



Tendances Scientifiques et Technologiques 2025–2045

Volume 1

Table des matières

Avant-propos	3
Introduction	4
Synthèse	5
<hr/>	
Analyse détaillée des grandes tendances	
Grande tendance n° 1 : Évolution des domaines de compétition	10
Grande tendance n° 2 : Course à la supériorité en matière d'intelligence artificielle et de technologies quantiques	16
Grande tendance n° 3 : Révolution de la biotechnologie	23
Grande tendance n° 4 : Inégalités dans l'accès aux ressources	29
Grande tendance n° 5 : Érosion de la confiance du public	34
Grande tendance n° 6 : Intégration des technologies et dépendances	39
<hr/>	
Conclusions	45
Abréviations	46
Méthode	47
Contributeurs	47
Bibliographie	48

Avertissement – Les recherches et les analyses sur lesquelles s'appuie le présent rapport et les conclusions qu'il contient sont le fruit d'un travail mené par l'Organisation OTAN pour la science et la technologie (STO), avec le concours de la communauté S&T « défense » de l'Alliance, du Commandement Allié Transformation (ACT) et de l'Agence OTAN d'information et de communication (NCIA). Ce rapport ne reflète pas les positions officielles de l'OTAN ou des Alliés, mais vise à fournir aux dirigeants de l'OTAN et de ses pays membres des avis éclairés sur des questions importantes touchant à la science et à la technologie.

Avant-propos

Jamais la géopolitique et la prise de décision stratégique n'ont été autant influencées, voire dictées, par la science et la technologie, et elles le seront encore plus à l'avenir. Dès lors, il est vital que l'OTAN et les Alliés aient conscience que les décisions qu'ils prennent aujourd'hui auront un impact sur les options et les opportunités qui s'offriront à eux demain et sur leur futur état de préparation. Il faut donc que les dirigeants analysent l'environnement scientifique et technologique et les grandes tendances qui le traversent en les replaçant dans le contexte actuel, celui d'une compétition stratégique croissante. Le présent rapport, qui s'intéresse aux vingt prochaines années, propose des pistes qui permettent de mieux comprendre ces interactions complexes. À mesure que les tendances qui y sont décrites se matérialiseront, il sera de plus en plus important

Radmila Shekerinska

Secrétaire générale déléguée de l'OTAN

que les responsables politiques et militaires soient à l'écoute des experts techniques et qu'ils coopèrent étroitement avec des partenaires de confiance issus de la société civile. Pour que l'Alliance puisse tirer le meilleur parti des progrès scientifiques et technologiques, il faudra cependant aussi donner la priorité à la mise en place de garde-fous éthiques et juridiques, aux partenariats mondiaux ainsi qu'à la collaboration avec le secteur privé et au sein de la communauté scientifique. En effet, alors que les dirigeants des pays de l'Alliance cherchent à préparer le terrain pour les scénarios futurs et à faire en sorte que les chocs qui pourraient en découler aient le moins d'incidences possible sur le milliard de personnes que l'OTAN protège, seule une approche mobilisant tous les rouages de la société leur permettra d'apprécier les risques, de saisir les opportunités et de peser les options à venir.

La science et la technologie, sources de prospérité et de progrès, sont le fondement de notre société moderne. L'Organisation pour la science et la technologie, créée pour répondre aux besoins collectifs des Alliés et des partenaires dans ces domaines, a pour mission de remettre aux dirigeants de l'OTAN des avis stratégiques s'appuyant sur des données probantes. Et comme ces domaines vont peser de plus en plus dans les décisions stratégiques, il est vital d'exploiter les connaissances techniques et de bien cerner le contexte dans lequel s'inscrivent les développements scientifiques et technologiques. En passant en revue les interactions entre les avancées scientifiques et technologiques et l'économie, la géopolitique et la

Bryan Wells

Conseiller scientifique de l'OTAN

société, le présent rapport offre des éléments de contexte utiles pour appréhender l'environnement géostratégique d'aujourd'hui et de demain. Il décrit six grandes tendances à l'œuvre dans le domaine de la science et de la technologie, et donne ainsi aux décideurs des clés leur permettant de bien comprendre les choix qui s'offrent à eux et de préparer au mieux l'Alliance aux défis qui s'annoncent. Si l'on veut que l'OTAN et les Alliés soient mieux à même de l'emporter sur leurs compétiteurs actuels et futurs, et aussi de rester solides, résilients et prêts à faire face à n'importe quelle menace, il faut continuer d'acquérir des connaissances et d'investir dans la science et dans la technologie.

Introduction

Le présent rapport fait un tour d'horizon des grandes tendances sociotechniques qui façonneront le paysage technologique sur la période 2025-2045. Il analyse les interactions entre, d'une part, les sciences et technologies émergentes et de rupture et, d'autre part, la macroéconomie, la géopolitique et la société.

Ce document public est le dernier rapport en date de la série phare de la STO sur les grandes tendances S&T. La présente édition s'inscrit dans le prolongement de la précédente, publiée en mars 2023, qui portait sur une période de vingt ans allant jusqu'en 2043. À l'instar des précédents, ce rapport vise à mettre en lumière les incidences de la science et de la technologie sur les options s'offrant aux décideurs politiques, sur les capacités de défense et les opérations militaires de l'Alliance ainsi que sur les fonctions de l'entreprise OTAN.

La présente publication vient compléter les travaux de prospective menés par l'OTAN en offrant un éclairage S&T sur les tendances qui, au vu des interconnexions et des interdépendances

croissantes entre technologies et géopolitique, ne manqueront pas d'influer sur de nombreux aspects du travail de l'Alliance au cours des vingt prochaines années. Bien que ce rapport s'adresse à un public de hauts responsables, il se veut aussi accessible à un large éventail de lecteurs, y compris aux professionnels des sciences et des technologies ainsi que d'autres secteurs.

Ce document donne un aperçu de la manière dont la science et la technologie influencent les priorités géopolitiques, et vice versa ; il offre ainsi aux décideurs de haut niveau des pistes sur les choix stratégiques à opérer dès aujourd'hui pour répondre aux défis qui se profilent à l'horizon, et au-delà.

Évolution des domaines de compétition



Course à la supériorité en matière d'intelligence artificielle et de technologies quantiques



Révolution de la biotechnologie



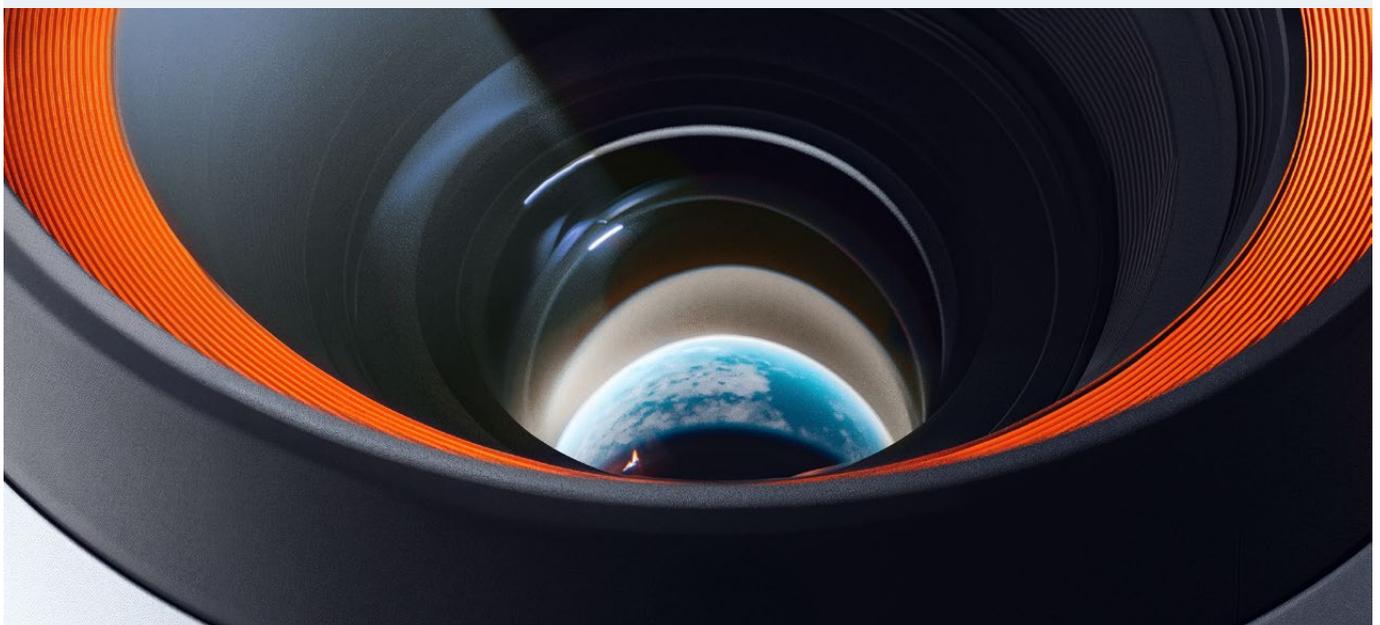
Inégalités dans l'accès aux ressources



Érosion de la confiance du public

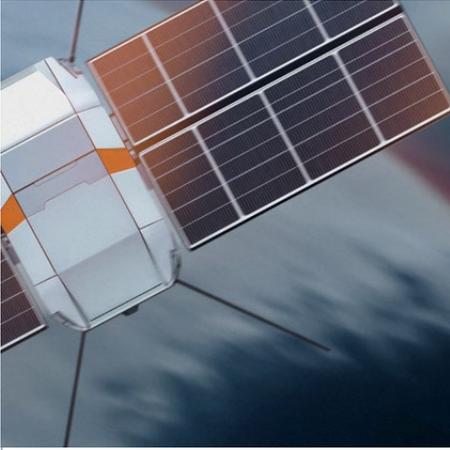


Intégration des technologies et dépendances



Synthèse

Chacune des grandes tendances présentées ci-après correspond à un courant de fond qui est *influencé par la science et la technologie en même temps qu'il les influence*. Au nombre de six, ces tendances façonnent ou façonneront l'environnement stratégique de l'OTAN et orienteront l'évolution future des technologies émergentes et des technologies de rupture. Elles auront également des incidences sur la manière dont les pouvoirs publics et les sociétés des pays de l'Alliance réagiront à l'évolution des politiques en matière de S&T et sur celles qu'ils développeront. On s'attend à ce que les tendances ci-après recomposent le paysage scientifique et technologique pour la période 2025-2045, chacune avec des incidences différentes et à son propre rythme.

