dépendance croissante (Scorpion, A400M et Rafale). Le besoin énergétique est source d'un coût financier et logistique à l'entraînement comme en opérations, et la dépendance énergétique associée à la vulnérabilité des lignes d'approvisionnement est génératrice de risques. »

Sans pouvoir l'affirmer de manière certaine, il est probable que la stabilité apparente de la consommation énergétique globale du ministère des Armées de ces dernières années (voir partie II.B.1.C) masque des dynamiques compensatoires. En particulier, s'il est admis que l'intensité énergétique des armées (entendue comme la quantité d'énergie mobilisée par soldat ou unité) ait augmenté au cours des dernières décennies⁶⁸, cela ne se serait pas traduit par une augmentation proportionnelle de la demande totale en énergie, en raison probablement de la réduction du format des armées depuis la fin de la guerre froide et de certains gains en efficacité. Par ailleurs, l'externalisation de certaines fonctions (dans la logistique et la maintenance notamment) a pu aussi y contribuer, étant donné que les données du ministère reposent principalement sur les consommations directes, sans intégrer les consommations indirectes associées à des activités sous-traitées.

C. L'énergie pour la base industrielle et technologique de défense

1. Une industrie structurellement dépendante des flux énergétiques

La fabrication des armements repose sur des procédés industriels fortement énergivores (métallurgie, chimie, électronique, usinage etc.) faisant du coût et de la continuité en approvisionnement énergétique un facteur déterminant des volumes produits, des délais et de la capacité à monter en cadence. Cette dépendance énergétique s'étend aux chaînes de valeur à l'extrême amont : l'extraction, la transformation et parfois le recyclage des métaux stratégiques (aciers spéciaux, aluminium, titane etc.) sont des activités fortement consommatrices en énergie. S'y ajoutent des flux énergétiques qui ne relèvent pas de procédés industriels : mobilité des salariés des entreprises, transport du matériel, chauffage de bâtiments industriels etc.

⁶⁷ Par exemple, les moteurs à essence modernes atteignent aujourd'hui environ 30–36 % d'efficacité thermique, et les moteurs diesel 40–47 %, soit un gain d'efficacité d'environ 30 % depuis les années 1990.

Dahham, Rami Y., Wei, Haiqiao et Pan, Jiaying, « Improving Thermal Efficiency of Internal Combustion Engines: Recent Progress and Remaining Challenges », *Energies*, 2022, <https://doi.org/10.3390/en15176222>

⁶⁸ Ozcan Saritas et Serhat Burmaoglu, « Future of Sustainable Military Operations under Emerging Energy and Security Considerations », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 102, 2016, p. 331-343, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.08.010>.

Comme le montre le conflit russo-ukrainien, en situation de conflit de haute intensité, ces dépendances prennent une dimension stratégique supplémentaire : maintenir l'alimentation énergétique des sites industriels devient un enjeu militaire à part entière, les infrastructures énergétiques constituant des cibles prioritaires pour l'adversaire⁶⁹. En temps de paix, c'est la compétitivité de la BITD européenne qui est en jeu, le coût de l'énergie pesant sur les prix de revient face aux industriels extra-européens et sur la soutenabilité des budgets de défense à long terme.

2. Des dépendances énergétiques peu documentées pour la BITD

D'après nos recherches préliminaires, la littérature fournit peu d'éléments sur la consommation énergétique globale des industries de défense et, plus largement, sur l'amont des activités militaires. Plusieurs rapports et articles ont néanmoins analysé les émissions de gaz à effet de serre du secteur de la défense dans différents pays, en intégrant à la fois les activités amont et aval. Malgré certaines faiblesses méthodologiques, ces travaux permettent d'esquisser des ordres de grandeur sur la dépendance de l'amont aux énergies fossiles.

Une étude de Sparrevik et Utstøl⁷⁰ quantifie les émissions de GES de l'ensemble du secteur de défense norvégien sur l'ensemble de son cycle de vie et aboutit au résultat suivant : 68% des émissions proviennent des activités en amont (production de carburant, de produits chimiques, de munitions et de véhicules militaires, approvisionnement en énergie) et 32% des opérations militaires elles-mêmes. À noter que les acquisitions d'actifs militaires (équipements, plateformes) ne sont pas incluses dans le périmètre de l'étude, ce qui signifie que la part réelle de l'industrie de défense est probablement sous-estimée. Au total, l'ensemble du secteur de défense norvégien représente 1,1% des émissions nationales⁷¹.

Le rapport du groupe de scientifiques *Scientists for Global Responsibility* (Parkinson, 2020)⁷² conduit une analyse similaire pour le Royaume-Uni. Il distingue les émissions directes territoriales (ministère de la Défense, BITD britannique avec les émissions directes de 25 grands contractants) et emploi indirect — de l'empreinte carbone sur cycle de vie complet. Les émissions directes du secteur militaro-industriel britannique sont estimées à 6,5 Mt CO₂e pour 2017-18 (environ 60% du total), et l'empreinte totale à 11 Mt CO₂e⁷³.

Le rapport « *La souveraineté par la décarbonation* » (The Shift Project, 2025) fournit des ordres de grandeur complémentaires sur les dépendances énergétiques de deux grands secteurs dont dépend la BITD ou auxquels elle appartient en partie : l'industrie de base et

⁶⁹ International Energy Agency (IEA), *Ukraine's Energy Security: A Pre-Winter Assessment*, Paris, IEA, s.d., <https://www.iea.org/reports/ukraines-energy-security>

⁷⁰ Sparrevik, Magnus et Utstøl, Simon, « Assessing life cycle greenhouse gas emissions in the Norwegian defence sector for climate change mitigation », *Journal of Cleaner Production*, vol. 248, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119196>

⁷¹ L'étude dispose de plusieurs limites méthodologiques. On peut citer le fait que les acquisitions d'actifs militaires (navires, avions, systèmes d'armes) et vraisemblablement la construction des infrastructures sont exclues du périmètre, au motif que leur durée de vie longue et irrégulière rend difficile leur allocation à une seule année. Cela sous-estime, de fait, la part de l'amont.

⁷² Scientists for Global Responsibility (SGR) & Declassified UK, *The Environmental Impacts of the UK Military Sector*, 2020, https://www.sgr.org.uk/sites/default/files/2020-05/SGR-DUK_UK_Military_Env_Impacts.pdf

⁷³ Sur le plan méthodologique, les émissions de la BITD sont calculées en pondérant les données d'entreprise par la part militaire des ventes et la part des salariés basés au Royaume-Uni — une approche reposant sur des hypothèses simplificatrices fortes. La transparence des données est par ailleurs très inégale : plusieurs contractants majeurs ne publient aucune donnée GES, et le ministère de la Défense lui-même ne divulgue dans son rapport annuel que moins d'un tiers de ses émissions directes réelles. Les émissions liées à l'utilisation effective des armes en opération restent également hors périmètre.

l'industrie manufacturière. La figure 8 représente la répartition géographique et sectorielle de l'énergie finale mobilisée pour les activités de production nécessaires à la demande française, qu'il s'agisse de consommation intérieure ou de production destinée à l'export.

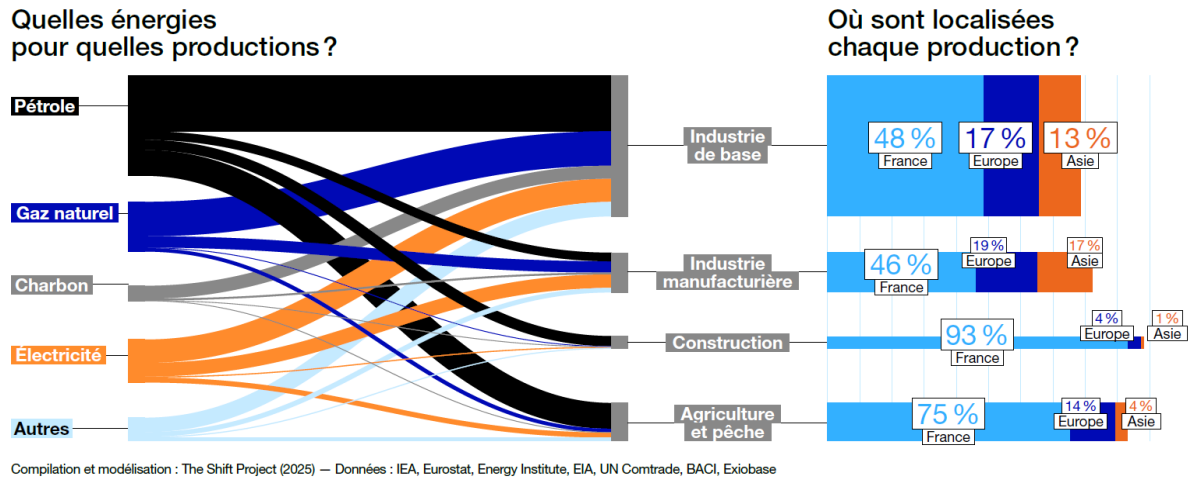


Figure 8 - Énergie et localisation des activités de production nécessaires à la France en 2022
(en TWh, énergie finale)

Conception et modélisation : The Shift Project (2025)

Données : IEA, Eurostat, EIA, Energy Institute, UN Comtrade, BACI, Exiobase

En France, l'industrie de base (matières premières et matériaux) représente plus de la moitié de la consommation d'énergie liée aux activités de production, dont 65 % est consommée en Europe. L'Asie, principal fournisseur extra-européen, représente 13 % du total. Ce secteur se caractérise par une forte dépendance au pétrole, notamment pour des usages non énergétiques (en particulier dans la pétrochimie), et au gaz pour les procédés industriels.

L'industrie manufacturière présente un profil géographique de consommation proche, avec également 65 % de l'énergie consommée en Europe. L'Asie y occupe une place plus importante (17 %). Au total, Europe et Asie concentrent 82 % de la consommation d'énergie associée à ce secteur pour la France. Moins dépendante du pétrole que l'industrie de base, l'industrie manufacturière repose davantage sur l'électricité et le gaz.

Ainsi, ces résultats établis sur un périmètre large, suggèrent que l'amont du secteur de la défense (BITD et chaîne d'approvisionnement des armées) représente une part significative des dépendances énergétiques aux fossiles du secteur de la défense, sans que l'on soit en mesure de l'évaluer précisément pour le moment. Il s'agit d'un des axes de travail fixé par le programme DÉFENDRE.

3. Des besoins énergétiques croissants pour la BITD ?

Selon une note publiée par l'INSEE en novembre 2025⁷⁴, **la production des industries de défense a commencé à augmenter fin 2023 pour atteindre mi-2025 un niveau supérieur de près de 20 % à celui de 2022. Cette hausse est encore plus marquée dans le**

⁷⁴ INSEE, *L'industrie de défense française sous tensions*, Paris, INSEE Blog, 2025, <https://blog.insee.fr/l-industrie-de-defense-francaise-sous-tensions/>

segment de la fabrication d'armes et de munitions, dont la production dépasse de 42 % son niveau de 2022, atteignant un point haut inédit depuis 1991.

Cette montée en cadence industrielle entraîne certainement une hausse des consommations énergétiques, sans que les données rendues publiques ne permettent pour le moment de les quantifier. Le taux d'utilisation des capacités de production des industries de défense a atteint 90 % début 2023, soit son plus haut niveau depuis la crise du Covid-19, et s'y maintient depuis. Or, toute intensification de l'utilisation des équipements industriels (forges, fonderies, chimie, chaînes d'assemblage aéronautique, navale etc.) se traduit, toute chose égale par ailleurs, par une augmentation de la consommation d'énergie et de ressources. Les travaux portant sur la BITD au sein du programme DÉFENDRE permettront d'éclaircir ce point.

II. Dynamiques et transformations énergétiques

Au fil de l'histoire, les armées ont vu leur dépendance énergétique se transformer et s'intensifier au rythme des évolutions techniques — une dimension qui fera l'objet d'un livrable spécifique dans le cadre du programme DÉFENDRE.

La présente partie se concentre sur les évolutions actuellement à l'œuvre au sein des armées et de leurs industries, ainsi que sur les perspectives d'évolution qu'ouvrent les stratégies ministérielles et les initiatives de la BITD. Elle ne prétend pas à l'exhaustivité : plutôt que de recenser l'intégralité des actions engagées, elle vise à dégager des tendances de fond, illustrées par des exemples. L'évaluation de la pertinence des leviers mobilisés sera conduite dans une phase ultérieure du projet.

Plus fondamentalement, cette partie cherche à mettre en regard les transformations à l'œuvre au sein des armées et de la BITD, avec celles qu'implique la transition énergétique à l'échelle nationale, vues précédemment. Conflits d'usage sur les ressources, raréfaction de certains matériaux ou pièces, perte de compétences industrielles : le futur du secteur militaro-industriel ne peut être pensé indépendamment de l'impératif de décarbonation qui va impacter l'ensemble des filières. Faute de mise en perspective, leur trajectoire se heurtera inévitablement aux limites qu'impose la réalité des ressources disponibles. C'est précisément à cette articulation (entre capacité opérationnelle, souveraineté, résilience des forces, besoins du monde civil et viabilité physiques/économique de la trajectoire envisagée) que le programme DÉFENDRE entend apporter des éléments de réponse, dans un contexte instable où crises et accélération de la transition se superposeront avec une intensité croissante.

« Le changement climatique et la transition énergétique sont des sujets de transformation du monde, et donc un sujet géostratégique. »

Pierre Schill, chef d'état-major de l'armée de Terre, 4^{ème} conférence Climat & Défense (31 mars 2026)

A. Expérimentations et mesures dans le domaine énergétique

1. Des contraintes structurelles propres au secteur militaire

La complexité intrinsèque des programmes d'armement conduit à inscrire les décisions capacitaires dans des cycles très longs⁷⁵, se traduisant par une durée de vie du matériel militaire pouvant s'étendre de 20 à 50 ans (auquel on peut rajouter la phase de conception/développement). Ces processus sont encadrés par des échanges réglementés entre les armées, l'EMA, la DGA et les industriels. La transition vers des sources d'énergie moins fossiles (tant pour la mobilité que pour le bâti) relève donc nécessairement du moyen-long terme.

Cette contrainte est d'autant plus marquée qu'elle ne se limite pas à la seule dimension de l'approvisionnement : elle s'étend à l'ensemble du spectre capacitaire, à travers le prisme DORESE (doctrine, organisation, ressources humaines, équipements, soutien, entraînement). Réduire la dépendance aux énergies fossiles suppose en effet de repenser, sur toute la chaîne, non seulement l'approvisionnement, mais aussi la formation du personnel, le stockage, le transport et la distribution des énergies de substitution, le soutien logistique et les équipements qui les accompagnent etc. À cela s'ajoute la spécificité du contexte opérationnel : par exemple, la politique de carburant unique répond à des exigences de disponibilité en tout lieu et en toutes circonstances que les énergies alternatives ne satisfont pas encore pleinement à ce stade, ce qui impose de séquencer avec soin la transition pour ne pas compromettre la disponibilité de l'énergie opérationnelle. La vitesse d'adoption de nouvelles solutions est par ailleurs conditionnée par les exigences de sûreté et de fiabilité particulièrement élevées qui caractérisent le secteur militaire.

Sans avoir pour le moment la capacité d'en évaluer le potentiel, citons plusieurs mesures et expérimentations mises en place par les armées et les industries de défense sur le domaine énergétique.

2. Principaux leviers et expérimentations

Les leviers, mesures et expérimentations présentés ci-dessous ne constituent pas des recommandations du Shift Project. Ils sont issus de la littérature disponible ainsi que des entretiens réalisés dans le cadre du programme DÉFENDRE. À ce stade, nous ne prenons pas position sur leur pertinence, leur faisabilité ou leur caractère prioritaire. Notre objectif est de les soumettre à discussion afin de recueillir des retours, des compléments et des points de vigilance.

La suite du programme DÉFENDRE visera précisément à éclairer les choix technologiques, industriels et organisationnels permettant de concilier transition énergétique, souveraineté et maintien des capacités opérationnelles à long terme. Une attention particulière sera portée aux arbitrages et aux éventuels conflits d'usage entre les besoins de la Défense et ceux des autres secteurs de l'économie.

⁷⁵ Nécessité de conduire des phases de recherche et développement approfondies, définition précise du besoin opérationnel en amont, intégration dans des architectures de systèmes de forces, exigences d'interopérabilité avec les alliés, et parfois synchronisation difficile de programmes multinationaux aux calendriers divergents

a. Mobilité terrestre

Les systèmes d'armes en service, et à venir, sont plus puissants et plus consommateurs d'énergie (carburant et électricité), dans des volumes contraints. L'électrification constitue une piste prometteuse mais encore « trop coûteuse et pas suffisamment opérante » selon le rapport d'information sur les enjeux de la transition énergétique pour le ministère des Armées⁷⁶. Dans ce contexte, les armées envisagent à court terme une approche fondée sur l'hybridation des motorisations. Un démonstrateur sur le Griffon a été développé en 2025, avec des perspectives d'extension à d'autres plateformes (Véhicule blindé de combat d'infanterie – VBCI, camions, et à plus long terme Système principal de combat terrestre – SPCT).

Un véhicule militaire passant aujourd'hui « 60 % à 70 % de son temps à l'arrêt, moteur tournant, pour alimenter ses systèmes⁷⁷ », l'hybridation pourrait constituer un levier de réduction de la consommation de carburant en opération. D'autres bénéfices sont potentiellement attendus (usage du véhicule comme hub énergétique, réduction de la signature thermique et acoustique, etc.) mais restent encore à démontrer. Cette évolution devra en outre surmonter plusieurs freins structurels. Sur le plan logistique, elle implique une transition progressive d'une chaîne d'approvisionnement centrée sur les carburants vers des systèmes hybrides intégrant électricité et carburants alternatifs. Sur le plan capacitaire, elle suppose le déploiement d'infrastructures de production et de recharge adaptées aux contraintes des théâtres d'opération. Enfin, plusieurs points de vigilance demeurent : la sécurité des batteries, notamment en conditions extrêmes, la dépendance aux matériaux critiques, ainsi que le surcoût associé à l'hybridation⁷⁸.

b. Mobilité aérienne

Concernant la mobilité aérienne, le carburéacteur à usage aéronautique représentant près de la moitié de la consommation en carburant des armées, cet enjeu sera central dans toute stratégie de réduction de la dépendance aux fossiles.

Trois types de leviers complémentaires peuvent être mobilisés. Le premier est la sobriété/frugalité, revenant à limiter les besoins en carburant. Cela peut passer par une réduction du temps de vol effectif (par exemple, par le recours accru à la simulation — un vecteur déjà investi par les armées françaises, mais dont le potentiel de substitution au vol réel reste à objectiver⁷⁹). Le deuxième levier est l'efficacité énergétique : par exemple, améliorer les performances des motorisations et des cellules, ou dans une autre dimension optimiser l'usage opérationnelle du système de force⁸⁰. Le troisième est la substitution technologique, c'est-à-dire le changement de vecteur énergétique (carburants synthétiques, hydrogène ou la propulsion hybride pour certains types d'aéronefs).

⁷⁶ Cour des comptes, *Documents parlementaires – Rapport d'information n° 4145*, Assemblée nationale, s.d., https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/cion_def/l15b4145_rapport-information

⁷⁷ Ordre de grandeur donné par François Deloumeau, expert énergie chez Arquus.