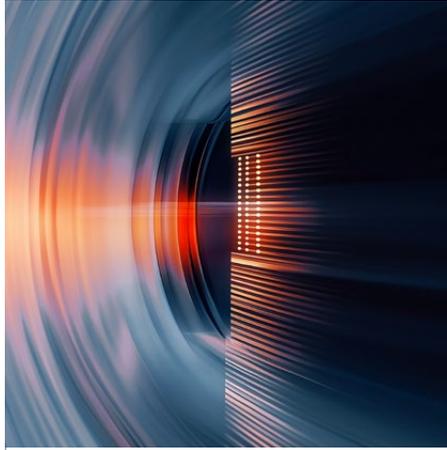


GRANDE TENDANCE N° 1
Évolution des domaines de compétition

Dans un contexte d'intensification de la compétition stratégique internationale, les progrès scientifiques et technologiques vont faire évoluer la nature de cette compétition, dans les domaines traditionnels comme non traditionnels (cyber, espace, hybride, information, par exemple, ainsi que dans des régions telles que le Grand Nord). Dans le même temps, le développement des pratiques de guerre hybride et l'importance accrue des opérations multimilieus devraient venir encore exacerber la dépendance à l'égard de la science et de la technologie dans tous les domaines.

Ce qu'il faut retenir

- Les technologies émergentes mettent les dirigeants face à toute une série de choix stratégiques qu'il convient de faire dès aujourd'hui si l'on veut que l'Alliance soit apte à opérer dans l'environnement de demain.
- À l'avenir, les enjeux liés aux technologies d'importance critique seront déterminants dans la compétition géopolitique, tandis que la compétition géopolitique dopera les développements scientifiques et technologiques.
- Alors que les pratiques de guerre hybride se développent, il devient plus probable d'assister à des chocs causés par l'utilisation de tactiques telles que la coercition économique, et les milieux cyber et spatial occuperont une place plus importante dans les contestations et conflits à venir.

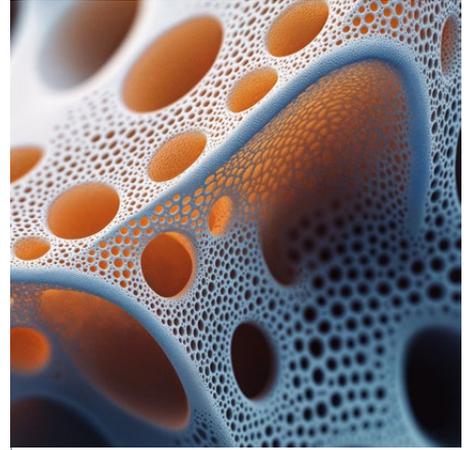


GRANDE TENDANCE N° 2
Course à la supériorité en matière d'intelligence artificielle et de technologies quantiques

Au cours des vingt prochaines années, l'intelligence artificielle (IA) et le quantique vont entraîner des changements profonds dans toute une série de branches d'activité. Parallèlement, la concurrence entre les principaux protagonistes de chaque secteur ira en s'accroissant. En particulier, le recrutement, la formation et la fidélisation des talents vont devenir avec le temps des enjeux majeurs de cette évolution.

Ce qu'il faut retenir

- La transformation numérique (qui suppose l'accès à d'importants volumes de données de qualité, ainsi qu'à des outils de stockage et de diffusion) va demeurer incontournable dans un contexte de développement de l'intelligence artificielle et des technologies quantiques.
- Dans le secteur technologique, la concurrence sera rude sur le terrain du recrutement, de la formation et de la fidélisation des talents.
- Pour gagner la course, des pays qui partagent les mêmes valeurs devront mettre en commun leur expertise et leurs ressources.

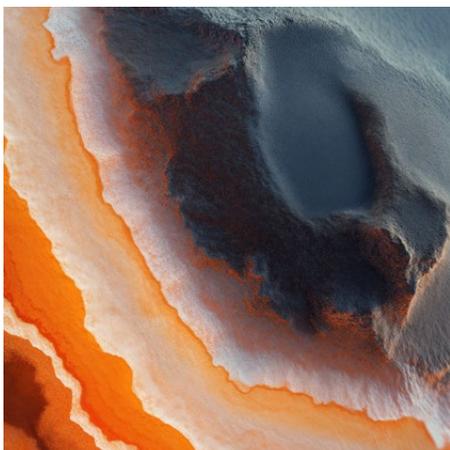


GRANDE TENDANCE N° 3
Révolution de la biotechnologie

La prochaine révolution technologique sera celle de la biologie de synthèse. Tandis que les développements se poursuivent dans les domaines qui s'y rattachent (par exemple données biologiques, biocapteurs), l'avènement de la biologie de synthèse fera de certains sujets comme la sécurité de la recherche (protection des travaux de recherche sensibles) et la réglementation des questions centrales.

Ce qu'il faut retenir

- Ces vingt prochaines années, les technologies liées à la biologie de synthèse vont émerger comme des technologies de rupture et provoquer des bouleversements profonds, tant dans le domaine civil que militaire.
- Les avantages potentiels d'un recours accru aux biotechnologies sont considérables, en particulier pour les soins de santé, mais les risques d'un détournement de ces technologies sont également très élevés. Aussi faut-il examiner attentivement les incidences des biotechnologies sur la sécurité et la défense, y compris la question de la protection et du partage des travaux de recherche.
- Les mesures visant à protéger les travaux de recherche doivent respecter nos valeurs et normes communes.



GRANDE TENDANCE N° 4 Inégalités dans l'accès aux ressources

Les progrès scientifiques et technologiques contribuent certes à creuser les inégalités sur le plan des ressources, mais également à stimuler le développement économique, notamment grâce à la mise au point de solutions fondées sur l'IA, de biotechnologies, de technologies vertes et de matériaux innovants/de pointe. Dans ce contexte, la résilience et la sécurité économiques vont devenir de plus en plus essentielles, tout comme les partenariats de l'OTAN dans le monde. Il faut en outre s'attendre à ce que le techno-nationalisme prenne de l'ampleur sous l'influence de dirigeants qui considèrent que la maîtrise technologique fait de plus en plus partie intégrante de la réponse à apporter aux besoins économiques, sociétaux et de sécurité d'un pays.

Ce qu'il faut retenir

- Le changement climatique va avoir un impact sur l'accès des Alliés aux ressources essentielles pour l'innovation scientifique et technologique.
- Les chocs qui s'annoncent, notamment ceux qui résulteront du changement climatique, vont exacerber les tensions entre les pays capables de s'en remettre relativement facilement et les autres.
- Les technologies qui seront développées et adoptées demain aideront à apaiser ces tensions mais auront aussi pour effet de les aggraver.

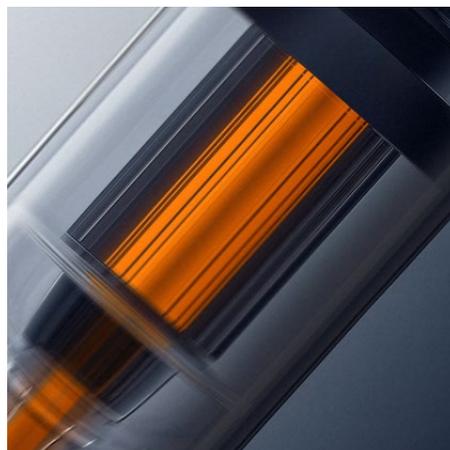


GRANDE TENDANCE N° 5 Érosion de la confiance du public

La confiance dans la science, les institutions et les pouvoirs publics risque encore de s'éroder et de se fragmenter, phénomène que la technologie, en particulier l'IA générative et ses dangers, a pour principal effet d'accélérer. Dans les vingt prochaines années, on peut ainsi s'attendre à ce que la communication stratégique, la souveraineté numérique et l'éducation à la technologie deviennent des sujets importants, de même que la nécessité de disposer de solutions scientifiques et technologiques dignes de confiance.

Ce qu'il faut retenir

- Les dirigeants de la planète doivent unir leurs voix pour encourager l'utilisation responsable des technologies émergentes et des technologies de rupture.
- Aujourd'hui, des acteurs malintentionnés utilisent les technologies, en particulier l'intelligence artificielle, pour décrédibiliser les pouvoirs publics, les institutions et la science aux yeux des citoyens, et ce phénomène est appelé à s'aggraver sous l'effet d'une polarisation politique croissante.
- Même si, sur le long terme, la technologie elle-même pourrait nous procurer les solutions dont nous avons besoin pour lutter contre la désinformation et la mésinformation, dans l'immédiat, nos meilleures armes face à ces phénomènes sont la communication stratégique, les mécanismes juridiques et réglementaires ainsi que l'éducation à la technologie.



GRANDE TENDANCE N° 6 Intégration des technologies et dépendances

À l'avenir, les progrès scientifiques et technologiques continueront d'apporter des solutions à des défis complexes, mais l'accès à ces solutions sera inégal. Pour les pays qui disposent de technologies de pointe, les disparités en matière de réglementation et de concepts d'opération viendront compliquer l'interopérabilité et la normalisation. Dans le même temps, l'innovation étant de plus en plus portée par le secteur privé, l'intégration civilo-militaire va se heurter à de nouveaux défis et, sur le long terme, la dépendance accrue à l'égard de la science et de la technologie dans les domaines civils et militaires pourrait avoir des conséquences inattendues.

Ce qu'il faut retenir

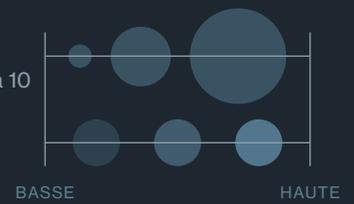
- L'interopérabilité des capacités scientifiques et technologiques de demain devra être assurée dès la conception.
- L'interopérabilité sera plus essentielle que jamais pour les Alliés au cours des vingt prochaines années, mais pour y parvenir, il faudra surmonter de nouvelles difficultés, qui résultent du fait que les disparités s'accroissent en ce qui concerne l'accès aux technologies, leur utilisation et leur réglementation.
- Il est nécessaire de coopérer sur le plan économique avec les pays qui partagent nos valeurs et avec les partenaires du secteur privé.
- Sachant que la science et la technologie jouent un rôle de plus en plus central dans la conduite d'un éventail d'opérations militaires de plus en plus large, la dépendance croissante à l'égard des acteurs privés pour des capacités de défense d'importance critique va devenir de plus en plus problématique.

Grandes tendances S&T

Chronologie et impact

Impact sur l'OTAN
Évalué sur une échelle de 0 à 10

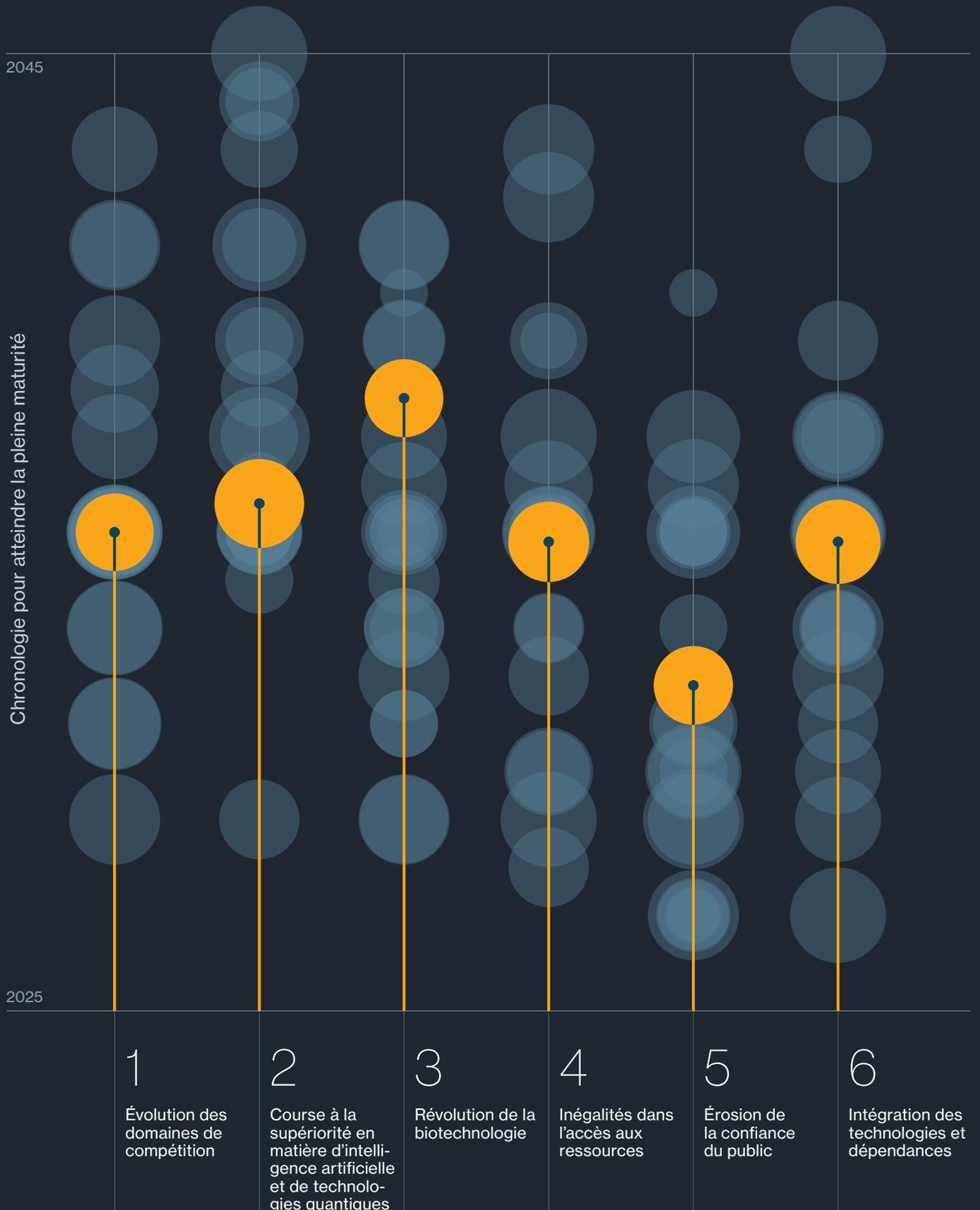
Fréquence des réponses



BASSE

HAUTE

● Impact moyen attendu pour chaque tendance



Éléments transversaux

En analysant les six grandes tendances décrites dans le présent rapport, on voit apparaître des thèmes récurrents, quels que soient les domaines scientifiques et technologiques ou les réalités géopolitiques abordés. Les quatre thèmes récurrents qui sont considérés comme revêtant une importance particulière sont les suivants :

	La remise en cause de l'ordre international fondé sur des règles
	Le changement climatique
	Les partenariats mondiaux
	L'accroissement du rôle joué par le secteur privé

Ces éléments sont le moteur et/ou le résultat de plusieurs grandes tendances. En d'autres termes, ils vont soit contribuer aux développements S&T de demain soit être fortement influencés par ces derniers, ou les deux. Ces *éléments*

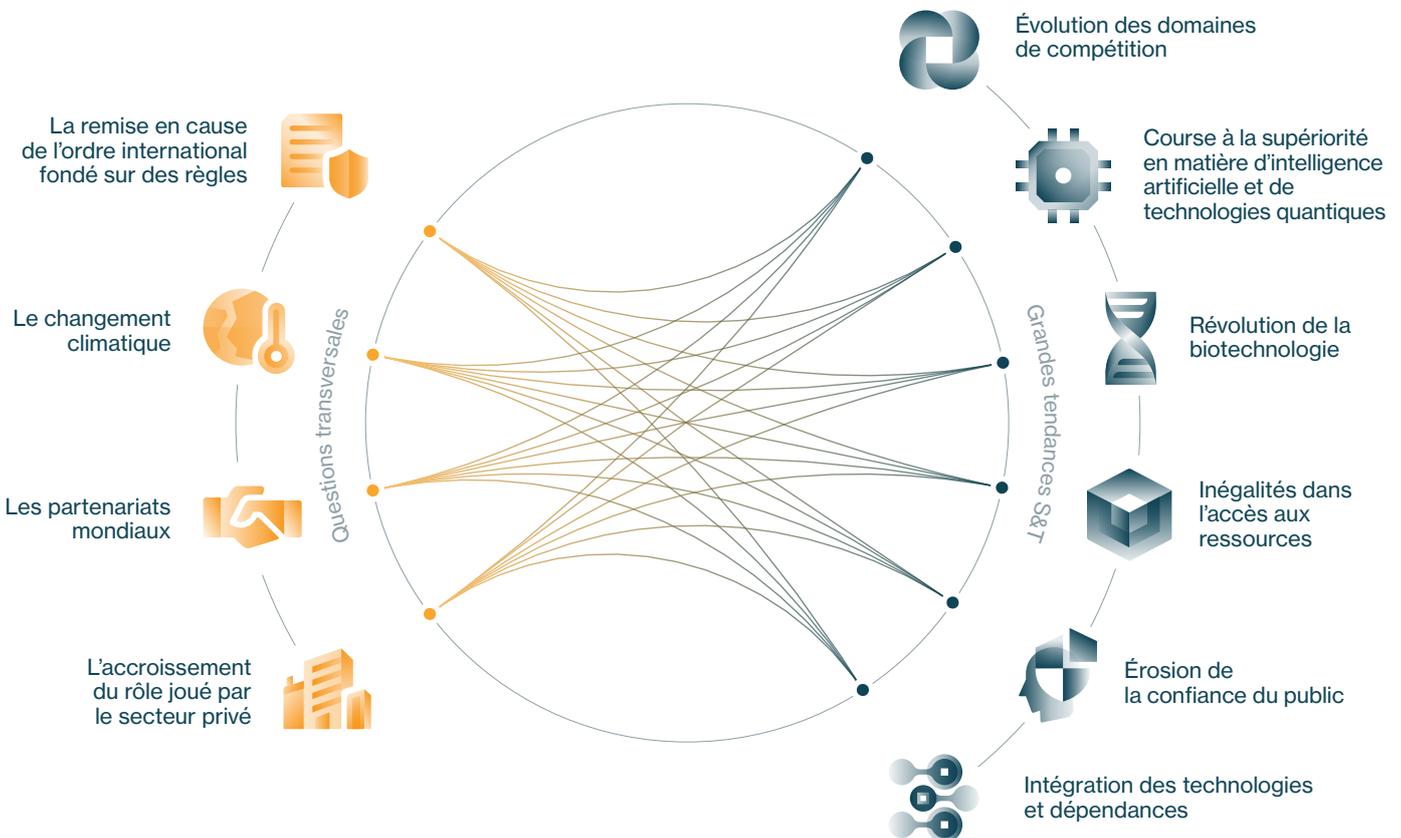
transversaux permettent d'analyser sous un angle thématique les tendances et leur impact combiné, et sont donc mis en avant dans les sections « Incidences » ci-après.

Les considérations relatives à la promotion de la collaboration scientifique et à la protection des travaux de recherche sensibles, aussi appelée « sécurité de la recherche », revêtent elles aussi une grande importance pour plusieurs des tendances. Par « sécurité de la recherche », on entend la protection de la recherche scientifique dès les premiers stades – en particulier la protection des travaux ayant des applications dans le secteur de la défense et de la sécurité – contre toute immixtion (accès, influence ou espionnage) de la part d'acteurs étatiques (ou non étatiques) étrangers, l'idée étant de protéger la sécurité nationale et de tirer un avantage décisif de la technologie dans l'ensemble des instruments de puissance. Il est essentiel de tenir compte de ces impératifs au moment d'évaluer les futurs développements scientifiques et technologiques. La sécurité de la recherche n'a toutefois pas été incluse dans les grands éléments transversaux.

Structure du rapport

L'analyse de chaque grande tendance comprend les sections suivantes : ce qu'il faut retenir, contexte, incidences, état des lieux et pistes de réflexion pour les dirigeants.

Questions transversales pour les grandes tendances S&T





Grande tendance n° 1

Évolution des
domaines de
compétition



Impact attendu et chronologie

Présent

2025

Impact sur l'OTAN



Futur

2045

Ce qu'il faut retenir

Les technologies émergentes mettent les dirigeants face à toute une série de choix stratégiques qu'il convient de faire dès aujourd'hui si l'on veut que l'Alliance soit apte à opérer dans l'environnement de demain.

À l'avenir, les enjeux liés aux technologies d'importance critique seront déterminants dans la compétition géopolitique, tandis que la compétition géopolitique dopera les développements scientifiques et technologiques.

Alors que les pratiques de guerre hybride se développent, il devient plus probable d'assister à des chocs causés par l'utilisation de tactiques telles que la coercition économique, et les milieux cyber et spatial occuperont une place plus importante dans les contestations et conflits à venir.

1.1 Contexte

Comme indiqué dans le concept stratégique de l'OTAN de 2022, l'environnement de sécurité qui prévaut aujourd'hui se caractérise par « la compétition stratégique, l'instabilité et les chocs répétés »¹. Dans ce contexte, *les technologies émergentes et technologies de rupture gagnent en importance sur le plan stratégique, et sont en passe de devenir l'un des principaux champs de la compétition internationale*. Alors que celle-ci s'intensifie, les progrès scientifiques et technologiques vont faire évoluer la nature de la compétition stratégique, dans les domaines traditionnels comme non traditionnels (guerre hybride et guerre de l'information, contestation dans le Grand Nord, etc.). Dans le même temps, le développement des pratiques de guerre hybride (utilisation conjointe de la force militaire traditionnelle et de tactiques telles que la coercition, les opérations d'influence ou le sabotage) et l'importance accrue des opérations multimilieu viendront encore exacerber la dépendance à l'égard de la science et de la technologie dans les différents domaines,

parce que la technologie est le maillon essentiel entre les systèmes militaires et les opérations.