⁷⁸ Bertrand Toujouse, Guillemette Chevreau, « Énergies sur le champ de bataille aéroterrestre : état des lieux et perspectives », FMES, 27 mai 2026. <https://fmes-france.org/energies-sur-le-champ-de-bataille-aeroterrestre-etat-des-lieux-et-perspectives-2/>

⁷⁹ L'AAE recourant déjà largement à la simulation, le potentiel de gains supplémentaires pourrait être limité.

⁸⁰ Stéphane Audrand (historien, officier de réserve et consultant en risques), propos rapportés : « *Une autre piste semble être l'optimisation opérationnelle du système de forces. Concentrer les aéronefs de haute valeur sur les missions qui le justifient, recourir à des plateformes légères pour des tâches moins exigeantes, ou substituer des frappes balistiques à des missions aériennes dans la profondeur sont autant d'arbitrages qui réduisent la consommation globale non par amélioration technique, mais par une approche non linéaire du modèle de forces (logique déjà à l'œuvre dans les réflexions sur la réduction des coûts et de l'empreinte logistique).* »

Sur ce dernier point, le ministère des Armées s'est engagé à suivre la feuille de route nationale, portée par la Direction générale de l'aviation civile (DGAC), pour l'incorporation de 50% de SAF dans les aéronefs à horizon 2050. Cet objectif ambitieux soulève néanmoins plusieurs questions : l'industrie sera-t-elle en capacité d'opérer la transition technologique nécessaire pour être en mesure de produire les volumes attendus ? Les matières premières (biomasse notamment) pour produire les volumes de SAF attendus seront-elles disponibles ? Seront-elles en concurrence avec d'autres secteurs stratégiques ? Si oui, les armées doivent-elles bénéficier d'un arbitrage en leur faveur pour l'allocation de ressources stratégiques à la réalisation des activités opérationnelles ? Enfin, les pouvoirs publics doivent-ils investir massivement dans la filière afin de soutenir le développement d'une production énergétique souveraine ?

Encadré 3 – Pouvoir voler sans pétrole : quel approvisionnement énergétique pour le secteur aérien ?

La réduction de la dépendance aux énergies fossiles pour la mobilité aérienne se heurte à des contraintes physiques (*Pouvoir voler sans pétrole*⁸¹, Aéro Décarbo / Shift Project, février 2026). Les carburants de substitution au carburéacteur fossile — biocarburants (bioSAF) et carburants synthétiques (e-SAF) — sont présentés comme les vecteurs privilégiés de la transition de l'aviation. Or, ces carburants ne seront pas disponibles en quantité suffisante à temps pour répondre à l'accroissement de la demande de transport aérien et le remplacement du kérosène fossile, même avec les hypothèses les plus optimistes d'amélioration de l'efficacité des avions. Les deux filières sont confrontées à des limites physiques distinctes mais également contraignantes : les bioSAF dépendent d'une biomasse dont le potentiel est limité par les surfaces disponibles, les conditions climatiques et la concurrence entre usages (alimentation, matériaux, décarbonation d'autres secteurs) tandis que les e-SAF nécessitent de déployer massivement des capacités de production d'électricité bas-carbone.

Respecter les seuls mandats ReFuelEU (taux d'incorporation de 70% de SAF d'ici 2050) imposerait de consacrer chaque année 110 TWh d'électricité à l'aérien civil (soit 20 % de la production électrique actuelle de la France) et 30 % de la biomasse résiduelle valorisable en biocarburant, uniquement pour l'aviation. Dans ce contexte de ressources contraintes, l'aviation militaire se trouvera en compétition directe avec le secteur civil pour accéder aux mêmes substituts au kérosène⁸².

Or, comme rappelé dans la section II.A.2, la disponibilité physique du pétrole/kérosène en quantité suffisante est elle-même appelée à se réduire : la déplétion progressive des gisements (en Europe et auprès de nos principaux fournisseurs⁸³) et la concentration géographique de la production exposent les armées à des risques économiques, géopolitiques et physiques importants. Dépendre durablement du pétrole importé auprès de compétiteurs économiques et politiques ne constitue donc pas une solution de repli viable pour l'autonomie stratégique. Les substituts au kérosène fossile — biocarburants, e-SAF — sont dès lors incontournables à moyen terme, mais leur disponibilité physique sera elle-même contrainte et disputée. Se posent alors, de manière inévitable, des questions d'arbitrages politico-économiques : par exemple, quelle part de la

⁸¹ The Shift Project, *Pouvoir voler sans pétrole : quel approvisionnement énergétique pour le secteur aérien ? (rapport final)*, Paris, The Shift Project, 2026, <https://theshiftproject.org/publications/pouvoir-voler-sans-petrole-rapport-final/>

⁸² En cas de conflit, la demande de transport aérien civil peut être amenée à chuter fortement comme dans le cas du conflit russo-ukrainien.

International Air Transport Association (IATA), *The impact of the conflict between Russia and Ukraine on aviation*, s.d., <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/the-impact-of-the-conflict-between-russia-and-ukraine-on-aviation/>

⁸³ The Shift Project, *Pétrole : risques d'approvisionnement en Europe*, Paris, The Shift Project, s.d., <https://theshiftproject.org/publications/petrole-risques-approvisionnements-europe/>

biomasse nationale allouer à l'aviation militaire plutôt qu'à l'agriculture ou au chauffage ? Quelle fraction de l'électricité bas-carbone fléchir vers la production de carburants de synthèse plutôt que vers l'industrie ou les transports terrestres ? Ces arbitrages ne relèvent pas uniquement de la logique de marché — ils appellent une planification explicite, à l'échelle nationale comme européenne, dans laquelle les besoins des armées devront être anticipés et sanctuarisés.

c. Mobilité navale

Enfin, concernant la mobilité navale, les grands navires militaires français restent majoritairement dépendants de la propulsion diesel fossile (les bâtiments nucléaires constituant une exception).

A court terme et sur les technologies embarquées, plusieurs leviers sont identifiés, dont le potentiel sera à évaluer : optimisation (par exemple, des carènes et des hélices), propulsion hybride/électrique, alimentation électrique des navires via le réseau à quai, recours accru aux batteries et au stockage électrique, notamment pour les engins modestes. L'électricité est présentée comme un vecteur d'avenir structurant, notamment pour l'alimentation des systèmes d'armes à haute consommation, comme les armes à énergie dirigée ou les capteurs de plus en plus puissants.

Après 2030, il est prévu que le biométhane et les e-carburants (méthane synthétique, e-méthanol) puissent prendre le relais⁸⁴. Les biocarburants sont généralement présentés comme directement compatibles avec les moteurs existants. Ces perspectives appellent toutefois des réserves similaires à celles formulées pour l'aviation (cf. section précédente). Les substituts aux carburants fossiles dans le secteur naval (biométhane, e-méthane, biocarburants) reposent en effet sur des ressources dont la disponibilité à moyen terme est contrainte et soumise à des arbitrages intersectoriels.

Le biométhane et les e-carburants entrent ainsi en concurrence avec d'autres usages, notamment industriels, résidentiels (chauffage) et aéronautiques, pour l'accès aux mêmes gisements de biomasse ainsi qu'aux capacités de production d'électricité bas-carbone. Dans ce contexte, plusieurs questions demeurent ouvertes : celle de la maturité technologique des solutions envisagées, celle des conditions et du rythme de leur déploiement, et enfin celle de la hiérarchisation des usages, notamment en ce qui concerne l'allocation des ressources entre propulsion navale militaire et autres secteurs.

d. Infrastructures : une transition engagée mais encore partielle

Le patrimoine immobilier militaire représente environ 25 % de la consommation énergétique du ministère des Armées, dont près de la moitié reposait encore sur des énergies fossiles, notamment du gaz, en 2021. Pilotée par le Service d'infrastructure de la défense (SID) et la Direction des territoires, de l'immobilier et de l'environnement (DTIE), la transition énergétique des infrastructures militaires s'appuie depuis 2010 sur la Stratégie ministérielle de transition énergétique, mise à jour en 2025 (SMTE 2025-2030). Elle vise à sortir du fioul dans les infrastructures à horizon 2031, à réduire les consommations, améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, développer les énergies renouvelables. Cela se traduit par la mise en œuvre de contrats de performance énergétique, déploiement photovoltaïque sur le

⁸⁴ Ibid.

foncier militaire, expérimentation d'autoconsommation ou développement du biogaz sur certaines emprises⁸⁵.

Pour rappel et selon la Cour des comptes⁸⁶, la consommation énergétique des infrastructures du ministère a diminué d'environ 20 % entre 2010 et 2021.

B. Des évolutions technologiques aux implications énergétiques difficilement quantifiables

L'essor de nouvelles technologies est susceptible de reconfigurer les dépendances énergétiques des armées. S'il demeure à ce stade difficile de quantifier précisément ces évolutions et de déterminer si elles relèvent d'une substitution des besoins existants ou d'un ajout de nouvelles demandes, il est néanmoins possible d'identifier plusieurs dynamiques et technologies appelées à jouer un rôle.

1. Dronification et « guerre réseau-centrée » : vers une électrification massive du champ de bataille ?

L'essor des systèmes autonomes et la systémisation des armements constituent l'une des transformations les plus structurantes du champ de bataille contemporain. Cette évolution s'inscrit dans la dynamique de la « guerre réseau centrée » amorcée dans les années 1970-1980 aux États-Unis, qui a profondément reconfiguré la façon de faire la guerre⁸⁷. Le recours massif aux drones, mis en lumière par le conflit russo-ukrainien, inscrit cette dynamique dans une tendance plus longue⁸⁸.

Si cette évolution peut, dans certains cas, réduire la dépendance aux carburants fossiles en favorisant des formes d'électrification, elle tend également à déplacer les dépendances énergétiques vers d'autres ressources et infrastructures : électricité, batteries, composants électroniques, métaux critiques et capacités numériques.

Longtemps cantonnés à des fonctions spécialisées, les drones occupent désormais un spectre très large d'usages militaires : renseignement, surveillance, frappes tactiques, guerre électronique, logistique ou appui aux forces terrestres. Cette diversité se traduit par une multiplication des plateformes : drones FPV (first-person view) utilisés pour les frappes à courte portée, UAV de surveillance et de frappe de précision comme le Reaper américain ou le Bayraktar TB2 turc, drones de combat autonomes (UCAV) tels que le Neuron de Dassault,

⁸⁵ Par exemple sur le camp militaire de Canjuers, le SID et Dalkia ont signé un CPE de vingt ans pour ce site du Haut-Var. Le contrat prévoit une réduction de 43 % de la consommation énergétique d'ici 2027, avec un recours aux énergies renouvelables représentant 51 % du mix énergétique du camp. Les travaux comprennent une chaufferie biomasse alimentée en circuit court par les déchets de bois du camp, un champ solaire thermique de 3 250 m², la rénovation du réseau de chaleur et l'isolation des bâtiments les plus énergivores, pour une économie estimée à deux millions d'euros par an sur la facture énergétique.

Dalkia, *Canjuers : première pierre d'un contrat de performance énergétique pour le camp militaire*, Paris, Dalkia, 2025, <https://www.dalkia.fr/presse/canjuers-premiere-pierre/>

⁸⁶ Cour des comptes, *Le ministère des Armées face aux défis du changement climatique*, rapport public thématique, Paris, Cour des comptes, 2024, <https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2024-03/20240312-RPA-2024-CDVI-ministere-armee-face-defis-changement-climatique.pdf>

⁸⁷ Sophie Lefeez (chercheuse associée à l'IRIS et CETCOPRA), propos rapportés.

⁸⁸ Sophie Lefeez (chercheuse associée à l'IRIS et CETCOPRA), propos rapportés : « *La montée en puissance des systèmes d'armes s'est accompagnée d'une électrification croissante des matériels militaires, liée à l'exigence accrue de précision, de fiabilité et de respect du droit des conflits armés. Cette évolution favorise une approche systémique des opérations, caractérisée par la multiplication des capteurs, des moyens de renseignement, des satellites et des systèmes de communication, entraînant une augmentation des besoins énergétiques associés.* »

munitions rôdeuses, drones cargo, ainsi que drones terrestres et navals dont l'usage progresse rapidement.

Les drones reposent sur des architectures énergétiques variées : moteurs thermiques, systèmes hybrides ou propulsion entièrement électrique. Ces dernières jouent un rôle central, en particulier pour les drones de petite taille. Elles constituent à la fois la source d'énergie principale permettant le fonctionnement du drone et un facteur déterminant de son autonomie et de sa charge utile. La montée en puissance des drones, notamment FPV, accroît les besoins en batteries, composants électroniques, semi-conducteurs et métaux critiques, au sein de chaînes de valeur largement dominées par la Chine.

Selon Stéphane Audrand, consultant en risques internationaux, historien et officier de réserve dans la Marine nationale, le développement de systèmes non habités ouvre un espace important à l'électrification de certains usages militaires, notamment pour les drones terrestres et navals, plus propices aux architectures hybrides. Cette évolution tient en partie à la disparition des contraintes d'habitabilité : un système sans équipage embarqué nécessite moins de masse, de protection et de puissance motrice qu'un véhicule habité — réduisant ainsi les besoins en puissance au point de rendre viables des architectures électriques ou hybrides, aujourd'hui encore pénalisées par la densité énergétique limitée des batteries.

À ce stade, les implications énergétiques globales de cette transformation demeurent encore difficiles à quantifier. Il n'existe pas, à notre connaissance, d'évaluation consolidée des besoins électriques supplémentaires induits par la multiplication des drones et des systèmes autonomes en opération.

2. Numérisation croissante, intelligence artificielle et data

La numérisation croissante du champ de bataille, la multiplication des capteurs / données associées à l'essor récent de l'IA militaire constituent une autre dynamique susceptible de transformer profondément les dépendances énergétiques des armées.

L'IA est désormais mobilisée dans de nombreux domaines militaires : traitement automatisé du renseignement, analyse d'images et de données massives, aide à la décision tactique, coordination de systèmes autonomes ou encore optimisation de la planification opérationnelle. Plus largement, la montée en puissance du C4ISR (Command, Control, Communication, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance) repose sur l'intégration croissante des capteurs, des systèmes de communication et des capacités de calcul au sein de réseaux numériques interconnectés.

Les besoins énergétiques associés à cette évolution technologique majeure pourraient être considérables. En effet, les capacités d'intelligence artificielle reposent sur des infrastructures physiques lourdes : centres de données, réseaux de télécommunications, capacités de calcul haute performance, systèmes de refroidissement et alimentation électrique continue. Selon les travaux du Shift Project sur les centres de données et l'intelligence artificielle (2025), la consommation électrique mondiale des data centers atteignait environ 530 TWh en 2023, et pourrait atteindre jusqu'à 3 000 TWh en 2035. En France, les centres de données représentent aujourd'hui environ 2 % de la consommation électrique nationale, une part susceptible d'atteindre 7,5 % à horizon 2035. Cette dynamique soulève des enjeux croissants de disponibilité électrique, mais également de refroidissement et d'accès à l'eau.

Ces évolutions pourraient générer de nouveaux conflits d'usage sur les infrastructures énergétiques et numériques. Le développement simultané de l'IA, de l'électrification des transports, de la décarbonation industrielle et des besoins militaires pourrait accentuer les tensions sur les réseaux électriques et les capacités de production bas-carbone. Certaines situations observées à l'étranger illustrent déjà ces limites : en Irlande, la forte consommation électrique des data centers a conduit les autorités à limiter le développement de nouveaux projets afin de préserver la stabilité du réseau électrique.

Les besoins en électricité, en composants électroniques et en infrastructures numériques du secteur de la défense restent à ce jour très peu documentés. Dans le cadre des travaux à venir, nous nous interrogerons sur l'impact du recours au numérique et des nouvelles technologies sur les consommations énergétiques des armées. Dans quelle mesure ces technologies permettent-elles d'améliorer l'efficacité opérationnelle et le rapport entre les effets militaires produits et les ressources énergétiques mobilisées ? À l'inverse, les consommations associées aux infrastructures numériques, aux équipements électroniques et au traitement des données pourraient-elles en partie contrebalancer ces gains ?

3. Spatial : un essor dimensionnant ?

L'espace occupe une place de plus en plus centrale dans les capacités militaires contemporaines. Les infrastructures spatiales jouent un rôle essentiel dans de nombreuses fonctions critiques : renseignement d'origine électromagnétique et image, alerte avancée, communications sécurisées, géolocalisation, synchronisation des systèmes, guidage des armements ou encore transmission de données.

Cette militarisation croissante de l'espace repose toutefois sur des infrastructures industrielles, numériques et énergétiques particulièrement complexes. La fabrication des satellites mobilise des chaînes d'approvisionnement consommatrices de ressources : électronique avancée, semi-conducteurs, métaux critiques, matériaux spécialisés ou capacités industrielles de haute précision. À cela s'ajoutent les infrastructures au sol nécessaires au fonctionnement des systèmes spatiaux : centres de contrôle, stations de communication, réseaux de télécommunications, capacités de calcul et centres de données permettant le traitement des flux massifs d'informations produites.

Enfin, la multiplication des satellites, l'augmentation des volumes de données collectées et l'intégration croissante de l'intelligence artificielle dans les capacités spatiales pourraient entraîner une hausse des besoins énergétiques associés au traitement, au stockage et à la transmission de l'information, sans que l'on soit en mesure de la quantifier pour le moment.

C. La transition énergétique : quels risques et opportunités pour le secteur de la défense ?

La transition énergétique en cours engage une transformation profonde de l'ensemble des systèmes économiques et sociaux : systèmes énergétiques, structures industrielles, infrastructures, dynamiques d'emploi, innovation technologique ou encore organisation des territoires. Ce processus de décarbonation, qui implique de réduire drastiquement la dépendance aux hydrocarbures, s'accompagne de ce que *The Shift Project* désigne comme des « risques de transition ». Ceux-ci recouvrent l'ensemble des risques associés à la restructuration des modes de production et de consommation

nécessaires à l'émergence d'une économie bas-carbone. Dans la mesure où les sociétés contemporaines sont largement organisées autour de l'usage massif des énergies fossiles, cette transition implique des transformations systémiques, parfois coûteuses et complexes, susceptibles de générer des déséquilibres temporaires.

Ces risques se déclinent à plusieurs niveaux. Pour les acteurs économiques, ils incluent des risques réglementaires et politiques (durcissement des normes, tarification du carbone), des risques technologiques (coûts d'adaptation ou d'obsolescence des équipements existants), ainsi que des risques de marché et de réputation (évolution de la demande, pression sociétale). À l'échelle des sociétés, si la transition permet à terme de réduire les risques physiques liés au changement climatique, elle peut également engendrer des recompositions territoriales, des mutations de l'emploi ou des tensions sociales liées à l'adaptation des modes de vie. Elle ouvre néanmoins des opportunités, notamment en matière d'innovation, de sobriété et de développement de nouveaux modèles économiques plus durables.

Dans ce contexte, si le secteur de la défense s'engageait plus lentement que le reste de l'économie dans cette transition, il pourrait être exposé à une série de vulnérabilités spécifiques, affectant ses capacités opérationnelles, sa base industrielle et donc son fonctionnement global. Ces enjeux justifient d'analyser plus en détail en quoi les risques de transition constituent un sujet stratégique à part entière pour les armées.

1. Les risques d'un décrochage du secteur de la défense dans la transition énergétique avec le secteur civil

a. Energie et infrastructures

Un décalage prolongé entre les trajectoires civile et militaire en matière de transition énergétique pourrait exposer le secteur de la défense à de nouvelles vulnérabilités, *a fortiori* en cas d'engagement des forces⁸⁹.