Les experts s'accordent largement à dire que la compétition entre les grandes puissances s'accroît et que cette évolution ne semble pas près de s'inverser à brève échéance². Même si les développements actuels ne débouchent pas nécessairement sur de nouveaux conflits cinétiques, il est particulièrement important de surveiller toute la gamme des interactions entre les grandes puissances et leurs alliés, des plus amicales aux plus hostiles, alors que le risque d'une confrontation directe entre des États puissants (dotés de l'arme nucléaire) n'a jamais paru aussi élevé depuis trente ans³. Si on analyse cette tendance par le prisme de la science et de la technologie, on voit combien les technologies critiques sont susceptibles d'influer sur la compétition de demain et combien la compétition géopolitique pourrait dopera les futurs développements scientifiques et technologiques.

1.2 Incidences

La compétition stratégique est l'un des principaux moteurs du développement scientifique et technologique et, inversement, les progrès dans les secteurs de la science et de la technologie entraînent l'émergence de nouveaux terrains de compétition. Cela vaut particulièrement pour le cyber et l'espace, dans lesquels on s'attend à une augmentation sensible du nombre d'attaques restant en deçà du seuil de la guerre. À cela s'ajoute

que le risque de voir des mesures prises dans le milieu cyber ou spatial déclencher un conflit cinétique direct s'accroît également. L'espace, environnement de plus en plus encombré où s'exerce une logique de plus en plus marquée par la contestation, revêt une importance particulière en ce sens qu'il intervient de près ou de loin dans tous les aspects de notre quotidien (du marché boursier mondial aux GPS).

Les conflits dans les milieux non traditionnels [...] seront beaucoup plus courants dans les vingt prochaines années.

Les progrès technologiques actuels permettent aux acteurs étatiques et non étatiques de s'engager dans des conflits aux formes plus diverses, que ce soit dans le milieu cyber ou dans le cadre d'attaques non cinétiques, hybrides ou de zone grise. Il y a donc fort à parier que les conflits dans les milieux non traditionnels et les attaques en deçà du seuil de la guerre seront beaucoup plus courants dans les vingt prochaines années. En outre, les capacités d'innovation, y compris dans le domaine de la défense, sont principalement aux mains du secteur privé, ce qui signifie que des individus ont à

leur portée des moyens colossaux de peser sur la compétition stratégique de demain. Cela complique terriblement l'attribution, la définition de la norme et l'élaboration de réponses proportionnées.

Ces différents défis se conjuguent à l'explosion du nombre d'applications de l'intelligence artificielle (IA), laquelle pourrait bien transformer les méthodes standard de prévention des conflits, ce qui amène les experts à penser que les mécanismes traditionnels de communication de crise ne suffiront peut-être pas à faire face aux risques qui s'annoncent⁴.

1.3 État des lieux

Les avantages offerts par la technologie sont de plus en plus déterminants pour la réussite sur le terrain.

La technologie a toujours été un facteur décisif dans l'issue d'une compétition ou d'un conflit, quelle qu'en soit la forme. Force est néanmoins de constater que le paysage actuel offre plus d'options que jamais, en raison de l'apparition de nouveaux milieux d'opération, mais aussi parce que les technologies se prêtent à de nouvelles applications dans les contextes militaires. Aujourd'hui, les avantages qu'offre la technologie sont de plus en plus déterminants pour le succès sur le terrain⁵, une dynamique que les décideurs stratégiques semblent avoir dans l'ensemble bien comprise. Prenons par exemple les États-Unis et la République

populaire de Chine : rien que ces deux dernières années, le nombre d'initiatives américaines visant à empêcher Pékin de prendre l'avantage sur le plan technologique a sensiblement augmenté ; de toute évidence, les responsables politiques des deux pays considèrent l'innovation comme un facteur essentiel de la supériorité économique et militaire⁶.

Espace

L'espace est considéré par beaucoup comme un environnement où la contestation est de plus en plus vive, où l'on s'attend à voir se jouer la lutte pour la suprématie géopolitique et militaire, même s'il n'y a pour l'heure pas de consensus international sur la question⁷. Si l'espace est depuis longtemps un outil au service de tous les autres domaines militaires – des communications aux prévisions météorologiques en passant par le suivi des adversaires ainsi que le positionnement, la navigation et la synchronisation (PNT) –, la multiplication de ses utilisations s'est néanmoins traduite au fil du temps par une plus forte dépendance aux moyens qu'il offre. L'espace est donc devenu un champ essentiel non seulement pour la projection de puissance, mais aussi pour l'efficacité opérationnelle. Une autre particularité de ce milieu est qu'il connaît une mutation rapide⁸, qui s'explique en grande partie par un accès plus aisé à la technologie et, partant, à l'espace lui-même.

L'importance stratégique accrue de l'espace et des liens de dépendance auxquels il soumet les activités militaires s'est donc progressivement traduite par une plus grande militarisation de ce milieu – notamment au travers d'une relance des initiatives visant à développer des armes antisatellites et des capacités antispaciales (cyberattaques, brouillage/leurrage de satellites). Sur le plus long terme, on peut aisément imaginer une prolifération accélérée des armes Terre-espace (en particulier des armes antisatellites), des armes à énergie dirigée et des capacités antispaciales plus sophistiquées alimentées par des technologies émergentes, en particulier si les normes et règlements internationaux régissant les opérations dans l'espace ne sont pas actualisés





pour tenir compte du risque que représenterait une course aux armements dans ce milieu⁹. On comprend dès lors que l'espace pourrait devenir le théâtre d'une conflictualité sensiblement plus marquée, qui resterait néanmoins sous le seuil de la guerre cinétique¹⁰.

De par sa commercialisation, la prolifération de ses usages civils ainsi que, à plus long terme, la hausse probable de l'utilisation de l'hypersonique et des technologies de propulsion dans l'espace, ce milieu va devenir nettement plus accessible et aussi de plus en plus encombré. En outre, compte tenu du nombre croissant d'acteurs, notamment commerciaux, qui y mènent des activités, le risque d'erreurs de calcul et autres, de collisions et d'escalade des tensions ne fera qu'augmenter dans les années à venir.

Cyber

Le milieu cyber est souvent cité comme un champ aussi important que l'espace dans la compétition à court et à moyen terme¹¹, parce que de nombreux acteurs internationaux continuent de favoriser les agressions non cinétiques sous le seuil et que l'évolution constante des technologies leur offre dans ce domaine un éventail de possibilités de plus en plus large. Bien qu'il soit généralement

peu aisé de déterminer les tendances dans ce milieu, notamment parce que les attaques sont difficilement attribuables, il n'en demeure pas moins que la cyberconflictualité est un phénomène important dont il ne faudrait pas sous-estimer les incidences. Même dans les scénarios qui entrent largement dans le cadre de la guerre conventionnelle, le cyber joue un rôle crucial pour toutes les parties impliquées. Ainsi, avant son invasion à grande échelle de l'Ukraine, en 2022, la Fédération de Russie avait mené une cyberattaque destinée à perturber les capacités C2 (commandement et contrôle) de Kyïv, à un moment critique pour l'armée ukrainienne¹². Les technologies cyber, qui sont appelées à se complexifier, vont continuer de favoriser le développement des pratiques de guerre hybride, avec pour possible conséquence une multiplication des perturbations causées par des acteurs à même de cibler avec plus de précision les infrastructures critiques et civiles ainsi que les systèmes financiers.

Développement des pratiques de guerre hybride

La guerre hybride est un phénomène qui prend de l'ampleur, et pas seulement dans les milieux militaires traditionnels ; les avancées technologiques ne sont pas étrangères à cette

évolution. Par exemple, l'utilisation conjointe de l'IA et de la robotique/des systèmes autonomes permet déjà aux forces armées de choisir parmi divers types d'opérations et d'effets, en particulier pour les activités en dessous du seuil. Les technologies de pointe permettent de mener des attaques qui sont non seulement toujours plus précises, mais aussi de plus en plus difficiles à détecter et à attribuer¹³. Les défis et les opportunités que représentent ces développements vont probablement gagner en importance non seulement parce que la compétition internationale s'intensifie, mais aussi parce qu'au niveau opératif, les opérations multimilieus sont de plus en plus fréquentes. Les experts militaires s'attendent à ce que ces opérations se multiplient sur les court et moyen termes, en raison du besoin croissant pour les forces armées de synchroniser leur action et de parvenir à une intégration en temps réel dans de nombreux milieux simultanément¹⁴.

Les développements technologiques augmentent également les possibilités de recourir à des tactiques de guerre hybride.

Les développements technologiques augmentent également les possibilités de recourir à des tactiques de guerre hybride telles que la coercition économique et les menaces informationnelles (pour en savoir plus sur ce dernier point, voir la grande tendance n° 5). En ce qui concerne la coercition économique, on sait que la technologie est un élément déterminant pour les pays qui utilisent le contrôle des exportations à des fins d'influence, comme en témoignent les récents changements dans la politique américaine relative aux semi-conducteurs¹⁵. Plus globalement, plusieurs initiatives nationales, internationales et intergouvernementales^{16,17} portant sur la sécurité économique et sur la résilience des chaînes d'approvisionnement, ont été prises récemment, sous l'effet de facteurs tels que l'intensification de la compétition entre les grandes puissances, la guerre d'agression menée par la Russie contre l'Ukraine et la pandémie de COVID-19, mais aussi en réalité en raison du potentiel de coercition, d'influence et d'exploitation associé aux technologies et aux dépendances critiques. En effet, à mesure que la compétition s'intensifie, on assiste à une instrumentalisation accrue des dépendances économiques, voire à une « arsenalisation des interdépendances »¹⁸.

Compte tenu de tous ces éléments, il apparaît que la sécurité économique va nécessiter plus que des mesures visant à réduire les risques pesant sur les chaînes d'approvisionnement ou à protéger les infrastructures critiques : il faudra également privilégier systématiquement le développement technologique et encourager de l'innovation et les investissements. En outre, la réponse aux défis évoqués suppose une coopération entre des acteurs internationaux parfois très divers, qui devront aligner leurs priorités en matière de sécurité économique sur des objectifs stratégiques communs^{19,20}.

Partenariats régionaux

Sachant que les clivages régionaux sont à la fois un terreau de la compétition internationale et une conséquence de celle-ci, les experts indiquent que la compétition stratégique croissante risque non seulement de provoquer plus fréquemment des chocs mondiaux, mais également de renforcer la régionalisation – une tendance qui sera favorisée par des facteurs d'ordre économique et technologique, comme l'objectif de réduire les dépendances ou les risques, mais aussi probablement par le changement climatique, les migrations, l'évolution démographique et la montée de l'autoritarisme. Les petits pays sont particulièrement susceptibles d'être touchés : avec la multiplication des perturbations d'ordre économique, climatique, sécuritaire et géopolitique, il deviendra plus important de pouvoir s'appuyer sur des régimes commerciaux fiables et stables, et les petits acteurs économiques pourraient être contraints de compter sur des partenaires qui non seulement proposent les solutions les moins chères, mais qui également semblent les plus résilients face aux chocs à venir. Des blocs économiques tels que les BRICS (groupe initialement composé du Brésil, de la Russie, de l'Inde, de la Chine et de l'Afrique du Sud, depuis lors élargi) pourraient ainsi voir grandir leur influence, tandis que celle d'institutions comme le Fonds monétaire international et la Banque mondiale diminuerait et que l'instabilité gagnerait probablement du terrain²¹.