Dans un contexte de baisse de la demande civile, le maintien d'infrastructures pétrolières (stations-services, dépôts, ports pétroliers, pipeline etc.) pourrait engendrer *a minima* des coûts plus élevés, si ce n'est un désinvestissement des acteurs financiers et l'apparition d'actifs échoués.

Ce risque a notamment été identifié par l'Union des stockistes industriels (USI) de pétrole et leur délégué général, Jean-Charles Ferré (par ailleurs ancien directeur du Service de l'énergie opérationnelle). Dans une étude prospective commandée par l'USI fondée sur les trajectoires de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), il apparaît qu'à horizon 2040, une baisse d'environ 50 % de la consommation de produits pétroliers pourrait s'accompagner d'une diminution équivalente des besoins de stockage, avec de fortes disparités territoriales selon les zones de défense.

Dans ce contexte, les opérateurs de stockage (dont les modèles économiques reposent essentiellement sur des logiques de rentabilité) pourraient être incités à anticiper la fermeture de certaines infrastructures avant même que les besoins militaires n'aient effectivement disparu, en particulier si les contraintes réglementaires et économiques s'intensifient. Ce risque est d'autant plus préoccupant que les infrastructures de stockage pétrolier n'ont

⁸⁹ La Revue nationale stratégique 2025 (confirmée dans la révision de la LPM 2024-2030) fait de l'hypothèse d'un engagement majeur de haute intensité un scénario central de planification.

historiquement pas été conçues ni maillées en tenant compte des besoins militaires spécifiques.

Il en résulte un risque critique de désalignement entre l'offre et la demande : des capacités de stockage pourraient disparaître prématurément, fragilisant la sécurité d'approvisionnement des armées. Ce décalage pourrait être exacerbé en cas de conflit de haute intensité, « *où la consommation énergétique des armées pourraient être multipliée par dix ou plus* » (Jean-Charles Ferré). Des pistes de reconversion sont envisagées (notamment vers le stockage d'énergies liquides alternatives ou la valorisation de sites déjà industrialisés) mais elles restent incertaines.

En outre, s'il existe d'après Stéphane Audrand (consultant en risques internationaux et historien) « *une obsession des armées pour la question de l'énergie et la sécurisation des approvisionnements depuis longtemps* », celles-ci ont historiquement pu relativiser leur vulnérabilité directe, « *parce que leur consommation est faible [comparativement à l'économie française] et qu'elles seront prioritaires en cas de problème* ». Ce raisonnement apparaît de moins en moins valide dans le contexte stratégique actuel. Comme le souligne la révision de la loi de programmation militaire, les armées évoluent désormais dans un environnement marqué par la simultanéité et l'imbrication des crises⁹⁰. Dans un tel contexte, des dispositifs reposant sur quelques mois de stockage pourraient s'avérer insuffisants, notamment en cas de perturbations prolongées ou systémiques affectant l'ensemble de la chaîne énergétique.

b. Compétences et maintien en condition opérationnelle (MCO)

Une transition énergétique civile insuffisamment anticipée par les armées pourrait entraîner un décalage croissant entre l'évolution du tissu industriel civil et les besoins opérationnels des forces., avec des variations suivant le segment⁹¹. « *Ce risque est d'autant plus prégnant que les armées françaises sont dépendantes des technologies civiles : la chaîne d'approvisionnement militaire — pièces détachées pour le Griffon, le Serval et autres plateformes — repose largement sur des équipementiers amont dont l'activité principale reste la voiture et le camion* » d'après Stéphane Audrand, consultant en risques internationaux et historien. Or, à mesure que ces acteurs se réorientent vers des solutions bas-carbone, certaines chaînes de production thermiques pourraient progressivement disparaître, contraignant les armées à maintenir des savoir-faire spécifiques à un coût croissant et à supporter les surcoûts structurels liés à la production en petites séries. Ce risque a notamment été souligné dans un rapport de la Cour des comptes⁹².

Ce décalage pourrait enfin affecter l'interopérabilité entre alliés, en raison des divergences de rythme dans la transition énergétique et de l'évolution des infrastructures civiles

⁹⁰ « L'évolution des champs de conflictualité, combinée à une plus grande simultanéité et imbrication des crises, appellent une approche plus globale de la réponse nationale de défense et de sécurité. Le réarmement de la France doit, ainsi, aller de pair avec une plus forte promotion de notre résilience collective (...). »

Ministère des Armées, *Actualisation de la loi de programmation militaire 2024-2030 – Avril 2026*, Paris, Ministère des Armées, 2026, <https://www.defense.gouv.fr/sites/default/files/ministere-armees/Actualisation%20de%20la%20LPM%202024-2030%20-%20Avril%202026.pdf>

⁹¹ Pour la suite des travaux, une distinction pourra être faite entre les activités délimitées au territoire national et celles issues des OPEX.

⁹² Cour des comptes, *Le ministère des Armées face aux défis du changement climatique*, rapport public thématique, Paris, Cour des comptes, mars 2024,

<https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2024-03/20240312-RPA-2024-CDVI-ministere-armee-face-defis-changement-climatique.pdf>

sous-jacentes — un enjeu collectif qui dépasse le seul périmètre national, bien que partiellement encadré par la capacité normative de l'OTAN.

L'électrification progressive des véhicules civils, des voitures particulières aux poids lourds, pourrait transformer en profondeur les chaînes d'approvisionnement, les compétences et les capacités industrielles liées aux motorisations thermiques. À mesure que les acteurs civils se réorientent vers l'électrique, certaines filières de production et de maintenance des moteurs à combustion pourraient se contracter. **Les armées, dont une partie des équipements reposera encore durablement sur ces technologies, pourraient alors se retrouver confrontées à un tissu industriel moins dense, des savoir-faire plus rares et à des coûts potentiellement plus élevés — *a fortiori* en situation de conflit prolongé, où la résilience industrielle constitue une condition de survie opérationnelle.**

c. Autres enjeux : pétrochimie et matières premières, enjeux réglementaires, financiers et risques réputationnels

La dépendance du secteur de la défense aux énergies fossiles s'étend également aux matières premières et aux intrants chimiques dérivés du pétrole. De nombreux composants indispensables à la BITD sont en effet issus de la pétrochimie : explosifs, propergols, lubrifiants haute performance, polymères techniques, revêtements protecteurs, matériaux composites, isolants électriques. La transition énergétique, en réduisant structurellement la production et le raffinage d'hydrocarbures, pourrait affecter la disponibilité et le coût de ces intrants, dont les filières de substitution biosourcées ou synthétiques sont encore pour partie immatures.

Aussi, la transition énergétique s'accompagne d'un corpus réglementaire. D'une part, certaines dispositions s'appliquent de manière indiscriminée, sans exemption militaire : normes sur les émissions industrielles, réglementations sur les substances chimiques (REACH⁹³), obligations de reporting carbone ou contraintes sur les installations classées. Ces réglementations peuvent générer des surcoûts directs ou compliquer les procédures d'homologation de certains équipements, même si elles donnent aussi de la visibilité sur les chaînes d'approvisionnement et leurs risques.

D'autre part, le secteur militaire recourt encore à des exemptions réglementaires sur des sujets particuliers, comme les normes d'émissions des véhicules, ou vis-à-vis de certaines contraintes environnementales opérationnelles. Si ces exemptions préservent à court terme la liberté d'action des armées, elles comportent un risque à moyen et long terme : lorsque le marché civil bascule vers de nouveaux standards technologiques, les industriels désinvestissent progressivement les segments exemptés (cf. partie précédente).

À ces dynamiques, s'ajoutent des effets d'éviction économique et financier. Les industriels pourraient privilégier des marchés civils plus attractifs et mieux alignés avec les exigences environnementales, tandis que les flux d'investissement pourraient se détourner du secteur de la défense. Enfin, ces évolutions pourraient affecter l'acceptabilité sociale des armées : une perception d'injustice climatique, liée à un traitement différencié entre secteurs civil et militaire, pourrait peser sur la légitimité des dépenses de défense et sur les capacités de recrutement. Comme le souligne la Cour des

⁹³ Ministères de la Transition écologique, de l'Aménagement du territoire, des Transports, de la Ville et du Logement, *Règlement REACH*, Paris, Ministère de la Transition écologique, s.d., <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/reglement-reach>

comptes⁹⁴, cette divergence croissante pourrait avoir des effets cumulatifs, tant sur les conditions d'approvisionnement que sur l'attractivité du secteur.

Dans l'ensemble, ces différents éléments suggèrent qu'un décalage prolongé entre les trajectoires civile et militaire en matière de transition énergétique pourrait engendrer des risques systémiques, dont les effets seraient à la fois progressifs et cumulatifs. Il convient alors au secteur de s'emparer pleinement de la question, afin de faire de la transition énergétique un atout stratégique et non une contrainte exogène subie.

2. Les opportunités d'un engagement actif dans la transition énergétique

Dans l'hypothèse où le secteur de la défense réussissait à opérer sa transition énergétique, cet engagement pourrait ouvrir des opportunités sur le plan opérationnel (une posture d'ailleurs reprise par la SED, qui veut « *faire de la transition énergétique un atout opérationnel* »). Sans pouvoir pour le moment être exhaustif et affirmatif dans les co-bénéfices apportés par la transition, citons quelques tendances.

L'intégration de technologies électrifiées ou hybrides offre plusieurs avantages opérationnels : réduction des signatures acoustiques et thermiques, meilleure autonomie, et alimentation des systèmes embarqués sans solliciter le moteur thermique. À cela s'ajoute la possibilité d'adopter une architecture motrice distribuée offrant une meilleure répartition des masses et une résilience accrue en cas de panne⁹⁵.

Les technologies renouvelables déployables en opération (panneaux solaires par exemple) offrent des gains logistiques réels, bien que limités. En base avancée, 60 à 70 % du carburant convoyé sert à produire de l'électricité et de la chaleur⁹⁶. Sur cette fraction, les ENR peuvent avoir un rôle, en réduisant les flux de ravitaillement et l'exposition des convois logistiques.

Cet engagement pourrait également favoriser un rapprochement entre l'économie civile et militaire. En s'inscrivant dans des dynamiques technologiques communes, les armées pourraient bénéficier des innovations issues du secteur civil sans en supporter l'intégralité des coûts de R&D — l'Agence Innovation Défense jouant le rôle d'interface pour identifier et incorporer les avancées pertinentes. Un engagement plus poussé dans la transition énergétique pourrait en outre renforcer l'attractivité du secteur de la défense, notamment auprès des nouvelles générations, pour lesquelles les enjeux environnementaux occupent une place croissante. D'un point de vue réputationnel, une posture proactive en matière de transition pourrait ainsi contribuer à renforcer l'image des institutions militaires auprès de la société civile.

Sur le plan économique, la transition énergétique pourrait s'accompagner d'effets contrastés mais globalement favorables à moyen et long terme, *a fortiori* avec l'inflation des énergies fossiles. Des investissements initiaux significatifs seraient nécessaires — en particulier pour

⁹⁴ Cour des comptes, *Le ministère des armées face aux défis du changement climatique*, rapport public thématique, Paris, Cour des comptes, 2024, <https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2024-03/20240312-RPA-2024-CDVI-ministere-armee-face-defis-changement-climatique.pdf>

⁹⁵ François Deloumeau (expert énergie chez Arquus), propos rapportés.

Tadjdeh, Yasmin, « Army Driving Forward with Electric Vehicle Plans », *National Defense Magazine*, 21 février 2019, <http://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2019/2/21/army-driving-forward-with-electric-vehicle-plans>

⁹⁶ Fondation pour la Recherche Stratégique, « Opérations extérieures : vers des bases plus autonomes et plus économes en énergie fossile », *Défense & Industries*, n° 7, 2021.

la rénovation des infrastructures ou l'électrification de certains équipements — mais ceux-ci seraient compensés par des gains d'efficacité énergétique⁹⁷.

Dans l'ensemble, un engagement actif du secteur de la défense dans la transition énergétique pourrait constituer un vecteur de modernisation et de renforcement capacitaire, en cohérence avec les évolutions du contexte technologique, économique et sociétal.

Encadré 4 – Sur le plan de l'indépendance et de la résilience énergétique, toutes les énergies ne se valent pas

Les énergies fossiles et l'énergie nucléaire partagent une caractéristique commune : ce sont des **énergies de stock**, dont la production est conditionnée à un approvisionnement continu en combustible. La nature de cette dépendance diffère cependant sensiblement selon la filière⁹⁸.

Pour les **énergies fossiles**, les réserves stratégiques européennes ne couvrent que quelques mois de consommation — environ trois mois pour le pétrole, et un peu plus d'un tiers de la consommation annuelle pour le gaz naturel en France⁹⁹. L'approvisionnement fonctionne donc structurellement en flux tendu, ce qui expose l'économie à des tensions à court terme en cas de crise géopolitique ou de disruption des routes d'approvisionnement. Ces tensions peuvent être de plus accentuées par le comportement des acteurs économiques. Le nucléaire présente à cet égard un profil de risque différent : la densité énergétique de l'uranium (un kilogramme contient environ 12 000 fois plus d'énergie qu'un kilogramme de charbon¹⁰⁰) permet de constituer des stocks physiquement compacts et représentant plusieurs années de production. En France, les réserves disponibles représenteraient potentiellement jusqu'à dix ans de fonctionnement du parc national selon Orano, multinationale du secteur détenu à 90 % par l'État français².

Les **énergies renouvelables** sont, quant à elles, des énergies de flux. Une fois l'infrastructure déployée, barrage hydroélectrique, éoliennes ou panneaux photovoltaïques captent pendant plusieurs décennies un flux naturel (vent ou rayonnement solaire par exemple) sans nécessiter d'approvisionnement en combustible.

Pour l'éolien et le photovoltaïque, les conséquences d'une interruption des livraisons de composants depuis la Chine (qui représente aujourd'hui environ 80 % de la production mondiale de panneaux solaires¹⁰¹) seraient néanmoins atténuées par la longévité de ces infrastructures. Selon l'ADEME¹⁰², une éolienne standard affiche une durée de vie moyenne de 20 à 25 ans, tandis qu'un panneau photovoltaïque produit de l'électricité pendant une durée moyenne de 25 à 30 ans¹⁰³. Ces

⁹⁷ Dalkia, *Canjuers : première pierre d'un contrat de performance énergétique pour le camp militaire*, Paris, Dalkia, s.d., <https://www.dalkia.fr/presse/canjuers-premiere-pierre/>

⁹⁸ Joly, Alexandre, « Dépendance énergétique et risques géopolitiques », *The Other Economy*, 2 octobre 2025, <https://theothereconomy.com/fr/fiches/dependance-energetique-et-risques-geopolitiques/>

⁹⁹ Pour le pétrole, la réglementation européenne (directive 2009/119/CE) et les recommandations de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) imposent aux États membres de maintenir des stocks stratégiques équivalents à au moins 90 jours d'importations nettes journalières. En France, ces stocks sont gérés par la Société anonyme de gestion des stocks de sécurité (SAGESS), sous contrôle de l'État. Pour le gaz, la France dispose de 130 TWh de capacités de stockage souterrain de gaz naturel, ce qui représente un peu moins d'un tiers de sa consommation annuelle.

Commission de régulation de l'énergie (CRE), *Stockage du gaz naturel*, s.d., <https://www.cre.fr/gaz/reseaux-de-gaz-naturel/stockage.html>

¹⁰⁰ Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), *L'énergie nucléaire*, s.d., <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/energie.aspx>

¹⁰¹ Le Monde, « La Chine, hyperpuissance de la transition écologique », *Le Monde*, 13 juillet 2025, https://www.lemonde.fr/economie/article/2025/07/13/la-chine-hyperpuissance-de-la-transition-ecologique_6620973_3234.html

¹⁰² Agence de la transition écologique (ADEME), *ADEME Le Mag n°129*, Paris, ADEME, 2024, https://www.ademe.fr/wp-content/uploads/2024/12/ademe_le_mag_n129_p-p_bd-1.pdf

¹⁰³ Ministère de la Transition écologique, *Énergie solaire*, Paris, Ministère de la Transition écologique, s.d., <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/solaire>

durées de vie impliquent qu'en l'absence de tout approvisionnement nouveau, seule une fraction du parc installé (de l'ordre de 3 à 5 % par an¹⁰⁴) arriverait en fin de vie chaque année. Des contraintes peuvent toutefois apparaître à plus court terme sur la maintenance de certains équipements et à moyen terme pour renouveler le parc ou répondre à une demande énergétique croissante.

A ce titre, il convient également de noter que les énergies renouvelables sont des infrastructures industrielles, qu'il est possible de produire sur le territoire national à long terme, sous réserve de développement d'une filière adéquate. Au contraire, les énergies fossiles reposent sur une ressource naturelle très inégalement distribuée.

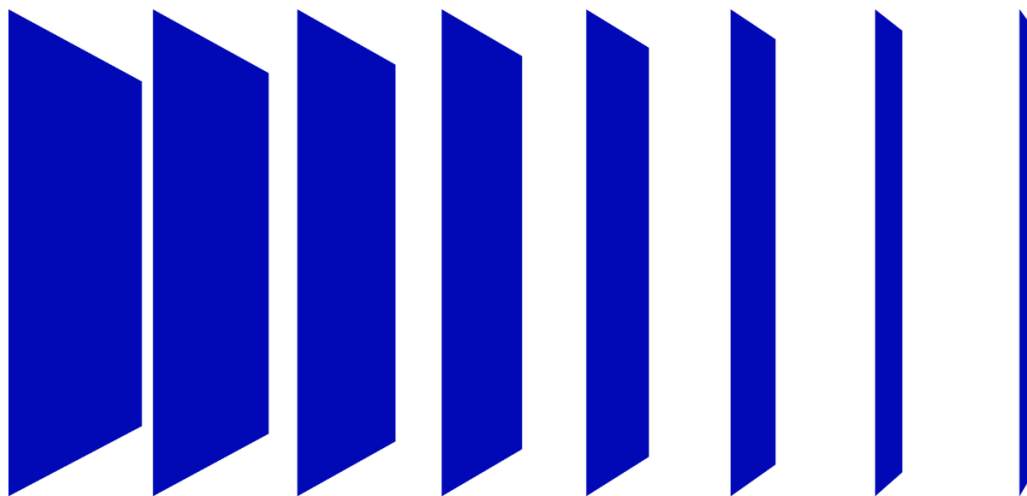
A retenir :

- **L'énergie comme condition de la puissance militaire.** Des opérations sur le terrain à la production des équipements de défense, la capacité des armées à agir dépend à chaque échelon de flux énergétiques abondants, continus et fiables — au premier rang desquels les hydrocarbures, qui représentent **75 % des consommations directes du ministère des Armées selon l'administration**.
- **Une dépendance aux énergies fossiles partiellement documentée.** Si les consommations directes des armées sont connues, leurs dépendances indirectes (comme l'énergie incorporée dans les systèmes d'armes, le maintien en condition opérationnelle) ou encore les chaînes d'approvisionnement de la BITD) restent à ce jour largement non quantifiées.
- **Des ressources fossiles sous contrainte croissante.** À moyen terme, plusieurs des principaux fournisseurs de pétrole et de gaz de l'Europe pourraient voir leurs capacités d'exportation décliner, exposant la nation et ses armées à des risques d'approvisionnement et des conflits d'usage avec le secteur civil.
- **Un décrochage par rapport à la transition civile ferait courir des risques forts aux armées**, en fragilisant les chaînes logistiques pétrolières, en érodant les compétences industrielles liées aux motorisations thermiques et en affectant l'interopérabilité avec les alliés. **À l'inverse, une transition maîtrisée pourrait rendre le secteur plus résilient aux chocs énergétiques, plus autonome et plus souverain.**
- **Des nouvelles technologies (drones, intelligence artificielle, infrastructures numériques, capacités spatiales etc.)** dont les implications en matière de consommation d'énergie, de ressources matérielles et d'infrastructures demeurent encore largement méconnues.
- **Le programme DÉFENDRE vise précisément à répondre à ces enjeux :** identifier et quantifier les dépendances énergétiques et minérales des forces armées et de l'industrie de défense, évaluer les risques associés, et éclairer les choix technologiques et industriels nécessaires pour concilier transition

¹⁰⁴ En supposant un renouvellement linéaire du parc, le taux annuel de mise hors service correspond à l'inverse de la durée de vie moyenne : $1/25 \approx 4 \%$ pour l'éolien, $1/30 \approx 3,3 \%$ pour le photovoltaïque.

énergétique, souveraineté et maintien des capacités opérationnelles à long terme, en intégrant les possibles conflits d'usage avec les besoins de l'économie civile.

Chapitre 3 – Matériaux critiques : quels usages, quelles dépendances ?



Les matériaux critiques occupent une place croissante dans les débats relatifs à la souveraineté, à la transition énergétique, à la réindustrialisation et à la défense. Compte tenu de la complexité du sujet, ce chapitre fait le choix de consacrer une première partie à la clarification des différentes notions. Matières premières, minéraux, minerais, métaux, matériaux, ressources, réserves, criticité ou encore vulnérabilité : ces notions recouvrent en effet des objets différents et sont souvent employées de manière interchangeable, au risque d'entretenir certaines confusions. Cette étape est indispensable pour comprendre les enjeux associés aux matériaux critiques et éviter de réduire la question à celle de la seule disponibilité géologique des ressources. Les tensions observées aujourd'hui sur certains matériaux résultent en effet moins d'un épuisement physique imminent que de contraintes économiques, industrielles, technologiques, géopolitiques ou environnementales qui affectent les chaînes d'approvisionnement.

Une fois ce cadre posé, le chapitre s'intéresse plus spécifiquement aux enjeux de criticité pour le secteur de la défense. Les systèmes d'armes modernes mobilisent une grande diversité de matériaux aux propriétés spécifiques, souvent intégrés dans de longues chaînes d'approvisionnement, complexes et largement mondialisées. La vulnérabilité des armées et de la BITD ne dépend donc pas uniquement de l'accès aux matières premières, mais également de la maîtrise des différentes étapes de transformation, de fabrication et d'assemblage permettant leur intégration dans les équipements militaires.

L'objectif de ce chapitre est ainsi double : comprendre les mécanismes qui structurent les chaînes de valeur des matériaux critiques et analyser les vulnérabilités particulières qu'elles peuvent engendrer pour la défense française et européenne. Cette réflexion constitue une étape essentielle du programme DÉFENDRE, dont l'ambition est d'identifier les dépendances physiques des capacités militaires, d'évaluer les risques associés et d'éclairer les conditions de leur résilience dans un contexte marqué par la montée des tensions géopolitiques, la transition énergétique et la recomposition des équilibres industriels mondiaux.

I. Matériaux critiques : de quoi parle-t-on ?

A. Définitions et notion de criticité

1. La production des matériaux

Étant donné la complexité du sujet, il convient de définir les différents termes afférents :

- **La matière première** est un produit d'origine naturelle — issu de l'agriculture, des forêts, de la pêche ou de l'extraction minière — qui peut être utilisé tel quel ou après une transformation minimale, et qui est destiné à être commercialisé en grande quantité, notamment sur les marchés internationaux.
- **Le matériau** est une matière utilisée pour fabriquer des objets ou des structures, choisie en fonction de ses propriétés (résistance, dureté, conductivité, souplesse, masse, etc.). Le périmètre des matériaux ne s'arrête bien entendu pas aux métaux, mais ce chapitre prend le parti de se concentrer sur cet aspect.



Figure 9 - Typologie des matières premières minérales

- **Les minéraux** : Le métal, au sens d'élément chimique, se trouve rarement sous la forme d'un élément chimique pur – sous forme dite « native » - dans la nature (sauf pour l'or, l'argent, le platine et plus rarement le cuivre). En effet, les métaux se trouvent eux-mêmes dans des réseaux cristallins appelés des minéraux. Par exemple, le fer peut se trouver dans l'hématite (Fe_2O_3) ou la magnétique (Fe_3O_4). Les minéraux ne servent toutefois pas uniquement à produire des métaux. Certains sont exploités directement pour leurs propriétés physiques ou chimiques. Par exemple, le graphite est un minéral constitué de carbone, utilisé notamment dans les batteries, les lubrifiants, les réfractaires ou les crayons.
- **Le minerai** : Dans la pratique industrielle, les opérations minières traitent de très grands volumes de roche. Il est rarement possible d'extraire uniquement le minéral d'intérêt dès l'étape d'abattage. On parle donc généralement de minerai, c'est-à-dire d'un ensemble rocheux contenant un ou plusieurs minéraux valorisables en quantité économiquement exploitable, et dont on peut extraire avec profit un ou plusieurs éléments utilisables après plusieurs processus de traitements¹⁰⁵. Les minerais peuvent présenter des teneurs variables selon l'élément chimique recherché (cf. figure 10).
- **Le métal** : un métal peut désigner à la fois
 - Un élément chimique métallique (fer, cuivre, aluminium, or, etc.) ;
 - Un matériau métallique homogène, c'est-à-dire un solide dont les atomes sont tous identiques et liés par des liaisons métalliques – type de liaisons chimiques pouvant lier des atomes métalliques. Un alliage métallique n'est pas un métal dans la mesure où il est constitué d'atomes métalliques différents.

¹⁰⁵ MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DES FORÊTS (Québec), *Géologie des ressources minérales*, Québec, Gouvernement du Québec, 2008

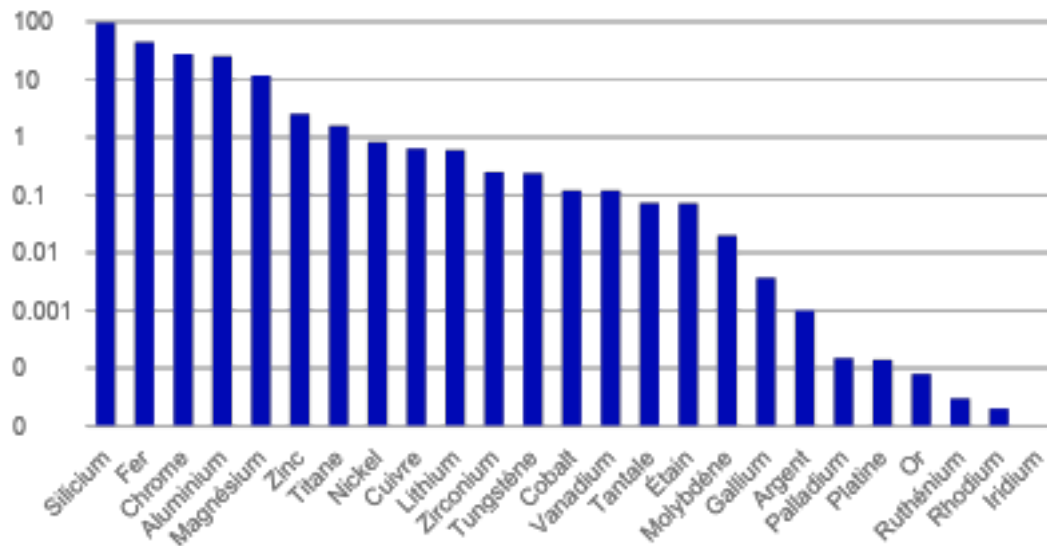


Figure 10 – Teneur moyenne des minerais dans le monde en % (matière première contenue dans le minerai / quantité totale de minerai extrait)

Source : Reconstruction The Shift Project¹⁰⁶

Les procédés de traitements que subissent les minerais sont dans l'ordre :

1. **Minéralurgiques** (concassage, broyage, séparation gravimétrique, flottation... pour séparer la gangue c'est à dire la part de roche sans valeur du minéral utile)
2. **Métallurgique** (hydro, pyro ou électrometallurgie pour obtenir du métal pur ou un alliage métallique).

L'élément d'intérêt extrait (par exemple le cuivre, lithium, zinc, nickel etc.) n'est pas forcément recherché sous sa forme métallique pure (lingots ou cathodes). Par exemple, le cobalt est souvent valorisé sous forme d'hydroxyde de cobalt ou de sulfate de cobalt, ou encore sous forme d'oxydes de cobalt pour les applications de batteries.

2. L'évaluation de la disponibilité d'un matériau

Toutes les roches contenant des éléments métalliques ne sont pas nécessairement exploitables. Durant la phase d'exploration minière, les gisements miniers sont étudiés et classifiés selon deux catégories : ressource ou réserve. Les ressources et les réserves sont des estimations de la disponibilité d'un métal, autrement dit de la quantité de métal disponible pour être extraite :

- Les **ressources** sont « une concentration ou occurrence de matériau solide présentant un intérêt économique dans la croûte terrestre, sous une forme, une teneur ou une quantité telle qu'il existe des perspectives raisonnables d'extraction économique future »¹⁰⁷. À mesure que la connaissance géologique et économique

¹⁰⁶ Rock-to-Metal Ratio: A Foundational Metric for Understanding Mine Wastes, Nedal T. Nassar, Graham W. Lederer, Jamie L. Brainard, Abraham J. Padilla, and Joseph D. Lessard, Environmental Science & Technology 2022 56 (10), 6710-6721

¹⁰⁷ CANADIAN INSTITUTE OF MINING, METALLURGY AND PETROLEUM (CIM), *CIM Definition Standards for Mineral Resources and Mineral Reserves*, Montréal, CIM, 2014

devient plus précise, les ressources minérales peuvent être converties en réserves minérales.

- Les **réserves** sont « la partie économiquement exploitable d'une ressource minérale mesurée et/ou indiquée. Selon le niveau de confiance et de connaissance géologique, les réserves peuvent être classées comme « probables » ou « prouvées ».

La figure 11 présente les ressources et réserves estimées en 2024 dans le cas du cuivre.

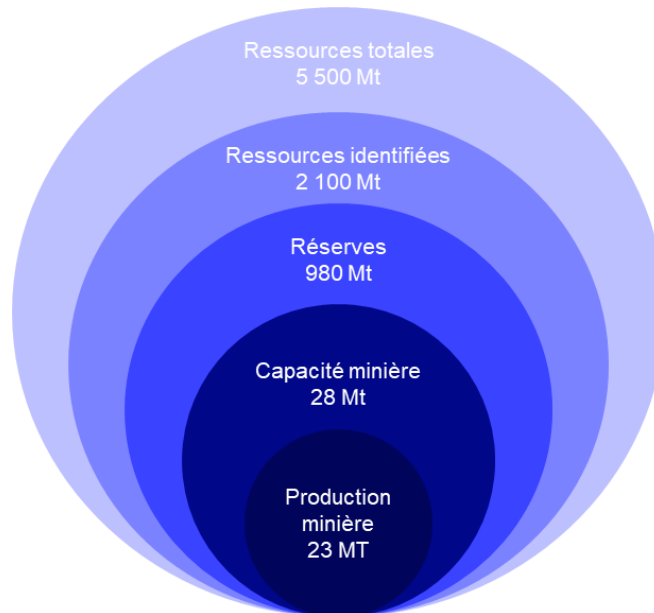


Figure 11 – Réserves mondiales de cuivre et production minière en 2024¹⁰⁸

Source : International Copper Study Group, *The Shift Project*

La notion de réserve est avant tout économique : elle est donc sensible à l'évolution du prix du métal considéré. Dans certaines conditions de prix, il peut devenir économiquement rentable d'exploiter des gisements qui ne l'étaient pas auparavant. De la même manière, la notion de réserve dépend des évolutions technologiques d'extraction et de traitement, qui peuvent rendre exploitables des gisements auparavant non viables avec les techniques disponibles.

Un exemple est celui du nickel en Indonésie. Jusqu'au milieu des années 2010, les minerais latéritiques à faible teneur en nickel étaient peu valorisés. Cependant, avec le développement de procédés métallurgiques adaptés¹⁰⁹ et les investissements chinois massifs, ces ressources sont devenues économiquement exploitables. Ainsi, l'Indonésie a pu transformer d'importantes ressources en réserves exploitables, puis développer une production industrielle de nickel à grande échelle : fin 2024, l'Indonésie assurait 62% de la production minière mondiale et 46% du nickel primaire, contre respectivement 8% et 1% une décennie plus tôt.

¹⁰⁸ ICSG, *The World Copper Factbook 2025*, International Copper Study Group (ICSG), s.l., 2025

¹⁰⁹ C'est notamment le cas du procédé HPAL, dont la compétitivité s'est améliorée grâce à des réductions significatives des coûts d'investissement ainsi qu'à l'intégration des usines dans des parcs industriels et au transfert de savoir-faire technologique, en particulier chinois

Encadré 5 – Quelles sont les différences majeures avec les matières premières énergétiques ? En quoi ces dépendances ne sont-elles pas équivalentes ?

Les ressources énergétiques fossiles et les matières premières non énergétiques répondent à des logiques différentes, tant du point de vue de leur usage et leurs propriétés que de leurs implications géoéconomiques.

D'une part, les ressources fossiles relèvent d'une logique de stocks limités et consommables : en cas de rupture d'approvisionnement, la France ne dispose que d'environ trois mois de stocks pétroliers. Une fois utilisées, ces ressources sont irrémédiablement détruites, principalement sous forme de gaz à effet de serre.

D'autre part, les matières premières non énergétiques reposent sur une logique différente : elles sont stockables et réutilisables sur le long terme. Une fois présentes sur le territoire, elles peuvent être intégrées dans des boucles de recyclage, permettant la mise en place d'une économie circulaire, réduisant ainsi le recours à l'extraction primaire. Si cette dernière reste encore limitée aujourd'hui, cela s'explique principalement par un manque de volumes disponibles en fin de vie et des contraintes économiques de rentabilité, davantage que par des contraintes techniques. À mesure que les équipements arriveront en fin de cycle, le recyclage pourrait devenir une source majeure d'approvisionnement : selon l'AIE, il pourrait permettre de réduire de 25% à 40 % les besoins d'extraction, à condition de stabiliser une certaine consommation annuelle.

Enfin, ces différences se traduisent par des conséquences différentes sur la balance commerciale. En 2024, le marché mondial des hydrocarbures atteignait environ 6 000 milliards de dollars, contre seulement 28 milliards pour le lithium et 12 milliards pour les terres rares¹¹⁰ par exemple. Bien que ces derniers marchés soient appelés à croître, ils devraient rester loin des marchés pétro-gaziers.

3. Développement de filières industrielles

Les besoins croissants en métaux et les limites du recyclage impliquent la nécessité d'ouvrir de nouvelles mines pour répondre à la demande¹¹¹. Cependant, l'ouverture d'une mine est un processus long, coûteux, complexe et de grande ampleur. Une analyse basée sur les données de 127 mines¹¹² couvrant un large périmètre géographique et minier montre que la durée moyenne entre la découverte d'un gisement minier et la première production est d'environ 16 ans dont :

- 12 ans pour les phases de découverte, d'exploration et d'étude de faisabilité,
- 1,5 an pour la décision de construction,
- 2,5 ans pour la phase de construction.

Il est important de noter que ces données concernent uniquement des mines ayant effectivement été mises en production, ce qui signifie qu'elles étaient probablement plus viables économiquement et socialement que d'autres projets miniers qui n'ont jamais abouti (et qui ne sont donc pas inclus dans l'échantillon).

¹¹⁰ Les terres rares désignent un groupe de 17 éléments chimiques aux propriétés magnétiques, optiques et électroniques particulières. Malgré leur nom, elles ne sont pas nécessairement rares dans la croûte terrestre, mais leur extraction et leur raffinage sont complexes.

¹¹¹ IEA, *Global Critical Minerals Outlook 2025*, Paris, International Energy Agency, 2025

¹¹² Karan Bhuwalka, *Modeling sustainable mineral supply pathways to meet clean energy demand*, Cambridge (MA), Massachusetts Institute of Technology, 2024. N.B : il s'agit d'une moyenne : la distribution des délais est très large, et de nombreux projets restent bloqués dans certaines phases de développement pendant plusieurs années. Ces délais varient également selon la localisation et la matière première

4. Les limites à la production de matériaux et notion de criticité

a. Des réserves globalement suffisantes à long terme ...

La disponibilité physique des ressources minérales est limitée. Cependant, jusqu'à présent, la production minière a globalement su s'adapter à la hausse des besoins grâce aux avancées technologiques, à la baisse des coûts et à des conditions de marché favorables. Le cas du cuivre illustre cette dynamique : alors que la production annuelle est passée de 8 Mt à 20 Mt entre 1982 et 2020, les réserves ont progressé de manière proportionnelle, de sorte que la durée de vie statique des réserves (ratio entre réserves et production annuelle) est restée relativement stable, autour de 43 ans ; ce temps moyen dissimule en réalité des variations annuelles non négligeables, rythmées par des cycles. En d'autres termes, à mesure que l'on traite des minerais de plus faible teneur, les quantités potentiellement exploitables augmentent fortement, dès lors que les conditions techniques et économiques le permettent. Cela s'accompagne néanmoins d'un accroissement des consommations de ressources et d'énergie pour l'exploitation de ces minerais, avec des impacts sociaux et environnementaux plus forts.

Ainsi, pour la plupart des métaux utilisés dans la transition énergétique, les réserves et les ressources déjà identifiées sont suffisantes pour répondre à la demande future. Même dans le scénario de demande le plus ambitieux de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), les ressources disponibles permettraient de couvrir les besoins des trente prochaines années par la seule extraction minière¹¹³.

b. ... mais un risque de déficit d'offre face à l'essor de la demande à court-moyen terme.

Cependant, l'AIE anticipe de potentielles tensions d'approvisionnement à court terme¹¹². Celles-ci s'expliquent par :

- **La croissance très rapide de la demande liée à la transition énergétique** : selon les projections de l'AIE entre 2024 et 2050, la transition énergétique devrait engendrer une multiplication par 2 environ des besoins pour le silicium métal, largement utilisé dans les panneaux photovoltaïques, par 2,5 pour le cuivre, en raison de l'extension des réseaux électriques et de l'électrification des usages, ou encore par 13 pour le lithium, élément central des batteries lithium-ion¹¹⁴.
- **Une offre qui a du mal à s'adapter notamment du fait des délais de développement des projets miniers.** Des délais qui pourraient encore augmenter à mesure qu'il devient plus difficile d'identifier de nouveaux projets économiquement viables, une fois les gisements les plus favorables déjà exploités. **C'est par exemple déjà le cas pour le cuivre : bien que les budgets d'exploration sur les dernières années soient en hausse, le rythme de découverte de nouveaux gisements s'étiole**, en particulier depuis 2014. Selon le BRGM¹¹⁵, ce manque de découverte de nouveaux gisements pourra poser des problèmes d'approvisionnement dans les années futures. L'aggravation des impacts sociaux et environnementaux de

¹¹³ IEA, *Global Critical Minerals Outlook 2025*, Paris, International Energy Agency, 2025

¹¹⁴ HACHE, Emmanuel, LOUVET, Benjamin, *Métaux, le nouvel or noir*, Paris, Éditions du Rocher, 2023

¹¹⁵ BRGM, *Le cuivre : revue de l'offre mondiale en 2019. Rapport final*, Orléans, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 2020

l'exploration et l'extraction alimente également des contestations sociales plus importantes qui tendent à fortement retarder l'ouverture de nouvelles mines.