Le mécontentement croissant observé dans l'hémisphère sud (aussi appelé « Sud global »), notamment dans certaines régions de l'Afrique, du Moyen-Orient, de l'Asie centrale et orientale, ainsi que de l'Amérique latine, risque également d'avoir un impact sur la compétition internationale. De nombreux pays de ces régions espèrent un rééquilibrage de la puissance à l'échelle mondiale et prônent une répartition plus équitable des richesses, de la sécurité et des technologies, des aspirations qui seront d'autant plus difficiles à satisfaire que ces pays sont proportionnellement les plus touchés par le changement climatique²². C'est également dans ces pays que la compétition pour l'exercice d'une influence à l'échelle internationale va probablement s'intensifier le plus quand les puissances mondiales traditionnelles tenteront de resserrer des liens existants ou de conclure de nouvelles alliances²³. Dans un tel contexte, les partenariats internationaux en place verraient leur importance augmenter de manière exponentielle. Ces relations pourraient toutefois aussi devenir moins prévisibles si les nouvelles alliances devaient se nouer sur la base de valeurs idéologiques et politiques ou d'impératifs à court terme ayant trait aux technologies ou à la sécurité économique, plutôt que sur la base d'accords commerciaux de longue date ou de la proximité géographique²⁴.

1.4 Pistes de réflexion pour les dirigeants

L'intensification de la compétition stratégique internationale s'accompagne d'une imprévisibilité et d'une incertitude croissantes, raison pour laquelle il devient difficile d'anticiper les chocs et de s'y préparer. Les décideurs auront donc tout intérêt à envisager de multiples scénarios, notamment en recourant à la modélisation et à la simulation immersive avancée pour mieux comprendre les choix qui s'offrent à eux. Cela étant, quel que soit le scénario de contestation ou de conflit qui se réalisera, il ne fait aucun doute qu'il faut adapter les notions traditionnelles de dissuasion et d'escalade à une posture de défense de plus en plus tributaire de la technologie.

La dépendance absolue des civils et des militaires à l'égard des moyens spatiaux constitue une vulnérabilité majeure, qui ne fait que s'accroître avec le temps.

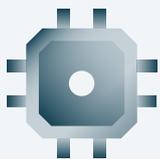
Les dirigeants devront également tenir compte de l'importance grandissante de l'espace. S'il est vrai que tous les milieux militaires reposent sur la technologie, la dépendance absolue des civils et des militaires à l'égard des moyens spatiaux constitue une vulnérabilité majeure, qui ne fait que s'accroître avec le temps. Rien que dans le domaine civil, les systèmes spatiaux sont indispensables au fonctionnement de plus de la moitié des infrastructures et services critiques des pays membres de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE)²⁵. Au vu de l'importance croissante que revêtent les ressources et technologies spatiales, les dirigeants devraient réfléchir aux moyens de renforcer la résilience et de faire face aux futures tensions²⁶. À l'avenir, il faudra également étudier sérieusement la possibilité de s'appuyer sur les cadres juridiques internationaux pour atténuer le risque de conflit spatial²⁷.





Grande tendance n° 2

Course à la
supériorité en
matière d'intelligence
artificielle et de
technologies
quantiques



Impact attendu et chronologie

Présent
2025

Impact sur l'OTAN

Futur
2045



Ce qu'il faut retenir

La transformation numérique (qui suppose l'accès à d'importants volumes de données de qualité, ainsi qu'à des outils de stockage et de diffusion) va demeurer incontournable dans un contexte de développement de l'intelligence artificielle et des technologies quantiques.

Dans le secteur technologique, la concurrence sera rude sur le terrain du recrutement, de la formation et de la fidélisation des talents.

Pour gagner la course, des pays qui partagent les mêmes valeurs devront mettre en commun leur expertise et leurs ressources.

2.1 Contexte

Même si, sur le fond, l'intelligence artificielle (IA) et le quantique sont des domaines S&T très différents, les technologies qu'ils recouvrent vont avoir des effets particulièrement importants dans un large éventail de secteurs. Les pays qui disposent de capacités de pointe dans ces domaines seront dès lors mieux armés pour résister aux chocs futurs et pour relever les défis qui se profilent à l'horizon (et au-delà). Si d'autres technologies, comme l'automatisation ou les systèmes autonomes, auront-elles aussi des répercussions de nature très diverse, les changements que l'IA et les technologies quantiques vont induire sur le long terme, y compris dans le secteur de la défense, sont plus difficiles à prévoir et auront en outre un caractère plus disruptif. Il est dès lors très important de chercher à évaluer quel pourrait être l'impact de ces développements technologiques à l'avenir.

Au cours des vingt prochaines années, l'IA et le quantique vont entraîner des changements

profonds dans toute une série de branches d'activité. Parallèlement, la concurrence entre les principaux protagonistes de chaque secteur risque de s'accroître et de s'intensifier.

Les progrès réalisés par un pays donné dans un secteur technologique clé ne se font pas toujours nécessairement au détriment des progrès d'un autre pays, mais les principaux concurrents en présence – en particulier si ce sont les États-Unis et la Chine – voudront conserver leur avantage ou avance technologique dans les domaines où ils occupent déjà une position dominante, ce qui les obligera à se spécialiser davantage dans les secteurs en question. Dans le même temps, à l'échelle mondiale, les concurrents feront en sorte d'empêcher la formation de monopoles de la mise en œuvre de l'innovation dans les pays rivaux. Comme cette course sera pilotée par le secteur privé, les relations entre celui-ci et les pouvoirs publics joueront un rôle déterminant dans son issue.

Les pays qui disposent de capacités de pointe dans l'AI et/ou dans le quantique, seront les mieux armés pour résister aux chocs futurs.

2.2 Incidences

Le secteur privé a mis au point, en s'appuyant sur l'IA et les technologies quantiques, des capacités de pointe à forte valeur ajoutée dont il importe de garder la maîtrise, sans quoi la sécurité nationale pourrait être menacée, des emplois bien rémunérés seront perdus et le retour sur le marché sera difficile²⁸. Par ailleurs, l'accès aux données, ainsi que la curation, le stockage et la qualité des données sont des paramètres essentiels qui influenceront directement le développement futur de l'IA et des technologies quantiques. Enfin, recruter, former

et fidéliser les talents nécessaires va devenir de plus en plus difficile à mesure que la compétition va s'intensifier et que les besoins en compétences spécialisées vont augmenter.

En ce qui concerne la recherche et développement (R&D), l'IA générative va transformer les méthodes utilisées, notamment en permettant d'analyser les données de façon beaucoup plus poussée. Si elle est développée, l'intelligence artificielle générale aura des effets plus révolutionnaires encore.

Le domaine R&D sera aussi touché de manière indirecte par les progrès de l'IA et du quantique. En effet, ces technologies vont nécessiter des volumes considérables de données et de ressources énergétiques, ainsi que l'accès à des éléments rares tels que le gallium et le germanium. Or le changement climatique a des incidences sur les approvisionnements énergétiques et sur l'accès à certaines ressources rares, ce qui va compliquer la donne. Le secteur R&D sera donc probablement amené à créer, à l'aide de la bio-ingénierie, des matériaux innovants et des solutions d'approvisionnement énergétique plus écologiques afin de répondre aux besoins qui iront de pair avec le développement technologique. Quiconque réussira à développer l'IA et les technologies

quantiques à moindre coût en récoltera à coup sûr des bénéfices.

Les progrès de l'IA et du quantique vont également redessiner le paysage de la défense et de la sécurité. Les futures capacités de pointe – souvent dites « à double usage » – ne seront plus réservées aux seuls militaires, mais elles seront probablement disponibles pour le grand public également. En d'autres termes, les avantages technologiques de demain seront accessibles non seulement aux grands acteurs étatiques, mais aussi à des individus dotés de pouvoirs colossaux ou à des acteurs non étatiques mal intentionnés, comme des organisations criminelles ou terroristes.

2.3 État des lieux

Qu'il s'agisse de son développement, de ses applications ou des innovations qui y sont liées, l'IA a un degré de maturité nettement supérieur à celui des technologies quantiques. Si on se base sur le critère de l'excellence scientifique, on observe que les prix Nobel 2024 de chimie et de physique ont récompensé des découvertes dans lesquelles l'IA a joué un rôle central^{29,30}. Les technologies quantiques ne sont pas, pour leur part, mises en œuvre à grande échelle. Dans le cas précis de l'informatique quantique, l'un des obstacles à son intégration tient au fait que cette technologie repose sur des principes fondamentalement différents de ceux intervenant dans l'informatique traditionnelle, et bien plus complexes. Dès lors, pour pouvoir exploiter