A noter également que certains métaux ne sont produits que comme co-produit d'un autre, ce qui limite de fait leur production et la régule du fait de la demande du métal principal visé. C'est le cas du niobium et du tantale par exemple. On exploite le « coltan » pour le tantale qu'il contient et pour lequel la demande est forte. Le niobium n'est que le co-produit du tantale et sa disponibilité y est liée, de fait.

L'asymétrie temporelle entre l'offre et la demande, combinée à une forte incertitude sur la demande future et à la volatilité des prix des matières premières, crée un environnement de risque important pour les investissements miniers¹¹⁶. Les décisions d'exploration, de développement de projets et de construction de mines sont prises par des acteurs économiques qui raisonnent sur des horizons de rentabilité de l'ordre de 20 à 30 ans. Ces décisions sont d'autant plus contraintes que les projets miniers nécessitent des capitaux très importants. Un projet minier de taille moyenne requiert souvent plus d'un milliard de dollars d'investissement initial pour mettre en place les capacités d'extraction et de traitement¹¹⁷. A titre d'exemple, le projet EMILI d'ouverture d'une mine de lithium dans l'Allier devrait solliciter entre 1,5 et 1,8 milliards d'euros d'investissements¹¹⁸. Les projets de cuivre présentent des coûts d'investissement initiaux supérieurs à 10 000 \$ par tonne de capacité annuelle et ceux de nickel dépassent souvent 35 000 \$ par tonne.

La disponibilité des ressources est plus contrainte par des problématiques technico-économiques et socio-environnementales que des enjeux géologiques ou physiques. La question centrale est donc moins : dispose-t-on de suffisamment de ressources dans la croûte terrestre ?, que : sommes-nous prêts à supporter les coûts économiques, sociaux et environnementaux nécessaires à leur extraction et à leur transformation ?

c. Définition de la criticité¹¹⁹

Une matière première critique peut être définie comme une matière première dont la criticité dépasse un seuil donné. La criticité ne s'intéresse pas à une chaîne d'approvisionnement en particulier mais plutôt à l'importance d'un élément pour un système. Elle représente le caractère indispensable d'une ressource, d'un composant ou d'un fournisseur. Bien que les méthodes de calcul de cet indicateur divergent en fonction des organisations, la criticité repose toujours sur deux facteurs : la probabilité de disruption (qui inclut notamment le caractère substituable ou non de la matière première) et l'importance pour le système. La probabilité de disruption peut provenir d'une forte

¹¹⁶ Si les capacités de production sont surdimensionnées par rapport à la demande future, les entreprises s'exposent à des pertes significatives. À l'inverse, en situation d'incertitude, elles peuvent être incitées à sous-investir, ce qui limite le développement de nouvelles capacités. Dans le cas où la demande s'avère finalement supérieure aux anticipations, ce déséquilibre peut entraîner des tensions d'approvisionnement

¹¹⁷ S&P CAPITAL IQ (S&P Global), *Capital IQ Platform*, S&P Global Market Intelligence, s.d., URL : <http://www.capitaliq.spglobal.com/>.

¹¹⁸ Etienne Goetz, « Lithium : l'État entre au capital d'une mine en France », Les Échos, 11 février 2026, URL : <https://www.lesechos.fr/finance-marches/marches-financiers/lithium-letat-monte-au-capital-dune-mine-en-france-2215178>.

¹¹⁹ Criticité, vulnérabilité et risque :

Les notions de vulnérabilité, de criticité et de risque sont trois concepts à la fois différents et complémentaires :

- La vulnérabilité désigne la sensibilité d'un système, ici les chaînes d'approvisionnement, à un choc et sa capacité à absorber celui-ci.
- Le risque est la combinaison entre la probabilité d'occurrence d'un aléa et la vulnérabilité. Il permet de répondre à la question « quelle est la probabilité que ça arrive et avec quelles conséquences ? »

concentration géographique de la production, de tensions géopolitiques et sociales, de capacités de raffinage limitées ou de dépendances commerciales.

En 2011, l'UE a publié sa première liste de matières premières critiques, elle est depuis actualisée tous les trois ans. Alors que cette première liste ne comprenait que 14 ressources critiques, la dernière version publiée en 2023 en comprend 34 dont 17 sont classées comme stratégiques. La publication de ces listes s'accompagne de textes visant à cadrer et appliquer une stratégie commune aux 27. En 2017, l'Alliance européenne des batteries a été créée, l'Alliance européenne des matières premières (ERMA) en 2020 et enfin le Critical Raw Material Act (CRMA) en 2023. L'UE cherche ainsi à sécuriser ses approvisionnements en diversifiant ses sources, en renforçant le recyclage et en développant des capacités d'extraction et de transformation sur son territoire.

A cela, la Commission européenne a ajouté le concept de **matières premières stratégiques**. Elles constituent une catégorie plus ciblée, car elles sont essentielles aux technologies clés de la transition énergétique, du numérique, de la défense et de l'aérospatial. On y retrouve par exemple le lithium, le cobalt, le nickel, les terres rares, le gallium ou encore le germanium.

Cependant, les analyses de criticité des matières premières sont à prendre avec du recul, tant la notion de criticité est protéiforme, et les résultats d'une analyse de criticité peuvent différer selon :

- La méthodologie employée pour mesurer la criticité d'un matériau, qui peut prendre en compte différents paramètres de criticité (impact d'une rupture d'approvisionnement, concentration géographique de la production, substituabilité du matériau, etc.) pour un même matériau évalué ;
- Le périmètre choisi, qui peut être celui d'une entreprise, d'un État, d'un groupe d'États fera varier les résultats. En particulier, les chaînes d'approvisionnement concernées par une potentielle rupture ne seront pas similaires selon le point de vue adopté ; La temporalité de l'évaluation de criticité, puisque les paramètres évalués pourront varier dans le temps.

Les résultats de l'évaluation de criticité des matériaux par l'OTAN – les 12 matériaux critiques essentiels pour l'industrie des États membres¹²⁰ - diffèrent par exemple de la version 2023 de l'exercice de criticité réalisé par la Commission européenne.

Encadré 6 – Des matières premières critiques invisibles mais essentielles

Par ailleurs, l'analyse des flux de matériaux critiques ne peut se limiter à la composition des produits finis. De nombreux éléments interviennent de manière indirecte ou « masquée » dans les chaînes de production. Il peut s'agir :

- De réactifs chimiques utilisés dans les procédés d'extraction et de raffinage ;
- De catalyseurs nécessaires à certaines transformations industrielles ;
- Ou encore de matériaux utilisés dans les équipements de production eux-mêmes.

¹²⁰ Aluminium, Béryllium, Cobalt, Gallium, Germanium, Graphite, Lithium, Manganèse, Platine, Terres rares, Titane, Tungstène

Ces matériaux, bien que non visibles dans le produit final, sont indispensables au fonctionnement des chaînes de valeur et participent pleinement à la criticité globale des systèmes industriels.

L'hélium, gaz rare indispensable notamment à la fabrication et à la gravure des plaques de silicium utilisées dans les semi-conducteurs, est aujourd'hui au cœur de fortes tensions d'approvisionnement. Environ un tiers de la production mondiale — issue comme co-produit de l'extraction et de la liquéfaction du gaz naturel — provient des installations du Qatar. Or, deux des trois sites nationaux de récupération d'hélium y sont actuellement à l'arrêt à la suite de frappes de drones, tandis que l'exportation est fortement perturbée par le blocage du détroit d'Ormuz. Selon le cabinet Kornbluth Helium Consulting, cette situation a entraîné un doublement des prix de l'hélium depuis le début de la guerre au Moyen-Orient le 28 février, une hausse susceptible d'accentuer encore la flambée des coûts de certains composants électroniques¹²¹.

B. Structuration des chaînes de valeur des matériaux critiques

Les matériaux critiques sont rarement utilisés tels quels, mais intégrés dans un produit fini au terme de plusieurs étapes de production qui constituent une chaîne de valeur. L'analyse de ces chaînes, étape par étape, permet d'évaluer les dépendances structurelles et les vulnérabilités auxquelles sont exposées les industries françaises et européennes, notamment en matière d'approvisionnement et de transformation des matières premières critiques.

Ces chaînes de valeur, malgré la diversité des matériaux, ont une structuration relativement standard, en quatre grandes étapes :

- **L'approvisionnement en matières premières**, correspondant à l'extraction minière ou à la production primaire des ressources (minerais, saumures, etc.) ;
- **Le raffinage et la transformation**, qui consistent à convertir ces ressources en matériaux utilisables sous forme de métaux ou de composés intermédiaires ;
- **La fabrication de composants**, intégrant ces matériaux dans des produits intermédiaires (cellules de batteries, aimants, semi-conducteurs, alliages spécifiques, etc.) ;
- **L'assemblage**, qui correspond à l'intégration finale dans des systèmes complexes (véhicules, équipements électroniques, infrastructures énergétiques, etc.).

¹²¹ Oliver Pinaud, « Guerre au Moyen-Orient : les fabricants de semi-conducteurs s'inquiètent pour leur approvisionnement en hélium », Le Monde, 12 mars 2026, URL : https://www.lemonde.fr/economie/article/2026/03/12/guerre-au-moyen-orient-les-fabricants-de-semi-conducteurs-s-inquietent-pour-leur-approvisionnement-en-helium_6670787_3234.html.

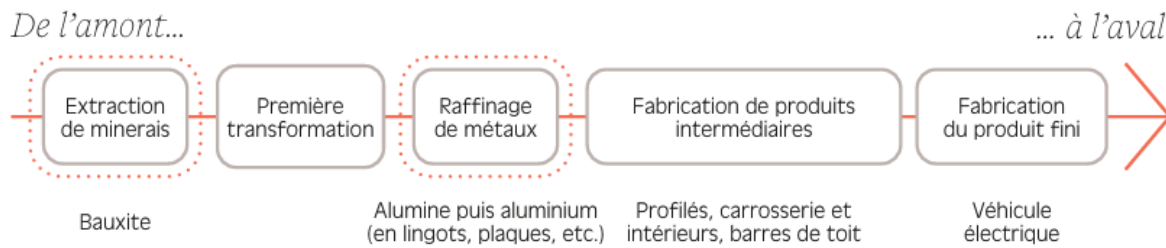


Figure 12 – Chaîne d’approvisionnement simplifiée : exemple de l’aluminium pour un véhicule électrique

Source : La Fabrique de l’industrie, Approvisionnement en métaux critiques, L’industrie au défi des grandes dépendances

Ces chaînes sont ainsi fortement fragmentées et certaines étapes relèvent d’un haut degré de technicité. Celui-ci limite le nombre d’acteurs compétents, accentuant les dépendances. Cette fragmentation, combinée à la dispersion géographique des activités (extraction, raffinage, fabrication), multiplie les points de vulnérabilité tout au long de la chaîne. Ci-dessous le détail de ces fragmentations pour les deux premières étapes :

f. Étape 1 – Extraction des matières premières / minerais

Réalisée dans des mines ou des carrières, cette activité peut être conduite à grande échelle par des entreprises industrielles, ou de manière plus diffuse dans le cadre de mines artisanales, notamment dans certains pays en développement. Ces deux modes d’exploitation coexistent et participent, à des degrés divers, à l’approvisionnement mondial. C’est par exemple le cas pour le cobalt pour lequel la production artisanale représente entre 15 % et 30 % de la production nationale de la République Démocratique du Congo (RDC)¹²².

L’un des traits structurants de cette étape est la forte concentration géographique de l’activité minière. L’extraction des minerais stratégiques est en effet dominée par un nombre restreint de pays, principalement situés en Asie, en Afrique, en Océanie et en Amérique du Sud. Quelques exemples illustrent cette concentration :

- La Chine assure environ 69 % de l’extraction mondiale de terres rares, 78 % du graphite naturel et jusqu’à 82 % du tungstène¹²³ ;
- La RDC représente près de 76 % de l’extraction mondiale de cobalt¹²⁴ ;
- L’Afrique du Sud concentre environ 71 % de la production de platine¹²⁵ ;
- La Russie fournit près de 40 % du palladium¹²⁶.

¹²² DEBERDT, Raphaël, « The Democratic Republic of the Congo (DRC)’s response to artisanal cobalt mining: The Entreprise Générale du Cobalt (EGC) », *The Extractive Industries and Society*, vol. 8, n° 4, 2021

¹²³ U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS), *Mineral Commodity Summaries 2024*, Reston (VA), United States Geological Survey, 2024.

¹²⁴ Marion Douet, « Premier producteur mondial de cobalt, la RDC instaure des quotas sur son exportation », *Le Monde*, 25 septembre 2025, URL : https://www.lemonde.fr/afrique/article/2025/09/25/premier-producteur-mondial-de-cobalt-la-rdc-instaure-des-quotas-sur-son-exportation_6642952_3212.html.

¹²⁵ ELEMENTAL GROUP, « L’approvisionnement mondial en platine se trouve à un tournant critique », Elemental Group, septembre 2025

¹²⁶ MINÉRALINFO (BRGM), *Fiche produit – Palladium (Pd)*, Orléans, Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)

De manière générale, pour la plupart des minerais stratégiques (à l'exception notable du cuivre), les trois premiers pays producteurs concentrent au moins 75 % de la production mondiale. Cette concentration confère à certains acteurs une position dominante dans l'accès aux ressources.

À l'inverse, aucun pays européen ne figure parmi les principaux producteurs mondiaux pour ces ressources¹²⁷, ce qui se traduit par une dépendance structurelle de l'Union européenne vis-à-vis des importations de matières premières critiques. De son côté, la France a abandonné ses concessions minières depuis un siècle :

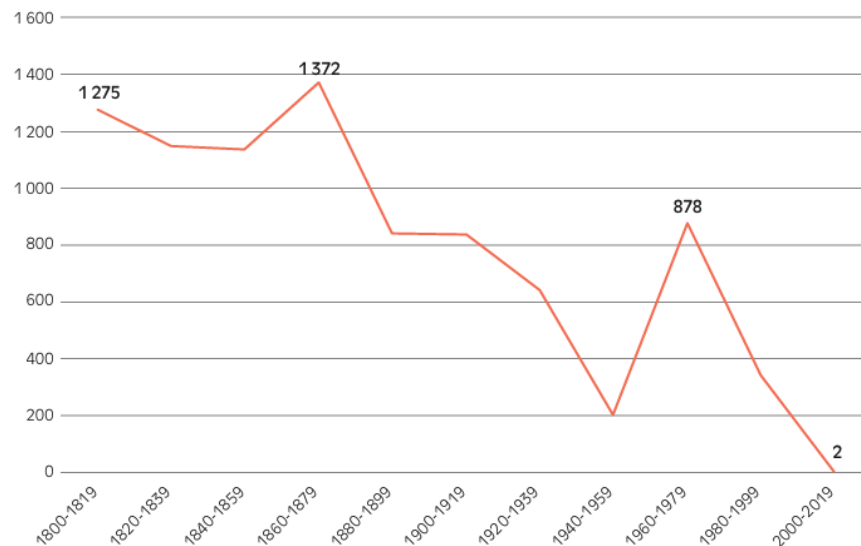


Figure 13 – Évolution de la surface des concessions minières autorisées en France hexagonale (en km²)

Source : Cadastre minier (Camino), périmètre minerais et métaux, hors sels, Traitements La Fabrique de l'industrie

g. Étape 2 – Transformation des minerais et raffinage en matériaux utilisables par l'industrie

La transformation primaire comprend d'abord des opérations mécaniques (concassage, broyage), suivies de procédés physiques ou chimiques permettant de séparer et concentrer les minerais. Elle est ensuite prolongée par des opérations de raffinage, visant à purifier les matériaux et à les convertir en métaux ou composés exploitables. Ces procédés reposent sur des techniques métallurgiques souvent énergivores, telles que la pyrométallurgie, l'hydrométallurgie ou l'électrométallurgie.

Comme pour l'extraction, mais de manière encore plus marquée, cette étape se caractérise par une forte concentration géographique, avec une domination nette de la Chine dans le raffinage des matériaux critiques. Le pays est présent parmi les principaux producteurs pour la quasi-totalité des métaux stratégiques. Cette position dominante résulte d'une stratégie industrielle de long terme, portée par l'État chinois depuis plusieurs décennies.

¹²⁷ La France est le principal producteur industriel mondial d'hafnium affiné (Orano et Aubert & Duval). Cependant, il n'existe pas de mines d'hafnium mais une industrie de séparation issue du traitement de minerais de zircon importés (l'hafnium est le co-produit de la production de zirconium). C'est notamment l'Australie qui fournit le zircon.

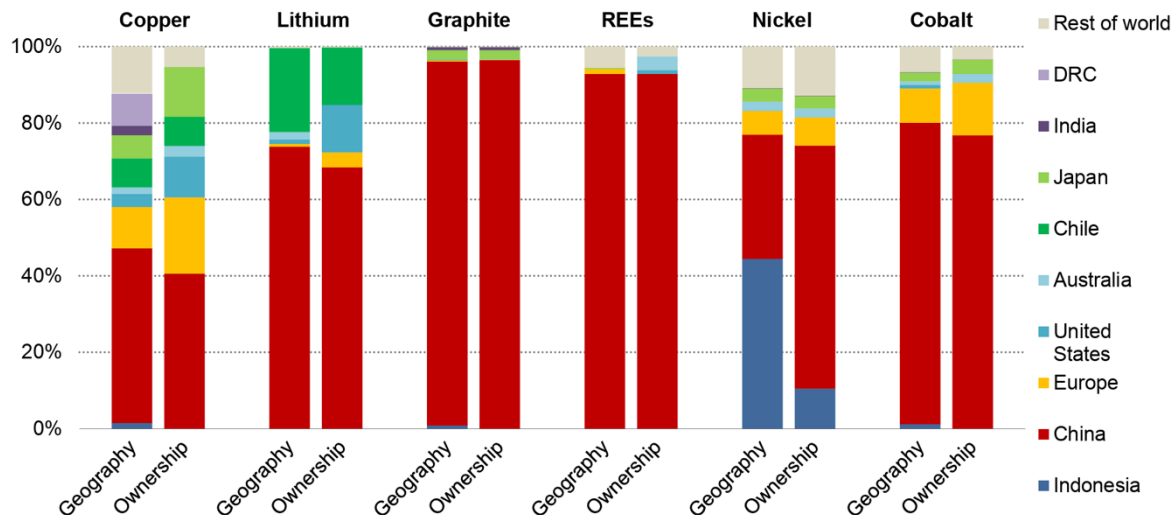


Figure 14 – Domination de la Chine dans le secteur du raffinage, à la fois en termes de géographie et propriété

Source : *Global Critical Minerals Outlook 2025*, Agence Internationale de l'Énergie

Encadré 7 – La position dominante de la Chine sur les marchés mondiaux des matières premières critiques

Dès les années 1980, les plans quinquennaux de la République populaire de Chine ont favorisé le développement de capacités nationales d'extraction, de séparation et de raffinage, en particulier dans les terres rares.

Cette stratégie s'est ensuite internationalisée avec la politique dite de « Go Out », lancée à partir de 1999. **Après avoir consolidé ses capacités domestiques, la Chine a massivement investi dans des actifs miniers à l'étranger afin de sécuriser ses approvisionnements** : les entreprises chinoises sont ainsi passées d'une présence dans une quarantaine de mines à l'étranger en 1999 à plus de 1 250 en 2022.

Le plan Made in China 2025, adopté en 2015, a prolongé cette trajectoire en visant explicitement le leadership mondial dans les technologies de la transition énergétique et du numérique. Comme le résume le chercheur Stéphane Bourg de l'OFREMI, « Il y a quarante ans, les Chinois étaient sur la mine ; il y a trente ans, sur la mine et le raffinage ; et aujourd'hui, sur la mine, le raffinage, les aimants, les moteurs des voitures et les éoliennes. »

Sur le seul segment de l'extraction et de la transformation primaire, **la Chine occupe déjà une place importante : parmi les 34 matières premières critiques identifiées par l'Union européenne dans le *Critical Raw Materials Act* (2023), elle assure plus de 50 % de la production mondiale ou de la transformation primaire pour 19 d'entre elles.**

Cette domination est particulièrement marquée pour plusieurs matériaux stratégiques, pour lesquels sa part dépasse 70 % : terres rares légères et lourdes, gallium, germanium, magnésium, silicium métal, phosphore, tungstène et bismuth.

Mais la domination chinoise est encore plus marquée dans les activités de raffinage et de transformation, où se concentre l'essentiel de la valeur ajoutée. Pour les terres rares, la part de la Chine dans l'extraction est passée de plus de 95 % en 2010 à environ 60 % aujourd'hui, sous l'effet de la montée en puissance d'autres producteurs. En revanche, elle assure encore près de 90

% de la séparation et du raffinage des terres rares, ainsi que 92 % de la production mondiale d'aimants permanents Néodyme-fer-Bore (NdFeB).

Cette position repose sur une stratégie d'intégration verticale associée à une forte dépendance aux importations de minerais. La Chine capte ainsi une part majeure des flux mondiaux de matières premières — par exemple 59 % des importations de titane, 73 % de nickel et 88 % de bauxite — grâce à des prises de participation dans les projets miniers, à l'internationalisation de ses groupes industriels et à la création de coentreprises.

Cette position quasi-monopolistique sur les chaînes d'approvisionnement de nombres de métaux critiques et terres rares fournit un poids géopolitique et un levier d'influence majeur à la Chine. Depuis juillet 2023, Pékin a progressivement mis en place un régime de contrôle des exportations pour les biens à usage dual, en réponse notamment aux restrictions américaines sur l'accès de la Chine aux semi-conducteurs avancés. Initialement ciblées sur le gallium et le germanium, ces mesures ont ensuite été étendues au graphite, à l'antimoine, au tungstène, au tellure, au bismuth, à l'indium, au molybdène ainsi qu'à plusieurs terres rares et aux aimants permanents. Toute exportation de ces produits est désormais soumise à l'obtention d'une licence délivrée par le ministère chinois du Commerce.

Ce dispositif confère à la Chine un double avantage. Il lui permet, d'une part, de créer des effets de goulet d'étranglement sur des segments critiques des chaînes d'approvisionnement mondiales. Il lui offre, d'autre part, un effet de panoptique : en contrôlant les flux d'exportation, Pékin acquiert une visibilité fine sur les débouchés, les clients et l'organisation des chaînes de valeur internationales.

À l'échelle européenne, les capacités de raffinage apparaissent limitées et fragmentées aujourd'hui, renforçant la dépendance aux importations de matériaux transformés. La France conserve toutefois un tissu industriel résiduel, avec des activités de production d'alumine, d'aluminium primaire, de silicium métal, de titane, de nickel, de cobalt et de ferroalliages. Elle dispose également d'un site historique de production d'oxydes de terres rares (notamment le cérium) à La Rochelle¹²⁸.

Dans l'ensemble, la concentration du raffinage constitue un point critique des chaînes de valeur, puisqu'elle conditionne l'accès effectif aux matériaux utilisables par l'industrie, au-delà de la seule disponibilité des ressources minérales.

La forte concentration géographique des activités d'extraction et, plus encore, de raffinage place la France et l'Europe dans une situation de dépendance structurelle vis-à-vis d'un nombre limité de pays fournisseurs. Cette dépendance accroît leur exposition aux tensions, voire aux ruptures d'approvisionnement et aux hausses de prix.

Trois facteurs principaux alimentent ces risques :

- La hausse de la demande mondiale, portée notamment par la transition énergétique et numérique, renforce la pression sur des chaînes d'approvisionnement déjà fortement sollicitées.
- Deuxièmement, les activités minières et les infrastructures logistiques associées sont exposées aux aléas opérationnels : catastrophes naturelles, accidents industriels, mouvements sociaux ou perturbations logistiques. Sur la période 1967-2016, ces facteurs ont été à l'origine de 60 % des ruptures d'approvisionnement mondiales en

¹²⁸ SOLVAY, *La Rochelle*, Solvay, s.d., URL : <https://www.solvay.com/fr/france/la-rochelle>.

minerais de cuivre et de 48 % des ruptures pour l'ensemble des minerais.¹²⁹ Le changement climatique devrait accentuer cette vulnérabilité : selon les données de Skarn Associates relayées par l'Agence internationale de l'énergie¹³⁰, la part de l'offre mondiale de cuivre exposée à un risque de rupture lié aux inondations ou aux sécheresses pourrait passer de 7 % aujourd'hui à 30 % d'ici 2030.

- Troisièmement, **les ressources minières font l'objet d'une instrumentalisation croissante à des fins économiques, industrielles ou géopolitiques. Certains États mobilisent leur position dominante comme levier d'influence.** La Chine, en particulier, utilise sa maîtrise du raffinage des métaux stratégiques comme instrument de politique commerciale et industrielle. Elle a ainsi instauré des contrôles à l'exportation sur plusieurs terres rares et leurs dérivés, puis interdit en 2024 les exportations de gallium, de germanium et d'antimoine vers les États-Unis, avant d'étendre en 2025 ces restrictions à d'autres métaux stratégiques (cf. encadré 7).

Ces tensions et stratégies géopolitiques ont des conséquences directes pour les entreprises françaises et européennes¹³¹ :

- **Risque d'approvisionnement accru**, allant de l'allongement des délais de livraison et de l'indisponibilité ponctuelle de certains composants jusqu'à des ruptures complètes d'approvisionnement.
- **Hausse des coûts d'approvisionnement**, liée à la divergence entre offre et demande, à la volatilité des marchés et à l'augmentation des coûts logistiques. Cette hausse peut être partiellement répercutée sur les clients finaux, ou sur la chaîne d'approvisionnement des grands donneurs d'ordre de la BITD, sans que ceux-ci soient toujours en mesure de l'absorber.

Ces deux risques sont liés : l'insuffisance de l'offre peut tendre à alimenter la hausse des prix.

II. L'utilisation de matériaux critiques dans le secteur de la défense

A. Quelle utilisation des matériaux critiques dans l'industrie de défense ?

1. Les applications de défense requièrent un grand nombre de matériaux, pour des applications nombreuses et complexes

Pour comprendre l'utilisation de matériaux critiques par le secteur de la défense, le Joint Research Center (JRC) de la Commission européenne¹³² propose la typologie (figure 15),

¹²⁹ Hiroki Hatayama, Kiyotaka Tahara, Adopting an objective approach to criticality assessment: Learning from the past, Resources Policy, Volume 55, 2018, Pages 96-102, ISSN 0301-4207

¹³⁰ SKARN ASSOCIATES, « Update to Copper Water Curve », Skarn Associates, s.d., URL : <https://www.skarnassociates.com/insights/update-to-copper-water-curve>.

¹³¹ Entretien avec industriel du secteur

¹³² JRC, *Raw materials in the European defence industry*, Petten, Joint Research Centre (European Commission), 2016, URL : <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC98333>.

distinguant les applications de défense, elles-mêmes composées de matières premières, matériaux transformés, produits semi-finis, et composants.

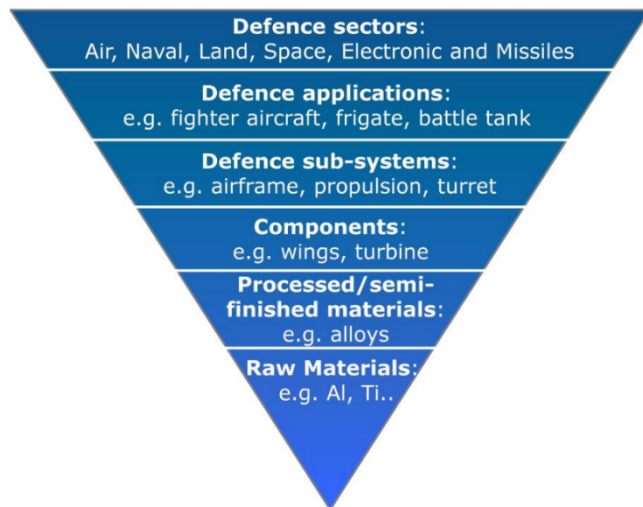


Figure 15 – Parts nationales dans la fabrication des composants de batteries Lithium-ion

Source : JRC, BNEF, 2019

Les systèmes d'armes n'utilisent pas de métaux bruts : l'industrie européenne s'approvisionne surtout en alliages et composites déjà transformés, plutôt qu'en matières premières simples, qui intégreront eux-mêmes des composants/sous-systèmes.

Les exigences de performances des matériaux (résistance, pureté, etc.) sont importantes dans les applications de défense, justifiant des coûts de transformation élevés. Du fait de ces exigences, l'utilisation de substituts – matériaux ayant des caractéristiques proches - ne garantit pas toujours les mêmes propriétés, par ex. :

- Le titane est faiblement substituable, puisqu'utilisé dans des applications critiques où ses qualités sont nécessaires (rapport résistance/poids, résistance à la corrosion et la température) et aucun autre métal ne peut le remplacer sans perte de performance ou de sécurité.
- Dans les applications de défense, les propriétés uniques des circuits intégrés à base de transistors GaAs et GaN - contenant du gallium sous forme d'arséniure ou de nitrure – empêchent leur substitution¹³³.

Si de nombreux matériaux sont théoriquement substituables pour la majorité de leurs applications¹³⁴, les programmes de recherche et de qualification pour des usages de défense sont très longs et coûteux, limitant les potentiels à court moyen terme.

L'usage de matériaux coûteux peut être considéré comme un indicateur d'une faible substituabilité, puisque leurs propriétés justifient leur emploi en dépit d'un coût élevé, par exemple dans le cas du béryllium.

¹³³ U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS), *Mineral Commodity Summaries 2026*, Reston (VA), United States Geological Survey, 2026

¹³⁴ Entretien avec expert du secteur

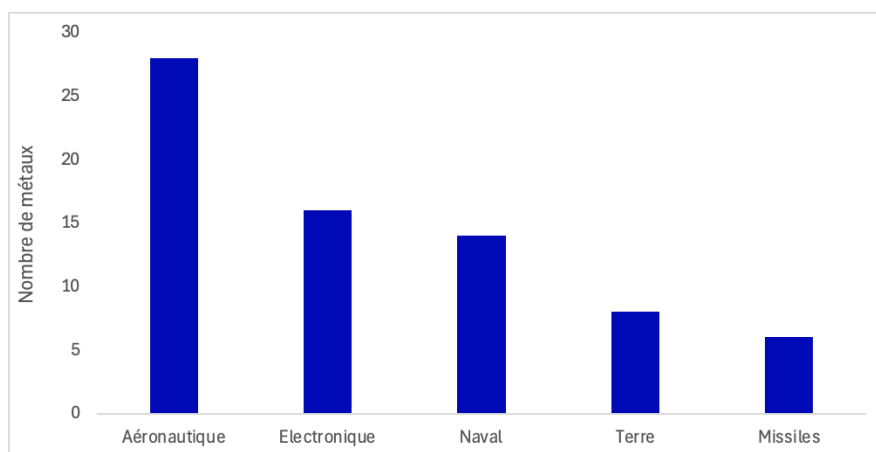


Figure 16 - Nombre de matières premières d'importance¹³⁵ utilisées par les différentes applications de l'industrie européenne de défense

Source : JRC, *Raw materials in the European defence industry*, Petten, Joint Research Centre (European Commission), 2016

Le secteur de la défense utilise par ailleurs une grande diversité de matériaux. Le rapport « Raw materials in the European defence industry » du JRC¹⁵¹ liste ainsi au total 28 métaux utilisés dans les applications de défense. Chaque famille d'usage (figure 16) dans le secteur de la défense utilise des métaux parmi ces 28 métaux.

Les applications de pointe, dans les équipements électroniques tous systèmes d'armes confondus, et dans l'aéronautique, sont celles utilisant la plus grande diversité de métaux différents, à la mesure de la complexité de ces applications. L'A400M se compose par exemple de 29 matériaux stratégiques, contre 8 pour un FAMAS dont 6 dans le canon¹³⁶.

2. Les applications de défense sont dépendantes des chaînes de valeur de l'industrie civile

• A l'échelle des métaux

En volume, la consommation de matériaux destinés à des applications militaires est relativement faible par rapport à celle destinée aux applications civiles. Ainsi, la part des métaux destinés aux applications militaires dans la consommation totale dépasse rarement 10 %¹³⁷. Même dans le cas du tungstène ou du titane, pour lesquels la défense représente une utilisation majeure, les applications militaires ne représentent respectivement que 9% (à l'échelle de l'UE) et 6% (au niveau mondial) de leur consommation.

¹³⁵ The term 'important' is used with reference to the capacity of these materials to fulfil the stringent requirements of defence application

¹³⁶ Raphaël Danino-Perraud, *La Criticité des matières premières stratégiques pour l'industrie de défense*, Étude n° 72, IRSEM, novembre 2019

¹³⁷ IEA, *Global Critical Minerals Outlook 2025*, Paris, International Energy Agency, 2025

• A l'échelle des composants/sous-systèmes d'armes¹³⁸

Les matériaux ne peuvent être utilisés qu'à l'issue d'une série d'étapes de transformation. Les industriels (*prime contractors*) et leurs fournisseurs immédiats (*Tier 1*) se fournissent auprès d'entreprises duales, c'est-à-dire produisant des matériaux transformés et produits semi-finis à la fois pour le secteur civil et pour des applications militaires. Le marché de la défense ne génère pour la plupart d'entre eux qu'une faible part de leur chiffre d'affaires¹³⁹. Ainsi, **les chaînes de valeur de la défense dépendent majoritairement de l'industrie civile pour leur approvisionnement en matériaux transformés et composants.**

Les marchés civils de ces fournisseurs assurent leur équilibre économique par la production de volumes suffisants, permettant incidemment de financer leurs activités de recherche et développement. Dans le cas des batteries par exemple, les produits finaux sont assemblés par des acteurs ayant une activité dédiée aux applications de défense, et permettant de répondre aux spécifications techniques de ce secteur. En revanche, les composants (cellules) ont un usage dual et proviennent de fournisseurs civils, les batteries à usage militaire représentant <1% de la demande de batteries dans le monde¹⁴⁰.

• A l'échelle des applications de défense

Les industriels en aval de la chaîne de valeur (*prime contractors*, *Tier 1*) fabriquant des systèmes d'armes et sous-systèmes associés ont également une partie de leur chiffre d'affaires généré par des activités civiles – cf. figure 17 présentant la part du chiffre d'affaires de défense des 10 premières entreprises de défense européennes.

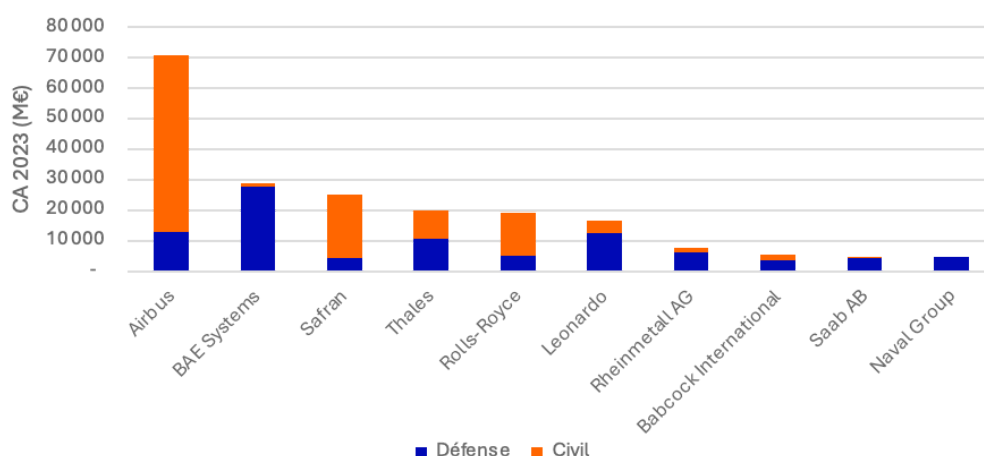


Figure 17 - Chiffre d'affaires civil et militaire des 10 premières entreprises de défense européennes en 2023 (M€)

Source : ASD Facts and Figures 2022

¹³⁸ Les sous-systèmes désignent les éléments qui peuvent composer un système d'arme: capteurs, radar, moyens de communication, système d'information etc

¹³⁹ Carrara, S., Bobba, S., Blagoeva, D., Alves Dias, P., Cavalli, A., Georgitzikis, K., Grohol, M., Itul, A., Kuzov, T., Latunussa, C., Lyons, L., Malano, G., Maury, T., Prior Arce, A., Somers, J., Telsnig, T., Veeh, C., Wittmer, D., Black, C., Pennington, D. and Christou, M., Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/386650, JRC132889.

¹⁴⁰ Entretien avec Bren-Tronics

Il existe donc peu d'exemples de chaînes de valeur – de la matière première jusqu'au système d'arme – entièrement dédiées à la défense. Par exemple, la hausse récente de la demande et des capacités de production de poudre à la suite de la guerre en Ukraine a révélé une dépendance de l'Europe à 70 % à un co-produit de la fabrication du coton transformé en Chine : le linter de coton, indispensable pour l'obtention de nitrocellulose¹⁴¹.

3. Le degré de criticité des matériaux pour la défense est lié aux dépendances aux filières de transformation

Les applications de défense sont dépendantes d'un ensemble d'étapes de transformations de la matière première au système d'arme (cf. *supra*). Ainsi, pour permettre d'évaluer pleinement les vulnérabilités du secteur de la défense, les analyses de criticité du secteur devraient tenir compte des risques d'approvisionnement qui peuvent se manifester sur l'ensemble de la chaîne de valeur depuis la mine jusqu'à l'application de défense.

Au-delà de la prise en compte des risques à l'étape d'extraction, le degré de criticité des métaux utilisés dans le secteur de la défense en France est surtout lié à la dépendance à une filière industrielle spécifique permettant leur intégration dans les applications de défense. Par exemple :

- Pour obtenir un matériau d'une qualité requise pour les applications de défense. Ainsi, la criticité du titane pour l'industrie de défense est moins liée aux volumes titane métal – sous la forme d'éponge de titane - disponibles sur le marché mondial, qu'au titane de qualité aéronautique fourni par un nombre limité de producteurs (Japon, Russie, Kazakhstan)¹⁴². La crise russo-ukrainienne a ainsi révélé la dépendance du secteur aéronautique français au titane en provenance de Russie. L'entreprise russe VSMPO-Avisma fournissait par exemple la moitié de la demande d'Airbus avant la pandémie de Covid-19¹⁴³.
- Pour la production de matériaux spécifiques, par exemple des alliages, pouvant être intégrés dans les composants d'applications de défense. Si le fer n'est pas critique, certains alliages spéciaux d'acier avec une teneur définie en certains autres éléments comme le chrome (par ex. l'acier CLARM HBR) sont utilisés dans les canons de blindés légers. La criticité sera moins liée au risque d'approvisionnement sur les substances contenues qu'au composant et aux capacités à le fondre, le forger, l'usiner ou le polir.