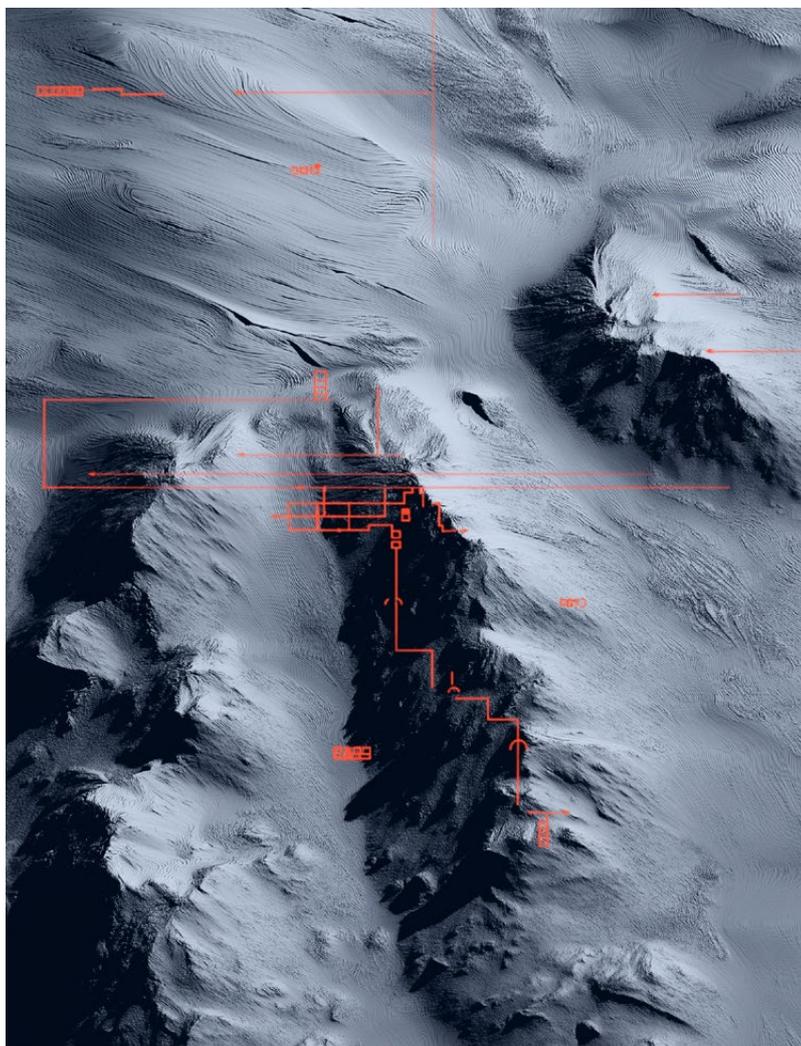
pleinement les capacités propres aux ordinateurs quantiques (notamment une vitesse et une puissance de traitement sensiblement supérieures à celles d'un ordinateur standard), les utilisateurs de ces systèmes doivent formuler les énoncés des problèmes d'une manière très particulière. C'est la raison pour laquelle la pleine mise en œuvre de l'informatique quantique prendra probablement plusieurs années. La poursuite du développement ou de la diffusion d'autres capacités quantiques dépendra par ailleurs de la disponibilité de certaines technologies habilitantes, mais aussi de chaînes d'approvisionnement et d'infrastructures robustes.

Intelligence artificielle (IA)

L'IA a déjà un impact considérable sur l'efficacité et la productivité dans un large éventail de branches d'activité, en particulier la fabrication de produits finis, les soins de santé et la finance^{31,32}. À mesure que les technologies basées sur l'IA se perfectionnent, la qualité et la fiabilité des produits et services augmentent, tandis que les coûts de main-d'œuvre diminuent et que de nouveaux marchés voient le jour.

Toutefois, c'est l'utilisation combinée – ou convergence – de l'IA et d'autres domaines S&T qui entraînera les plus grands changements. Ainsi, la combinaison de l'IA et des systèmes autonomes révolutionne déjà les processus décisionnels et permet de disposer d'éléments d'appréciation en temps réel. Ces outils permettent en particulier de répondre au besoin de prévoir et d'optimiser que l'on rencontre dans le secteur financier et dans celui des soins de santé³³. Dans ce dernier secteur, la convergence future de l'IA et de l'informatique quantique pourrait transformer la biotechnologie (ce point sera examiné plus avant dans la grande tendance n° 3) en permettant, par exemple, de réaliser une analyse plus poussée du génome et de pratiquer des interventions médicales personnalisées, plus efficaces.





Sur le plan militaire, l'IA est une aide à la planification stratégique et à la prise de décision tactique, elle renforce les capacités ISR (renseignement, surveillance et reconnaissance), elle améliore la surveillance réseau et la cyberdéfense, etc. Si certains usages sont bien établis, comme l'utilisation combinée de l'IA et de systèmes autonomes (sans pilote) pour le recueil de renseignements, l'IA trouve encore très régulièrement de nouvelles applications dans le secteur militaire. Ainsi, l'armée américaine a développé récemment une application pour smartphone qui se sert de l'IA pour identifier rapidement les équipements militaires dans les zones de combat³⁴. En raison du nombre croissant d'applications, le recours à l'IA a augmenté considérablement au cours de l'année écoulée. Même s'il reste difficile de prévoir toute l'étendue de ses applications, les experts s'accordent sur le fait que l'utilisation de l'IA va encore s'intensifier et qu'elle continuera de transformer en profondeur de nombreux secteurs d'activité^{35,36}. Sur le champ de bataille du futur, on s'attend à ce qu'elle renforce la capacité C2 et améliore la connaissance de la situation en continu. Ces progrès seront possibles notamment parce que les principes de conception de la prochaine génération de technologies basées sur l'IA seront davantage centrés sur l'humain et que cette nouvelle génération permettra une plus grande symbiose entre l'homme et la machine.

Technologies quantiques

À l'heure actuelle, les technologies quantiques regroupent quatre domaines d'application distincts : la détection, le traitement (informatique), la communication et la navigation.

On pense communément que l'informatique quantique a un potentiel disruptif similaire à celui de l'IA. Même si son usage n'est pas encore aussi répandu, elle devrait, par sa capacité à accélérer considérablement certains calculs³⁷, impacter de manière significative l'ensemble des grands secteurs économiques dans les dix années à venir. Si la recherche en détection quantique, en communication quantique et en navigation quantique en est à un stade plus avancé, certains experts estiment que l'informatique quantique offrira un degré de fiabilité satisfaisant d'ici 2029³⁸. Pour d'autres, la valorisation des technologies quantiques devrait atteindre des milliers de milliards de dollars d'ici 2035, et des secteurs tels que les sciences de la vie, la finance et les transports seront probablement les premiers touchés³⁹. Les applications de l'informatique quantique qui sont déjà disponibles ou qui le seront dans un avenir prévisible concernent la cryptographie, l'administration de médicaments et la surveillance de l'environnement. Sur le plus long terme, la distribution quantique de clés devrait révolutionner la transmission de données en permettant de sécuriser pleinement les lignes de communication. Les capteurs quantiques, quant à eux, pourraient détecter des structures souterraines, des sous-marins et des armes nucléaires. Enfin, les accéléromètres quantiques devraient rendre la navigation possible là où le GPS est inopérant^{40,41}.

Comme pour l'IA, c'est l'utilisation conjointe des technologies quantiques et d'autres technologies qui permettra d'exploiter leur plein potentiel. Ainsi, les futurs capteurs quantiques devraient pouvoir être déployés dans l'espace, ce qui améliorerait de façon significative les capacités ISR militaires. La convergence du quantique et des systèmes autonomes est également à l'étude, l'idée étant que les technologies quantiques devraient améliorer sensiblement la performance des capteurs ainsi que la collecte, le traitement et l'exploitation des données, au bénéfice de la sûreté et de l'efficacité des missions autonomes⁴².

Pays en tête du peloton

Vu les changements profonds que ces technologies vont provoquer dans de nombreuses branches d'activité, les pays qui ont accès aux matériaux qu'elles requièrent et qui peuvent compter sur les structures de recherche et les experts les plus compétents disposeront d'un atout notable sur le plan de la résilience économique, de la sécurité et de la croissance. Lorsqu'il s'agira de relever des défis complexes et de résister aux chocs, l'avantage ira donc aux pays qui occupent la tête du peloton. Actuellement, les deux principaux acteurs de la recherche, du développement et de l'innovation

60%

des établissements de premier plan dans le domaine de l'IA se trouvent dans les États-Unis.

dans les domaines de l'IA et des technologies quantiques sont les États-Unis et la Chine. La dynamique entre ces deux pays, qui a déjà profondément évolué ces dix dernières années, devrait encore se modifier considérablement pendant la décennie à venir.

Investissements dans le secteur de la science et de la technologie

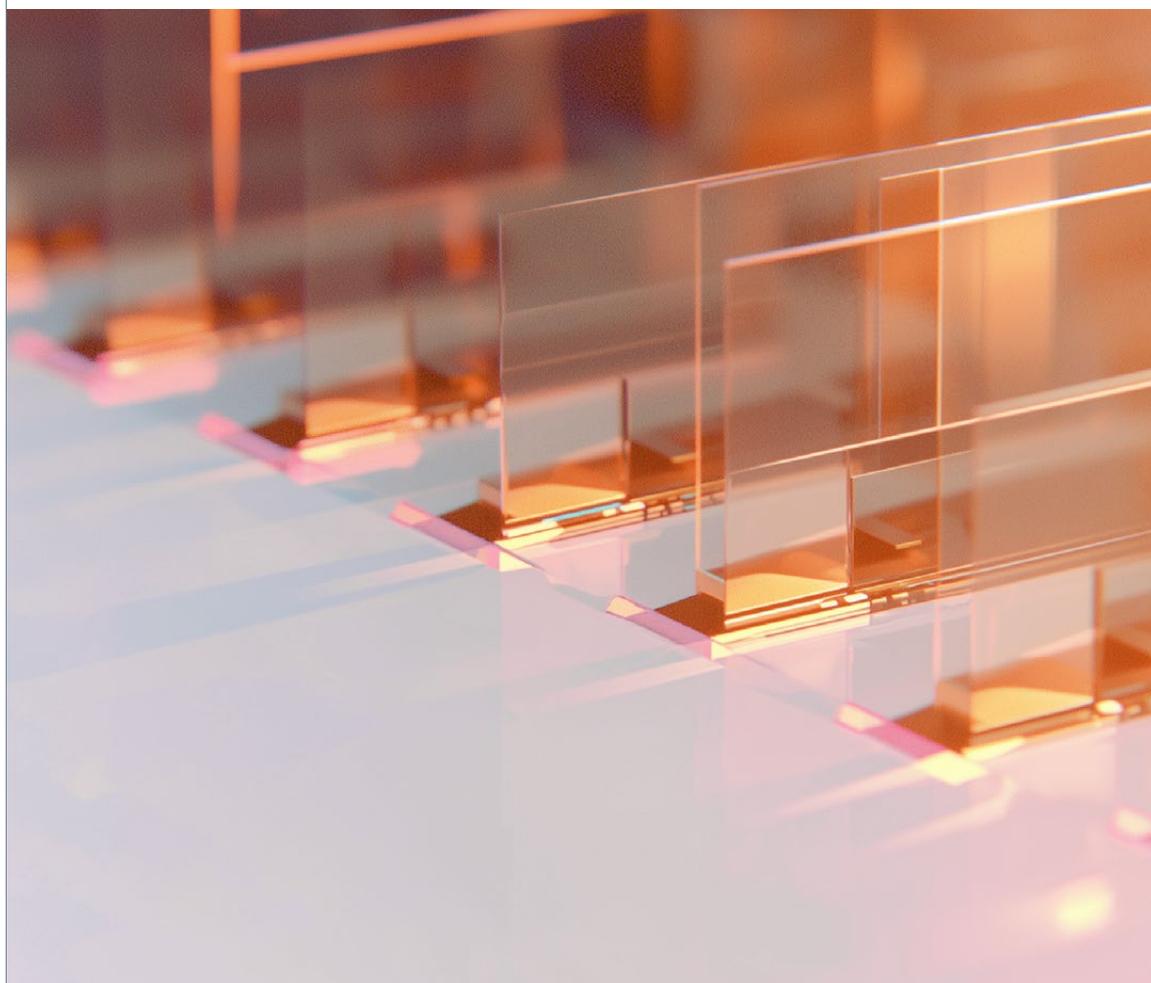
Selon les dernières données disponibles (2021), ce sont les États-Unis qui, au niveau mondial, investissent le plus dans la R&D, tant en dépenses brutes (806 milliards de dollars) qu'en part du PIB (3,48 %). Ils sont toutefois talonnés par la Chine (668 milliards de dollars, soit 2,43 % du PIB en 2021)^{43,44}. Ces chiffres traduisent un rééquilibrage majeur puisqu'en 2009 encore, les dépenses R&D des États-Unis étaient plus de deux fois supérieures à celles de l'Empire du Milieu⁴⁵. À coup de stratégies gouvernementales à long terme et d'investissements ciblés, la Chine s'est positionnée comme l'un des grands acteurs mondiaux de l'innovation⁴⁶.