¹⁴¹ DEFENCE MATTERS, « Europe's gunpowder bottleneck: how cotton supply chains became a defence issue », Defence Matters, 12 janvier 2026

¹⁴² LOUVIGNÉ, Pierre-François, *Étude de veille sur le marché du titane 2018-2020. Rapport final*, Orléans, Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), 2021

¹⁴³ Bloomberg, « Airbus défend l'usage du titane russe et estime que les sanctions ne fonctionneront pas », Bloomberg, 12 avril 2022, URL : <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-04-12/airbus-defends-russian-titanium-use-says-sanctions-won-t-work>.

B. Quels sont les risques d'approvisionnement existants du secteur de la défense ?

1. Principaux risques d'approvisionnement identifiés

L'analyse de criticité sert à identifier et à prioriser les matériaux pour lesquels il existe un risque d'approvisionnement sur la chaîne de valeur. Les risques d'approvisionnement principaux identifiés dans ce rapport à l'étape d'extraction sont :

- A court terme, de multiples facteurs de risques (grèves, accidents, catastrophes naturelles, tensions géopolitiques, etc.) sont susceptibles de causer une rupture d'approvisionnement. Les causes de rupture d'approvisionnement en métaux ont été étudiées par Hatayama et Tahara¹⁴⁴ pour 22 métaux, en analysant 448 événements entre 1967 et 2016. La figure 18 ci-dessous montre l'étendue de ces causes. Les différends politiques liés à un contexte réglementaire ou politique particulier et engendrant des restrictions à l'export n'étaient que la cinquième cause de rupture d'approvisionnement, mais la première dans le cas spécifique des terres rares.

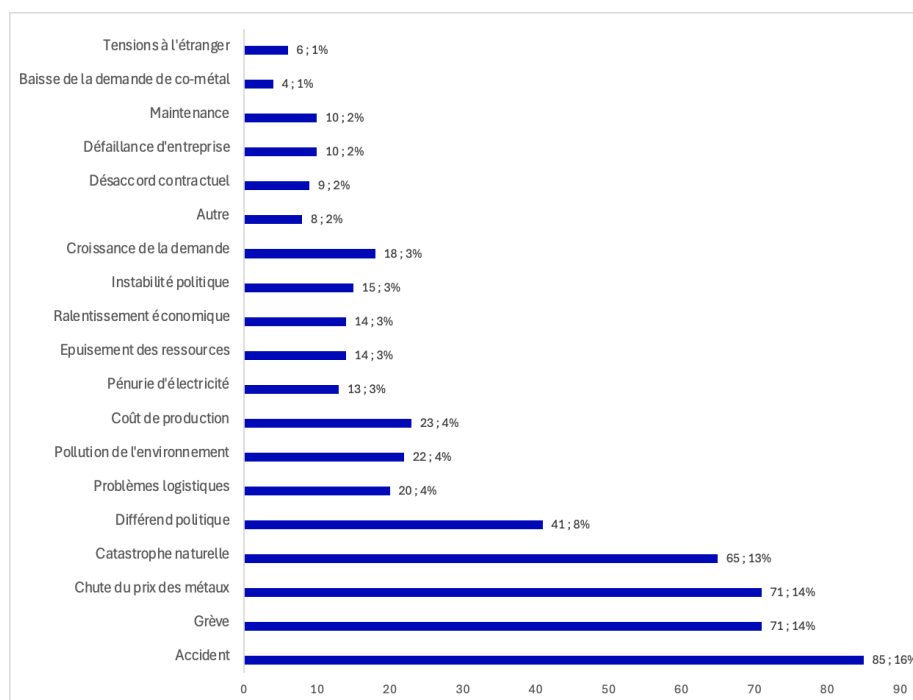


Figure 18 - Répartition des causes de rupture d'approvisionnement en part des événements analysés (en %). La figure présente également le nombre d'événements par catégorie d'événement (en valeur absolue)

Source : Hatayama, Hiroki & Tahara, Kiyotaka, 2018. *Adopting an objective approach to criticality assessment: Learning from the past*, Resources Policy, Elsevier, vol. 55(C), pages 96-102.

- A moyen terme, une incertitude sur la capacité d'extraction au regard de la demande attendue en particulier pour les deux métaux suivants¹⁴⁵

¹⁴⁴ Hatayama, Hiroki & Tahara, Kiyotaka, 2018. *Adopting an objective approach to criticality assessment: Learning from the past*, Resources Policy, Elsevier, vol. 55(C), pages 96-102.

¹⁴⁵ BRGM, CRU CONSULTING, MCKINSEY & COMPANY, *WMF Criticality Assessment 2024*, World Materials Forum, 2024.

- o Le cuivre, dont un déficit d'offre de 10Mt à échelle mondiale est attendu en 2040 – soit un tiers la demande mondiale actuelle selon S&P¹⁴⁶. L'Ofremi quant à elle estime un écart entre offre et demande d'environ 6Mt en 2035 en moyenne (selon les scénarios)¹⁴⁷. Ce déficit est lié à son usage crucial pour le développement économique, le secteur du numérique et la transition énergétique ;
- o Le tungstène, pour lequel l'incertitude sur l'offre minière pourrait être problématique dans le cadre d'une massification de la production des obus et missiles utilisant ce métal. Il est essentiellement utilisé dans les machines-outils¹⁴⁸ mais il pourra être critique si la production de munitions est plus massive.

Ces risques sont accentués pour les métaux pour lesquels la taille de marché est restreinte : dans les marchés les plus petits (gallium, germanium, etc.), les incidents sur la chaîne de valeur sont plus susceptibles de générer des problèmes d'approvisionnement.

Cependant, même sur les métaux produits en petits volumes, comme le niobium, l'arrêt de la production d'une mine n'aura pas nécessairement d'impact sur l'industrie de défense. En effet, les quantités demandées sont suffisamment peu importantes pour que le secteur puisse les acheter en dépit d'une réduction de l'offre mondiale. Les risques d'approvisionnement pour le secteur de la défense signalés par les experts interrogés et dans la bibliographie sont plutôt liés à l'extension mondiale des chaînes d'approvisionnement dans leur ensemble, et non spécifiquement des activités extractives. Un risque sur le fret des matériaux et composants est notamment identifié. Les acteurs en aval des chaînes de valeur sont tributaires de l'ordre mondial pour la continuité des flux commerciaux, qui ont pu être interrompus par la pandémie de COVID-19, ou les attaques houthis en mer Rouge depuis 2023¹⁴⁹.

Le principal risque d'approvisionnement identifié dans le cas de la défense est le goulet d'étranglement lié à la concentration des capacités de transformation en Chine, qui pratique des politiques de contrôle d'export (cf. encadré 7).

¹⁴⁶ HODGSON, Camilla, « Big copper shortage to pose "systemic risk" to global economies, warns S&P », Financial Times, 8 janvier 2026

¹⁴⁷ OFREMI, « Situation du cuivre en 2035 : quel positionnement de l'OFREMI ? », OFREMI, 23 mai 2024, URL : <https://www.ofremi.fr/fr/actualite/actualite/situation-du-cuivre-2035-quel-positionnement-de-lofremi>.

¹⁴⁸ Cinquante-cinq pour cent du tungstène est utilisé pour les outils de coupe, 23 % pour les aciers rapides, 2,5 % dans les superalliages et 14 % dans les munitions (Raphaël Danino-Perraud, La Criticité des matières premières stratégiques pour l'industrie de défense, Étude n° 72, IRSEM, novembre 2019)

¹⁴⁹ INTERNATIONAL INSTITUTE FOR STRATEGIC STUDIES (IISS), *Critical Raw Materials and European Defence*, Londres, International Institute for Strategic Studies, 2025

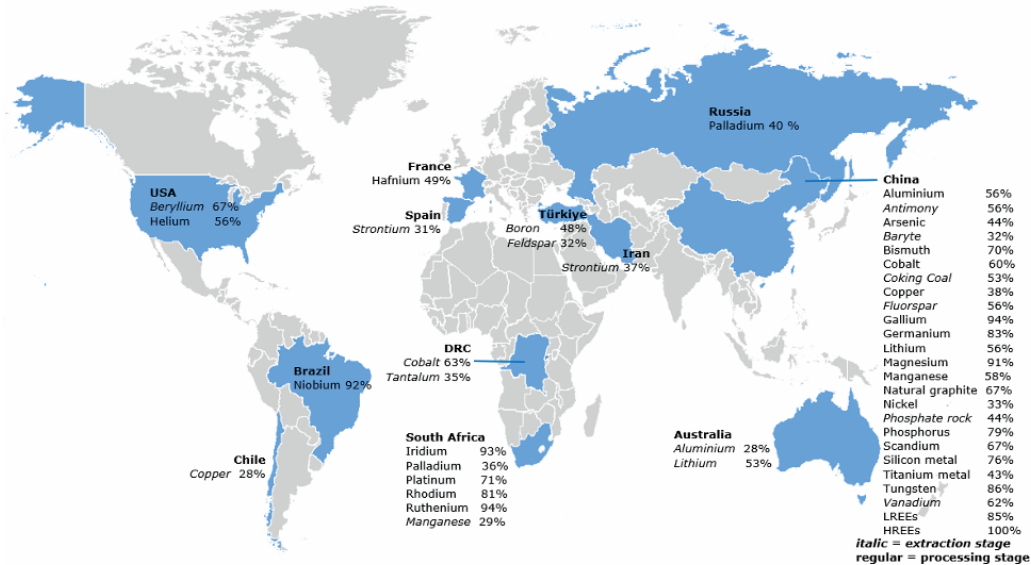


Figure 19 - Risque d'approvisionnement pour l'UE et l'offre mondiale d'une sélection de métaux

Source : European Commission, 2023

Ainsi, 40 % des semi-conducteurs nécessaires au fonctionnement des systèmes d'armes et des infrastructures du Département de la Défense (DoD) américain dépendraient de fournisseurs chinois¹⁵⁰. Le rôle central de la localisation des chaînes d'approvisionnement en Chine dans l'évaluation des risques d'approvisionnement pour le secteur de la défense en Europe est confirmé par une étude du centre des études stratégiques de La Haye, qui a listé en 2023 les matériaux critiques utilisés dans des applications militaires¹⁵¹.

L'étude, datée de 2022 identifie l'aluminium et le graphite comme les deux métaux les plus critiques pour le secteur européen de la défense. Leur niveau de criticité résulte de la combinaison :

- D'un impact opérationnel élevé en cas de ruptures d'approvisionnement – ces deux matériaux étant parmi les plus transversalement utilisés dans les différentes applications de défense présentées en figure 20.
- Du fort risque d'approvisionnement lié à la forte concentration géographique de la production et du raffinage en particulier en Chine : en 2024, la Chine produisait 60 % de l'aluminium de première fusion et presque 80 % du graphite.

¹⁵⁰ GOVINI, « Numbers Matter: Defense Acquisition, U.S. Production Capacity, and Deterring China », Govini Blog, s.d., URL : <https://www.govini.com/blog/numbers-matter-defense-acquisition-u-s-production-capacity-and-deterring-china>.

¹⁵¹ HCSS, *Strategic raw materials for defence: Mapping European industry needs*, La Haye, The Hague Centre for Strategic Studies, 2023



Figure 20 - Risques d'approvisionnement en matières premières critiques dans les applications militaires

Source : *Strategic raw materials for defence Mapping European industry needs* Benedetta Girardi, Irina Patrahau, Giovanni Cisco and Michel Rademaker The Hague Center for Strategic Studies, January 2023

Ainsi, le véritable défi auquel est confrontée l'industrie européenne de la défense en matière d'approvisionnement en matériaux critiques tient à la solidité de la chaîne d'approvisionnement en aval de l'extraction et aux capacités de fabrication, traitement et transformation des matériaux en Europe¹⁵².

Le secteur de la défense dispose, en volume, d'une capacité d'achat suffisante pour sécuriser des quantités limitées de métaux stratégiques, y compris de terres rares. Toutefois, l'absence ou l'insuffisance de capacités industrielles en aval (raffinage, transformation et fabrication de composant) constitue un risque majeur, aussi bien :

- Pour des matériaux comme le tungstène, pour lequel certaines capacités minières et de recyclage existent en Europe, mais dont les capacités de raffinage, de conversion en ammonium paratungstate (APT), de production de poudres et de carbures demeurent limitées, créant une dépendance importante à l'égard d'acteurs extra-européens pour l'approvisionnement en produits intermédiaires stratégiques¹⁵³.

¹⁵² JRC, Pavel, Claudiu C., Tzimas, Evangelos, *Raw materials in the European defence industry*, Petten, Joint Research Centre (European Commission), 2016

¹⁵³ MININGSEE EUROPE, « Europe's tungsten supply under pressure: a country-by-country map and stress test in a China-restricted world », Mining South East Europe, 20 janvier 2026, URL : <https://www.miningsee.eu/europes-tungsten-supply-under-pressure-a-country-by-country-map-and-stress-test-in-a-china-restricted-world/>.

- Pour les matériaux et composants comme les semi-conducteurs – dont la production est dominée par l'Asie de l'Est - ou batteries lithium-ion - produites sur le sol de l'UE pour seulement 14% d'entre elles, souvent par des unités rattachées à des entreprises chinoises ou coréennes¹⁵⁴.

Les capacités de production de semi-produits¹⁵⁵ existent pour certains segments, mais demeurent incomplètes et hétérogènes, exposant donc le secteur de la défense à des risques d'approvisionnement malgré l'accès théorique à la matière première.

2. Conséquences des défaillances d'approvisionnement

S'ils se matérialisent, les risques d'approvisionnement pour les industriels du secteur de la défense se manifesteront à la fois par :

- **Une hausse des prix des composants et matériaux.** Dans certains cas, même si l'industriel est disposé à payer plus, la matière reste indisponible, notamment à cause des politiques d'*export control*. Ce cas s'est présenté avec le gallium de haute pureté (utilisé par exemple dans les radars AESA des F-35), le cobalt ou les terres rares dans les aimants permanents, selon un expert interrogé.
- **Une pénurie des composants et matériaux**, se traduisant par une augmentation du *lead time*¹⁵⁶, et dans les cas les plus sévères par des ruptures d'approvisionnement.

La figure 21 présente ainsi la hausse des prix des composants achetés par le Département de la Défense (DoD) américain au cours des trois mois ayant suivi l'interdiction par la Chine des exportations vers les Etats-Unis de ces trois métaux en décembre 2024¹⁵⁷ - cf encadré 7.

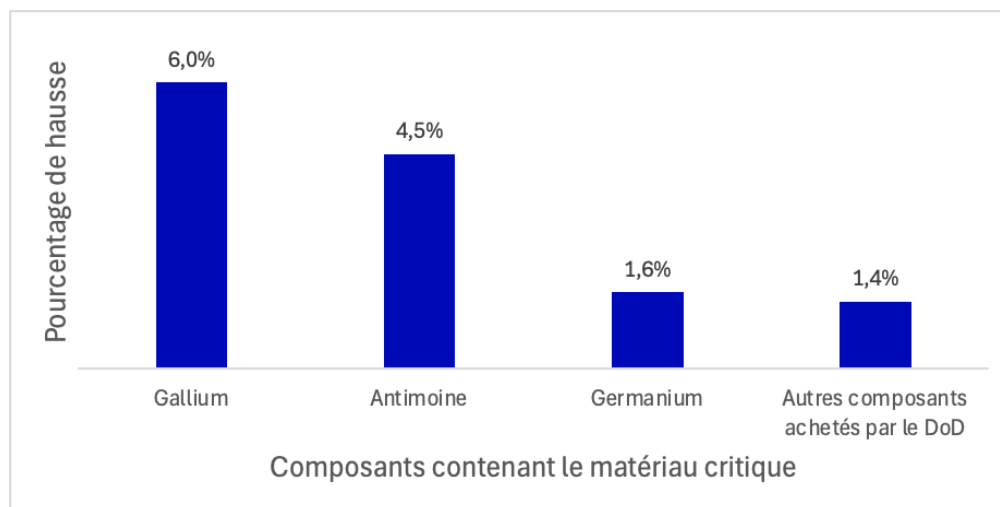


Figure 21 - Risques d'approvisionnement en matières premières critiques dans les applications militaires

Source : GOVINI, « *From Rock to Rocket: Critical Minerals and the Trade War for National Security* », Govini Blog

¹⁵⁴ CAPLIEZ, Romain, GREKOU, Carl, HACHE, Emmanuel et MIGNON, Valérie, « Batteries lithium-ion : cartographie dynamique de la chaîne de valeur et perspectives », CEPII Policy Brief, n° 48, 2024

¹⁵⁵ En métallurgie, un semi-produit désigne un produit partiellement élaboré à partir de la matière première, qui nécessite encore quelques transformations

¹⁵⁶ Temps écoulé entre le début de la production et la livraison finale au client

¹⁵⁷ GOVINI, « *From Rock to Rocket: Critical Minerals and the Trade War for National Security* », Govini Blog, s.d., URL : <https://www.govini.com/blog/from-rock-to-rocket-critical-minerals-and-the-trade-war-for-national-security>.

C. Reprise en main des chaînes d'approvisionnement : contraintes et leviers pour la défense européenne

La dépendance européenne aux matériaux critiques constitue une vulnérabilité structurelle difficile à corriger. Les chaînes d'approvisionnement sont largement concentrées hors d'Europe, notamment pour les étapes de raffinage et de transformation. Leur relocalisation se heurte à des contraintes fortes : investissements capitalistiques élevés, délais longs, exigences de certification des chaînes de production spécifiques au secteur de la défense.

À cela s'ajoute un enjeu d'échelle : la quasi-totalité des chaînes d'approvisionnement étant duales et majoritairement civiles, la rentabilité des activités de défense requiert de larges volumes. À titre d'exemple, la filière de recyclage et de production de titane nécessite des volumes importants pour être viable, incompatibles avec une duplication dans chaque État membre. L'entreprise EcoTitanium franchit les seuils de rentabilité grâce à une collaboration européenne¹⁵⁸. Les stratégies d'accords bilatéraux ciblés, mises en œuvre par les États-Unis sur certains matériaux (ex. tungstène)¹⁵⁹, restent difficiles à reproduire dans un cadre européen au volume militaire bien plus restreint.

Les leviers, mesures et expérimentations présentés ci-dessous ne constituent pas des recommandations du Shift Project. Ils sont issus de la littérature disponible ainsi que des entretiens réalisés dans le cadre du programme DÉFENDRE. À ce stade, nous ne prenons pas position sur leur pertinence, leur faisabilité ou leur caractère prioritaire. Notre objectif est de les soumettre à discussion afin de recueillir des retours, des compléments et des points de vigilance.

La suite du programme DÉFENDRE visera précisément à éclairer les choix technologiques, industriels et organisationnels permettant de concilier transition énergétique, souveraineté et maintien des capacités opérationnelles à long terme. Une attention particulière sera portée aux arbitrages et aux éventuels conflits d'usage entre les besoins de la Défense et ceux des autres secteurs de l'économie.