Investissements et formation dans le domaine de l'IA

De façon générale, les États-Unis sont toujours considérés comme le leader mondial en matière de technologie et d'innovation liées à l'IA. Ces dernières années, des investissements publics

et privés substantiels y ont entraîné une hausse spectaculaire du nombre de nouvelles start-ups et de créations d'emplois dans le domaine de l'IA. Ces investissements devraient continuer de croître⁴⁷. De même, ce sont les entreprises américaines qui continuent d'attirer la grande majorité des spécialistes de l'IA, y compris ceux qui se trouvent dans le top mondial de l'élite du secteur, et 60 % des établissements de premier plan dans le domaine de l'IA se trouvent toujours sur le territoire des États-Unis⁴⁸.

Néanmoins, il ne faut pas sous-estimer l'écosystème (y compris les ressources humaines) dont dispose la Chine pour innover en matière d'IA. En effet, le gouvernement et le secteur privé chinois réalisent des investissements stratégiques dans le développement et le déploiement de capacités liées à l'IA⁴⁹. Même si les données ne sont pas aussi largement disponibles que celles qui concernent les États-Unis, l'analyse des rapports établis par les pouvoirs publics, les établissements universitaires et le secteur privé donne à penser que la Chine investit massivement dans la formation à l'IA, et donc dans la prochaine génération de spécialistes de l'IA, ainsi que dans le recrutement de talents chinois occupant actuellement des postes en lien avec l'IA à l'étranger⁵⁰. Le niveau des investissements publics dans la formation supérieure s'est lui aussi sensiblement accru au cours des dix dernières années ; les grandes



universités chinoises sont aujourd'hui dotées de budgets comparables à ceux des établissements américains équivalents⁵¹. Selon plusieurs indicateurs, l'écosystème chinois de formation supérieure est à présent très compétitif, voire en première place. Ainsi, dès 2025, la Chine devrait délivrer près de deux fois plus de diplômes de doctorat en sciences, technologie, ingénierie et mathématiques que les États-Unis.

Même si les États-Unis conservent leur statut de leader de la technologie et de l'innovation en IA, les données indiquent qu'un basculement est sur le point de s'opérer dans la recherche. Traditionnellement, les États-Unis étaient en tête du peloton dans cinq des six principaux domaines de recherche en matière d'IA (analytique avancée des données, conception et fabrication de circuits intégrés de pointe, IA contradictoire, apprentissage automatique, traitement du langage naturel), tandis que la Chine occupait le premier rang pour les algorithmes IA et les accélérateurs matériels. Cependant, depuis la période 2019-2023, les États-Unis se font devancer par la Chine dans chacune des cinq catégories où ils l'emportaient précédemment pour ce qui est du nombre d'articles de recherche fréquemment cités, tandis que pour le nombre total de publications, ils enregistrent une baisse générale dans les six catégories. Ils continuent malgré tout d'afficher des chiffres plus élevés en ce qui concerne le nombre d'employés dans les cinq catégories qu'ils continuent de dominer. Concernant la formation des chercheurs de haut niveau, la Chine délivre un pourcentage plus élevé de diplômes d'études de premier cycle pour l'ensemble des six catégories, tandis que les États-Unis décernent davantage de diplômes validant des études de deuxième cycle.

Investissements et formation dans le domaine des technologies quantiques

Il est plus ardu de déterminer qui mène la course à l'innovation dans le domaine quantique, notamment parce que le développement et l'application des technologies quantiques n'en sont qu'à leurs débuts, mais aussi parce que les informations relatives aux investissements publics et aux

initiatives de recherche des pays les plus actifs à cet égard sont un secret bien gardé^{52,53}. Toutefois, les données disponibles (volume de publications et auteurs/articles fréquemment cités, notamment) laissent entrevoir un tableau similaire à celui de l'IA : même si les États-Unis sont depuis toujours à l'avant-plan dans la plupart des domaines liés au quantique, la Chine serait en passe de prendre la tête de la course, si ce n'est déjà fait. L'analyse des données collectées sur le parcours de formation et la carrière de chercheurs de premier plan révèle que la plupart sont actuellement employés par des entreprises ayant des liens avec les États-Unis (cela est vrai pour les quatre catégories de technologies quantiques étudiées sauf pour la cryptographie postquantique), même si, en pourcentage, ils sont bien plus nombreux à avoir accompli des études de premier cycle en Chine. Les pays de l'Union européenne affichent un taux d'emploi supérieur à celui de la Chine pour les chercheurs de haut niveau dans les quatre catégories, y compris la cryptographie postquantique.

Si les États-Unis profitent sans nul doute d'un volume élevé d'investissements, en particulier de la part du secteur privé, et d'un écosystème de formation de qualité (deux éléments qui ne manqueront pas de favoriser la compétitivité de leurs futurs effectifs), ces seuls paramètres ne suffisent pas à garantir l'excellence de l'innovation pour les vingt prochaines années. La Chine continue de s'employer ardemment à transformer ses écosystèmes de formation et d'innovation. Elle est parvenue à infirmer bon nombre de préjugés dans ces deux domaines, notamment l'idée qu'elle ne faisait que copier les travaux de recherche existants ou que ses grandes entreprises ne pouvaient réussir qu'en étant dépendantes de partenaires étrangers⁵⁴. De plus, comme presque tous les travaux de recherche de la Chine doivent servir des objectifs spécifiques de sécurité nationale, la défense est souvent présente à l'esprit des chercheurs qui mènent ces travaux. Si, aux yeux de certains spécialistes, une plus grande liberté d'approche stimule la créativité nécessaire à l'innovation, il ne faut pas négliger le fait que le système chinois offre des avantages pratiques et directs à ses forces armées.

Les données disponibles laissent entrevoir que la Chine serait en passe de prendre la tête de la course dans le quantique.

2.4 Pistes de réflexion pour les dirigeants

Bien que l'IA et le quantique en soient à des stades de développement différents, ces deux domaines technologiques devraient connaître des avancées considérables et entraîner de profonds changements dans un large éventail de secteurs au cours des vingt prochaines années ; s'ils ne sont pas les seuls à être concernés par cette tendance, c'est bien sur ces deux terrains que la compétition s'annonce la plus féroce.

L'une des mesures proactives que les dirigeants pourraient envisager est l'élaboration de stratégies nationales pour le quantique. En effet, si parmi les Alliés, plusieurs ont récemment élaboré des stratégies pour l'IA – visant notamment à garantir une utilisation responsable des technologies liées à l'IA, à harmoniser les efforts d'innovation et à exploiter au mieux les avantages économiques des progrès futurs –, rares sont ceux qui ont annoncé

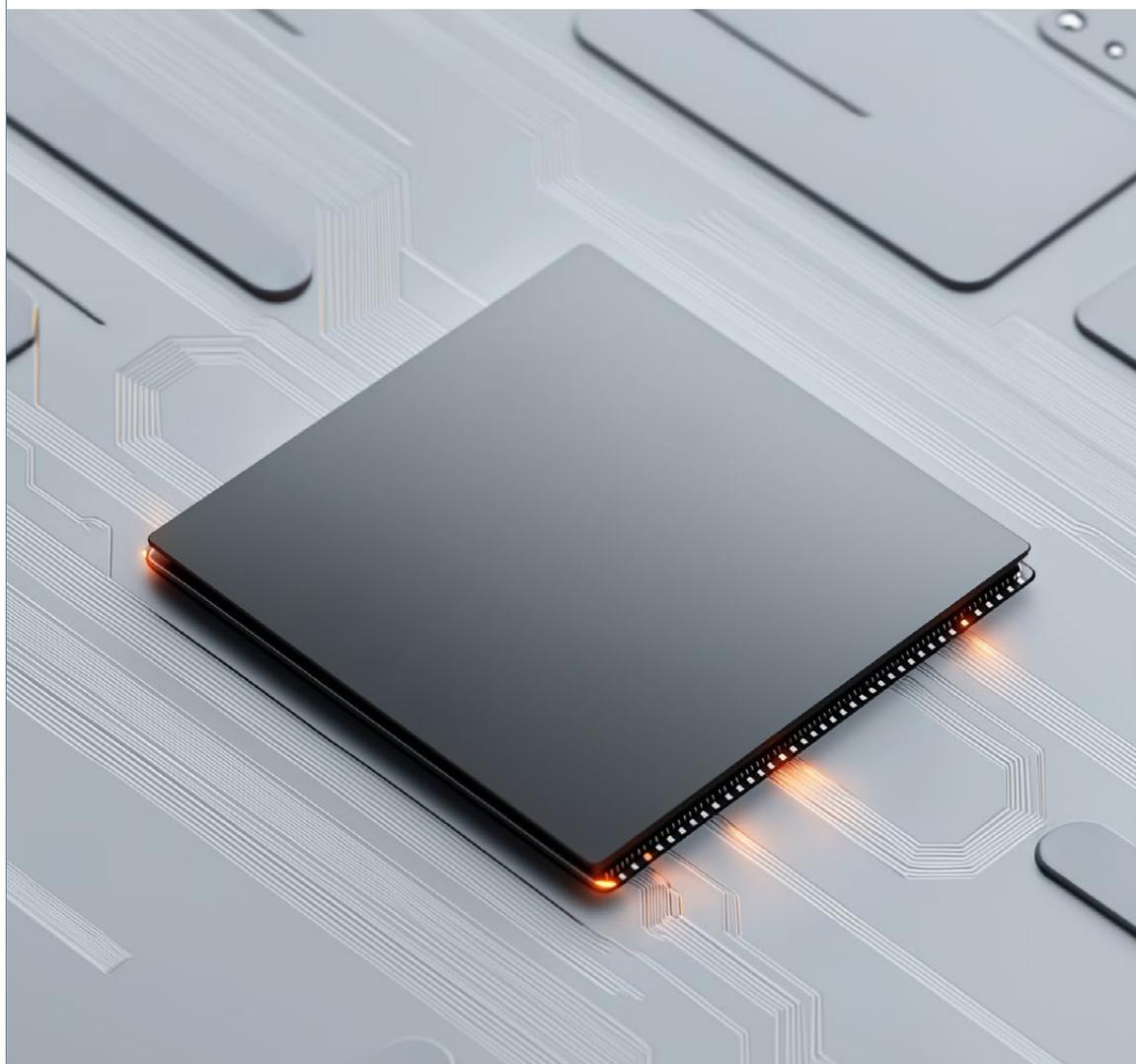
des plans stratégiques ou des perspectives d'évolution pour les technologies quantiques.