Face à ces contraintes, plusieurs leviers pourraient être mobilisés et font l'objet d'études et de recherche :

- **Stocks stratégiques** : ils permettent d'amortir des ruptures temporaires d'approvisionnement. Par exemple, la constitution de réserves de métaux critiques (tungstène, terres rares) pourrait sécuriser la production de systèmes d'armes sur des horizons de quelques mois. Toutefois, leur dimensionnement est complexe (coûts, obsolescence, arbitrages entre matériaux)¹⁶⁰, et seulement quelques pays tels que les États-Unis, le Japon ou encore la Corée du Sud en possèdent.
- **Économie circulaire** : Des acteurs comme Cider Engineering accompagnent leurs clients dans l'évaluation des potentiels de récupération de métaux stratégiques à partir de leurs déchets militaires complexes, tandis que MagREEsource produit des aimants NdFeB (Néodyme-Fer-Bore) à partir d'aimants usagés. Ces approches

¹⁵⁸ Pierre Fortin, « EcoTitanium : première usine de recyclage du titane en Europe », Les Échos, s.d., URL : <https://www.lesechos.fr/weekend/planete/ecotitanium-premiere-usine-de-recyclage-du-titane-en-europe-1915121>.

¹⁵⁹ Department of War, « Department of Defense makes investment to strengthen the tungsten supply chain », War.gov (U.S. Department of War), 13 décembre 2024

¹⁶⁰ HACHE, Emmanuel, JEANNIN, Frédéric, « Les stocks stratégiques de métaux critiques », dans *Les stocks stratégiques de métaux critiques*, IRIS, 16 octobre 2023

restent toutefois limitées par la disponibilité des gisements secondaires, la complexité des procédés ou encore par leur rentabilité.

- **Relance de projets miniers en France et en Europe** : le projet de mine de lithium EMILI porté par Imerys dans l'Allier depuis 2022 illustre cet enjeu. Visant une production d'environ 34 000 tonnes d'hydroxyde de lithium par an, il figure dans la liste des « projets stratégiques » du CRMA. Mais ce projet fait l'objet de controverses qui ont été discutées lors d'un débat organisé par la Commission Nationale du Débat Public et ont révélé de fortes attentes en matière de transparence, de contrôle public et d'implications des parties prenantes.
- **Sobriété et maîtrise de la demande** : Lebronze alloys parvient à réduire l'utilisation de matières premières pour la fabrication de leurs produits, en livrant des pièces déjà profilées et adaptées aux besoins de leurs clients, en réduisant le poids total de matériaux purs à l'aide d'alliages ayant les meilleures performances par unité de poids, ou encore en augmentant la durabilité des matériaux notamment par des alliages très résistants à la corrosion. Ces différentes solutions pourraient permettre de diminuer jusqu'à 30 % en moyenne le poids des matériaux.
- **Cartographie des dépendances et évaluation des potentiels de recyclage** : une connaissance fine du contenu en matériaux critiques est indispensable, à la fois pour identifier les dépendances et évaluer les potentiels de recyclage. Par exemple, la Structure intégrée de maintien en condition opérationnelle du matériel terrestre (SIMMT) mène un travail d'inventaire des matériaux présents dans les équipements terrestres.
- **Priorisation des usages (réquisition)** : depuis 1950 et la guerre de Corée, les États-Unis disposent d'outils robustes comme le Defense Priorities & Allocations System (DPAS), pour prioriser les approvisionnements de la défense en cas de crise.¹⁶¹ (ex : allocation prioritaire de métaux à certains industriels). En France, la Loi de Programmation Militaire 2024-2030 introduit progressivement des mécanismes similaires, encore en phase de structuration, visant à garantir un accès prioritaire aux matériaux critiques pour les armées en temps de conflit de haute intensité.¹⁶²
- **Diversification et appropriation des sources d'approvisionnements** : Pour les industriels, la suppression – ou du moins la limitation – des points de défaillance unique est aussi une stratégie employée de manière à disposer de doubles sources, voire de chaînes d'assemblage dans différents pays, pour anticiper d'éventuels risques d'approvisionnement. On peut ici citer le cas de Safran et Airbus, avec le rachat d'Aubert & Duval en avril 2023.

Cette reprise en main des chaînes de valeur ne passe pas par une autonomie complète, mais plutôt par une réduction des dépendances.

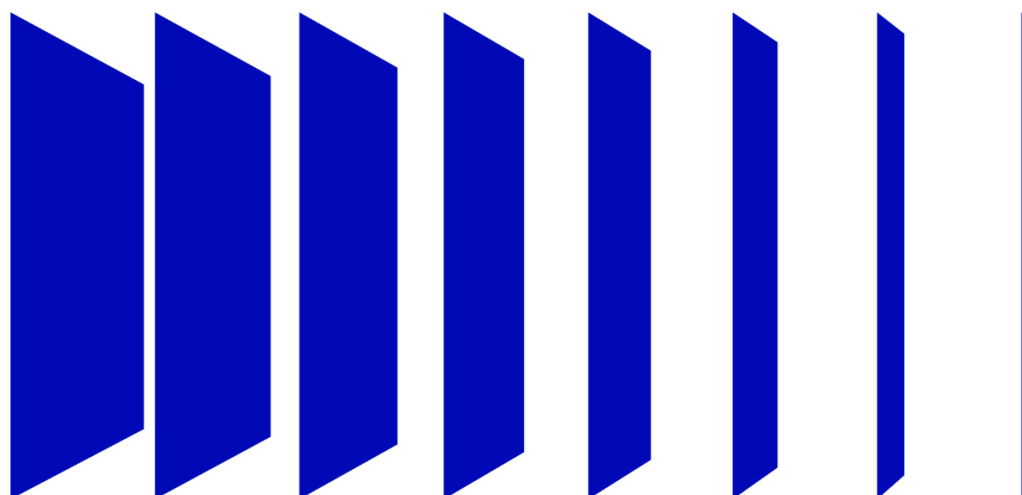
¹⁶¹ THE WHITE HOUSE, *Building Resilient Supply Chains, Revitalizing American Manufacturing, and Fostering Broad-Based Growth*, Washington (D.C.), The White House, juin 2021

¹⁶² Jean-Michel Bezat, Cédric Pietralunga et Elise Vincent, « Défense : le ministère réfléchit à réquisitionner le secteur civil pour refaire ses stocks d'armes », *Le Monde*, 13 juin 2022, URL : https://www.lemonde.fr/international/article/2022/06/13/defense-le-ministere-reflechit-a-requisitionner-le-secteur-civil-pour-refaire-ses-stocks-d-armes_6130033_3210.html.

A retenir :

- **La notion de criticité d'un matériau renvoie à la vulnérabilité du système aux ruptures d'approvisionnement et au caractère essentiel de celui-ci pour un secteur économique.** Elle repose sur la probabilité de disruption, l'importance pour le système et le caractère non substituable du matériau. C'est une notion évolutive temporellement et géographiquement.
- **Les chaînes d'approvisionnement sont très fragmentées** – extraction des matières premières / minerais ; transformation des minerais et raffinage ; fabrication des composants et produits intermédiaires ; assemblage du produit fini – et certaines étapes relèvent d'un haut degré de technicité. Celui-ci limite le nombre d'acteurs compétents, accentuant les dépendances. Cette fragmentation, combinée à la dispersion géographique des activités (extraction, raffinage, fabrication), multiplie les points de vulnérabilité tout au long de la chaîne.
- **Les applications de défense utilisent une grande diversité de matériaux**, jusqu'à 28 métaux critiques différents. Les exigences de performance des matériaux sont élevées, justifiant d'importants coûts de transformation et limitant le recours à des substituts. Le degré de criticité des métaux utilisés dans le secteur de la défense est surtout lié à la dépendance à une filière industrielle spécifique : obtention d'un matériau de qualité requise, alliages spécifiques etc.
- **Le principal risque d'approvisionnement** identifié pour les applications de défense **est le goulet d'étranglement lié à la concentration des capacités de transformation en Chine**, qui pratique des politiques *d'export control*. Par exemple, 40 % des semi-conducteurs nécessaires au fonctionnement des systèmes d'armes et des infrastructures du Département de la Défense (DoD) américain dépendraient de fournisseurs chinois.
- Le secteur de la défense dispose, en volume, d'une capacité d'achat suffisante pour sécuriser des quantités limitées de métaux stratégiques, y compris de terres rares. Toutefois, **l'absence ou l'insuffisance de capacités industrielles en aval (raffinage, transformation et fabrication de composant) constitue un risque majeur.**
- Le programme DÉFENDRE vise précisément à répondre à ces enjeux : **identifier et quantifier les dépendances énergétiques et minérales des forces armées et de l'industrie de défense, évaluer les risques associés, et éclairer les choix technologiques et industriels nécessaires pour concilier transition énergétique, souveraineté et maintien des capacités opérationnelles à long terme, en intégrant les possibles conflits d'usage avec les besoins de l'économie civile.**

Conclusion



Sans prétendre apporter dès à présent l'ensemble des réponses à ces défis, ce rapport met en évidence plusieurs tendances structurantes qui devraient façonner l'environnement de défense des prochaines décennies et auxquelles le programme DÉFENDRE entend apporter des éléments d'analyse et d'aide à la décision. La présente conclusion est organisée autour de cinq ensembles de constats et de questionnements portant respectivement sur les dépendances énergétiques et matérielles du secteur, les tendances de fond à l'œuvre, les risques liés à la transition énergétique, les effets du changement climatique et les principaux axes d'investigation qui guideront la suite des travaux.

Sur les dépendances énergétiques

- Les flux énergétiques sont consubstantiels au fonctionnement des armées et la base industrielle et technologique de défense : mobilité des forces, systèmes d'armes, emprises, fabrication des équipements etc.
- Le secteur de la défense présente une dépendance forte aux énergies fossiles importées : le pétrole représente 75% de la consommation énergétique directe du ministère des Armées.
- Les dépendances énergétiques indirectes (énergie incorporée dans la fabrication des systèmes d'armes, la supply chain, les prestataires) restent largement non documentées et constituent un angle mort du bilan énergétique du secteur.

Un recours aux chaînes d'approvisionnement dominées par quelques acteurs sur les métaux critiques

- Les chaînes d'approvisionnement en métaux critiques sont fragmentées, de l'extraction à la fabrication des produits finis, en passant par les étapes de transformation. Toutes les étapes sont dominées par seulement quelques acteurs : la Chine en particulier dispose d'un contrôle quasi monopolistique sur le raffinage de nombre de métaux critiques.
- Les applications de défense requièrent un grand nombre de métaux, pour des applications nombreuses, complexes et pour l'ensemble des milieux. Les hauts niveaux de performance attendus pour ces métaux nécessitent des filières spécialisées de transformation de la matière première, accentuant les vulnérabilités.

Sur les tendances à l'œuvre

- Plusieurs dynamiques convergentes laissent présager une augmentation des besoins énergétiques et matières du secteur : montée en puissance des capacités militaires, hausse de l'intensité énergétique des systèmes, essor de nouvelles technologies énergivores (systèmes autonomes, numérisation, données, spatial), et augmentation des volumes de production de la BITD dans le contexte post-2022
- Cette trajectoire haussière se heurte à un triple impératif : la transition énergétique mondiale, la déplétion progressive des ressources fossiles et les enjeux de souveraineté énergétique, qui imposent de réduire la consommation d'énergies fossiles et d'accélérer la décarbonation

- Pour le secteur de la défense, ces dynamiques créent un risque de divergence croissante avec un tissu civil en pleine mutation — sur les technologies, les compétences, les infrastructures et les ressources énergétiques disponibles — susceptible d'altérer à terme la capacité des armées à assurer leurs missions, a fortiori dans l'hypothèse d'un engagement majeur

Sur les risques de transition

- La transition énergétique impose un effort massif à l'ensemble de l'économie civile (réorientation des compétences, reconversion industrielle, sobriété) dans un contexte où certaines technologies militaires resteront dépendantes des énergies fossiles à moyen terme. Dans ce contexte, l'implication du secteur militaire revêt une dimension réputationnelle importante.
- Comment concilier les besoins des armées et ceux de l'économie civile lorsque des tensions sur les ressources énergétiques et matérielles imposent des arbitrages à l'échelle nationale ou européenne ?
- Des enjeux de compétences et d'emploi industriel se posent également : les transformations de la BITD induites par la transition énergétique ne sont pas sans conséquences sur les filières et les savoir-faire. Le maintien des infrastructures civiles d'approvisionnement et de stockage des énergies fossiles n'est pas garanti.

Un contexte aggravant : les effets du changement climatique

- À ces tensions s'ajoute la pression du changement climatique, qui génère des effets déstabilisateurs directs créant un environnement géopolitique plus instable aux conséquences directes pour les armées.
- Les conséquences du changement climatique élargissent le domaine d'activité des armées - soutien aux forces de sécurité civile lors de catastrophes climatiques, ouverture de nouvelles zones géostratégiques etc. - faisant peser un risque de suractivité.
- A cela s'ajoute une détérioration du contexte international, bien que plus incertain.

Des questions que le programme DEFENDRE devra éclairer

- Quels sont les besoins énergétiques et matières du secteur à long terme ? A-t-on les ressources disponibles ? Sur quelle base arbitrer entre capacité opérationnelle, résilience et contraintes physiques de la transition ?
- Quels leviers sont réellement pertinents pour les armées — sobriété opérationnelle, efficacité énergétique, substitution technologique — et dans quelles proportions ?
- Quels choix de modèle d'armée et de format capacitaire permettent de tenir compte des ressources physiques disponibles sans sacrifier les besoins opérationnels ?
- Comment anticiper et planifier la sanctuarisation des ressources militaires dans les arbitrages nationaux et européens à venir ?

- Comment reprendre en main les étapes des chaînes d’approvisionnement en matières premières critiques — projets miniers, relocalisation des étapes de transformation, recyclage, sobriété ?
- Pour l’industrie de défense, comment gérer simultanément les risques croissants liés aux effets du changement climatique sur la disponibilité des équipements et le besoin d’augmentation rapide des capacités de production imposé par le contexte géopolitique ?

Cette liste de questions n’est pas exhaustive, de nombreuses autres seront soulevées tout au long de ce programme de recherche.

Équipe du programme

Dr Noémie Rebière, cheffe de projet DÉFENDRE

Docteure en géopolitique de l'Institut Français de Géopolitique, elle est spécialiste des enjeux énergétiques dans le domaine de la défense et de la sécurité. Elle a travaillé plusieurs années au ministère des Armées et a été auditrice civile à l'École de guerre. Elle est officier de réserve dans l'Armée de l'Air et de l'Espace.

Alan Lemoine, chargé de projet DÉFENDRE

Diplômé du Master « Gouvernance des risques environnementaux », co-délivré par l'Ecole Centrale de Lyon, l'Université Lumière Lyon 2 et l'Université Jean Moulin Lyon 3, il a co-piloté pour le Shift le rapport « Décarbonons le Sport » (2025) et contribue désormais au programme DÉFENDRE.

Alexandre François, chargé de projet DÉFENDRE

Ingénieur de l'École Polytechnique et diplômé d'un master de recherche en intelligence artificielle de l'ENS, il a mené des recherches sur les modèles de prédictions climatiques au département de Sciences de l'environnement de Columbia University. Il a exercé comme analyste en décarbonation au Secrétariat général à la planification écologique (SGPE).

Louis Ollion, expert matières premières critiques pour le programme DÉFENDRE

Co-pilote du Chapitre III "Matériaux critiques : quels usages, quelles dépendances ?", il est diplômé de l'Institut d'études politiques de Bordeaux et de l'Ecole des Mines de Paris. Il met à profit plusieurs années d'expérience dans l'énergie, la soutenabilité et les matériaux (nucléaire, recyclage, matériaux critiques).

Wafa Houhamdi, experte en ingénierie des matériaux pour le programme DÉFENDRE

Co-rédactrice du Chapitre III "Matériaux critiques : quels usages, quelles dépendances ?", elle est ingénieure diplômée de l'Ecole Centrale de Nantes. Passée par l'IHEDN en 2022, elle est aussi diplômée en économie de l'Université Paris Dauphine, en sécurité et développement du King's College de Londres et s'est spécialisée en science des matériaux à KTH en Suède puis à l'OCDE.

Jean-Noël Geist, coordinateur du programme DÉFENDRE

Responsable des affaires publiques et de la coopération avec l'association de bénévoles The Shifters pour le Shift Project, il est particulièrement féru de politique et de science-fiction. Il a initié et coordonné plusieurs programmes de travail sur des secteurs nouveaux pour le Shift à partir : enseignement supérieur, administration publique, culture, santé, sport puis défense.

Parrains du programme

Laurent Lherbette, général de corps d'armée (2S) et parrain du programme DÉFENDRE

Né à Angers, le GCA 2S Laurent LHERBETTE est un pilote de chasse entré à l'Ecole de l'air en 1987. A l'issue d'une première phase opérationnelle qui l'aura conduit sur plusieurs théâtres d'opération, il sert en cabinet ministériel et en ambassade. Impliqué dans le fonctionnement des armées (entraînement, maintien en condition opérationnel, soutien,

budget), il est nommé général. Il se voit confier des postes de commandement en opération et à responsabilités nationales. Il quitte le service actif en 2024 alors qu'il est commandant territorial de l'armée de l'air et de l'espace, et officier général de zone de défense sud ouest à Bordeaux. Il est Shifter depuis 2025.

Jean-Marc Jancovici, président du Shift Project et parrain du programme DÉFENDRE

Jean-Marc Jancovici est le président du think tank The Shift Project. Co-fondateur et associé de Carbone 4, cabinet de conseil en stratégie énergie-climat, il est également professeur à Mines Paris Tech et membre du Haut Conseil pour le Climat créé auprès du Premier Ministre. Il est auteur de 7 livres, d'un site internet (jancovici.com), et de nombreux articles pour vulgariser les questions relatives à l'énergie et au changement climatique. Il est ancien élève de l'Ecole polytechnique et de Telecom ParisTech.

Soutiens du programme

Héloïse Lesimple, conseillère affaires publiques

Adjointe au responsable des affaires publiques, elle est chargée des affaires parlementaires et gouvernementales et a coordonné la diffusion des travaux du Plan robuste pour l'économie française (PREF) et notamment « Réussir la transition dans l'incertitude, la méthode Shift en 20 chantiers ». Diplômée de l'EDHEC, elle a suivi un parcours d'une dizaine d'années dans la santé et la culture. Elle a récemment obtenu un Mastère spécialisé en environnement d'AgroParisTech.

Mona Poulain, pilote communication

Diplômée du CELSA Sorbonne Université, elle rejoint l'équipe communication et événementiel du Shift. Elle travaille notamment sur les programmes Santé et Défense, et en support dans l'organisation d'opérations événementielles, notamment sur la diffusion du Plan robuste pour l'économie française (PREF) et le rapport « Réussir la transition dans l'incertitude, la méthode Shift en 20 chantiers ».

Solène Monchablon, chargée de communication

Diplômée d'une licence en science politique et relations internationales à ESPOL (Lille) et d'un master en communication publique et influence à l'EFAP, elle s'est orientée vers la communication d'intérêt général, une conviction nourrie par son passage à la Mission Bassin Minier (Nord-Pas-de-Calais) et par son engagement associatif. Au Shift, elle travaille sur des projets transversaux et contribue à la rédaction de contenu pour les réseaux sociaux.

The Shift Project est un groupe de réflexion qui vise à éclairer et influencer le débat sur les défis climat-énergie.

Nous sommes une association d'intérêt général. Nos membres financeurs sont pour la plupart des entreprises. Guidé par l'exigence de rigueur scientifique et technique, notre regard sur l'économie est avant tout physique et systémique.

www.theshiftproject.org

Contacts

Projet:

defense@theshiftproject.org

Presse :

Mona Poulain

Pilote communication

mona.poulain@theshiftproject.org

Graphisme

Jérémy Masse