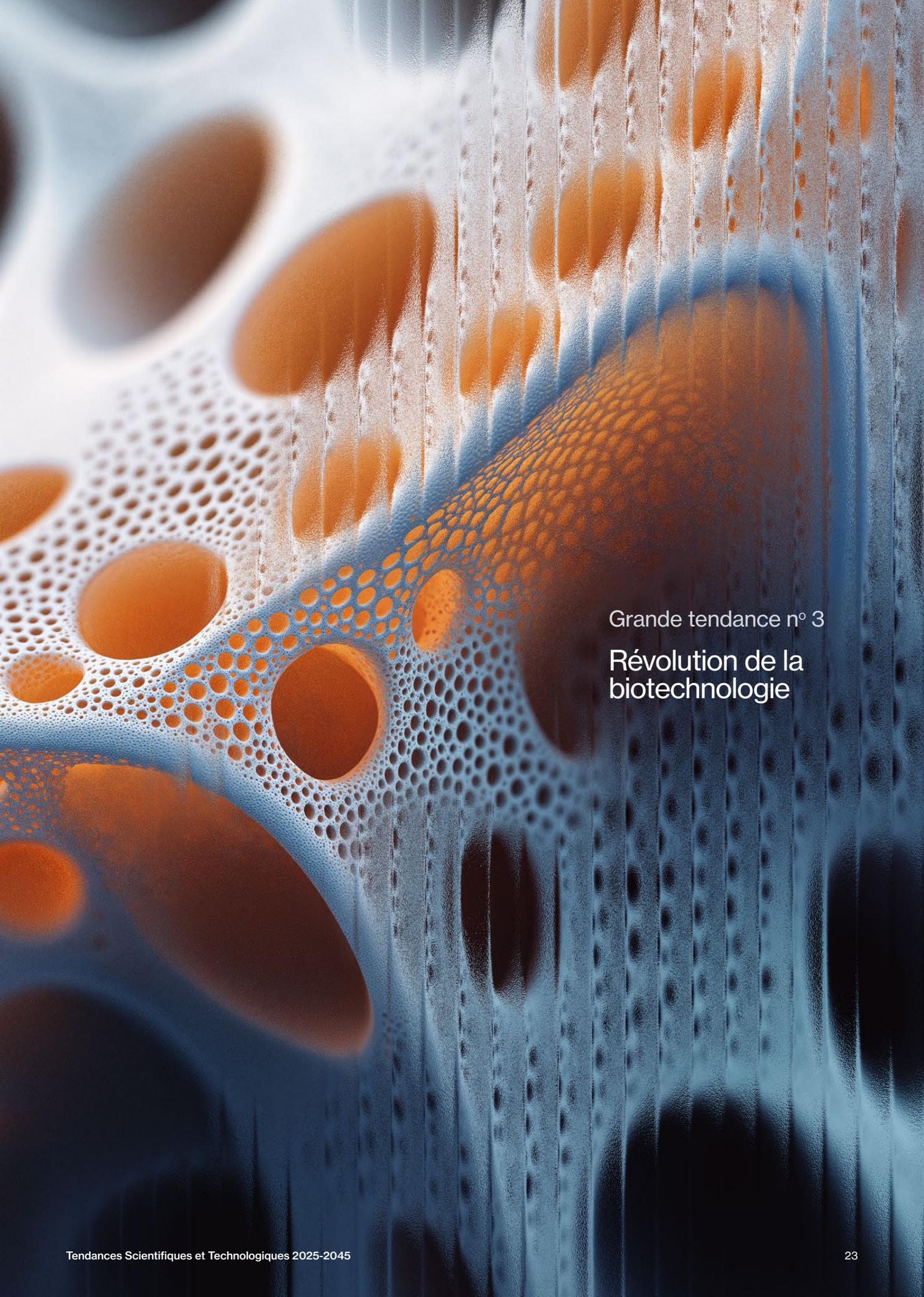
Les Alliés pourraient également envisager d'intensifier la collaboration scientifique et technologique pour l'IA et le quantique, notamment en ce qui concerne les investissements dans les écosystèmes nationaux de formation et d'innovation. Vu la complexité de ces technologies et la vitesse à laquelle elles évoluent, le seul moyen pour les Alliés de se maintenir dans la course au leadership technologique est de mettre en commun leurs ressources avec celles de pays qui partagent les mêmes valeurs. Il conviendrait dès lors que les Alliés réfléchissent aux moyens de renforcer la collaboration avec leurs partenaires dans le domaine S&T, ce à quoi se prêtent déjà les mécanismes de partenariat OTAN existants. Parmi ceux-ci, le programme de partenariat individualisé (ITPP), qui fixe les jalons de la coopération et prévoit les activités à venir, offre un cadre tout indiqué pour les relations entre l'OTAN et ses partenaires. Les ITPP constituent d'ailleurs le socle du partenariat de l'OTAN avec l'Australie, le Japon, la Nouvelle-Zélande et la République de Corée, entre autres. On s'attend à ce que la coopération scientifique et technologique reste un axe central de la relation avec ces partenaires, et en particulier

avec l'Australie et le Japon, déjà associés au programme OTAN pour la science au service de la paix et de la sécurité (SPS) et à différentes activités du programme de travail collaboratif de la STO. L'OTAN et les Alliés comptent bien continuer de développer leur coopération avec les partenaires de l'Indo-Pacifique et d'ailleurs, il faudra trouver le juste équilibre entre, d'une part, promouvoir la recherche entre différents établissements dans un esprit d'ouverture et de collaboration, et d'autre part, préserver les innovations susceptibles d'avoir de profondes répercussions pour la sécurité nationale.

Les dirigeants devront également réfléchir aux compromis qu'ils seront peut-être amenés à faire pour atteindre et conserver la supériorité dans le domaine de l'IA et des technologies quantiques. Pour réaliser de nouvelles avancées dans ces deux domaines, il sera indispensable d'avoir un accès garanti à de grands volumes de données de qualité, ainsi qu'à une capacité de stockage de données et à des outils de diffusion. Dans le même temps, les activités liées à l'IA et au quantique nécessiteront des quantités considérables d'énergie. Il convient d'évaluer avec soin ces aspects ainsi que d'autres implications des arbitrages inhérents aux développements technologiques futurs, sans perdre de vue les considérations relatives au changement climatique.

[L'IA et le quantique] sont les domaines technologiques dans lesquels la compétition s'annonce la plus féroce au cours des vingt prochaines années.





Grande tendance n° 3

Révolution de la biotechnologie



Impact attendu et chronologie

Présent

2025

Impact sur l'OTAN

Futur

2045



Ce qu'il faut retenir

Ces vingt prochaines années, les technologies liées à la biologie de synthèse vont émerger comme des technologies de rupture et provoquer des bouleversements profonds, tant dans le domaine civil que militaire.

Les avantages potentiels d'un recours accru aux biotechnologies sont considérables, en particulier pour les soins de santé, mais les risques d'un détournement de ces technologies sont très élevés. Aussi faut-il examiner attentivement les incidences des biotechnologies sur la sécurité et la défense, y compris la question de la protection et du partage des travaux de recherche.

Les mesures visant à protéger les travaux de recherche doivent respecter nos valeurs et normes communes.

3.1 Contexte

Comme indiqué dans le rapport sur les tendances S&T pour la période 2023-2043, la prochaine révolution technologique sera portée par la biologie de synthèse, une branche du domaine des biotechnologies qui consiste à exploiter les processus biologiques à des fins spécifiques, en particulier pour la manipulation génétique et la conception d'organismes. Ce qui intéresse plus particulièrement l'OTAN, ce sont les matériaux innovants issus de la bio-ingénierie et les technologies permettant d'améliorer les capacités humaines.

Tandis que les développements se poursuivent dans des domaines connexes (données biologiques, biocapteurs, etc.), l'avènement de la biologie de synthèse va faire de la sauvegarde des travaux de recherche sensibles (« sécurité de la recherche ») et de la réglementation des axes majeurs de l'action des pouvoirs publics. Par ailleurs, les nouveaux sujets de recherche, comme la corrélation entre changement climatique et menaces CBRN (agents chimiques, biologiques, radiologiques et nucléaires), doivent être davantage pris en compte dans le cadre du développement des biotechnologies.

3.2 Incidences

Les biotechnologies vont apporter des améliorations dans de nombreux secteurs (agriculture, science environnementale, soins de santé, etc.), et il n'est donc pas surprenant qu'elles soient aujourd'hui considérées comme cruciales pour la sécurité économique⁵⁵. Dans le secteur des soins de santé en particulier, les grandes découvertes de ces dernières années rendues possibles par la biologie de synthèse (réécriture génomique et thérapie génique, intervention rapide en cas de maladies infectieuses et d'épidémies, médecine personnalisée, lutte contre les maladies génétiques, etc.) peuvent aider à résoudre des cas médicaux complexes⁵⁶. La bio-informatique et les biomatériaux joueront un rôle encore plus déterminant dans les avancées médicales à venir, par exemple grâce à la médecine personnalisée et à des solutions orthopédiques

de pointe⁵⁷. Les sources de bioénergie devraient aussi permettre de mieux répondre à certains défis environnementaux, comme l'émission de gaz à effet de serre et la gestion des déchets.

Les forces armées, de leur côté, peuvent faire usage des biocapteurs (en particulier les nanobiocapteurs) pour soigner les blessés au combat et assurer la défense CBRN^{58,59}. Le secteur agricole, quant à lui, devrait à terme bénéficier encore plus de certaines innovations biotechnologiques, comme celles qui permettent de modifier génétiquement des cultures pour les rendre plus résistantes aux effets du changement climatique (notamment la sécheresse)^{60,61}, ce qui pourrait être le remède à l'aggravation de l'insécurité alimentaire dans le monde.

Les biotechnologies sont aujourd'hui considérées comme cruciales pour la sécurité économique.

Cela étant, un recours accru aux biotechnologies provoquerait très probablement des perturbations d'ordre économique, géopolitique et social (essentiellement pour des considérations de sécurité et d'éthique), qui annihileraient les avantages potentiels de l'emploi de ces technologies⁶². Les avancées en matière de biologie de synthèse risquent de rendre les armes biologiques et chimiques encore plus facilement accessibles, notamment si les technologies de réécriture génomique sont utilisées pour modifier des agents existants à des fins malveillantes ou pour créer de nouveaux agents dangereux. Du fait de la rapidité et de la nature souvent imprévisible des évolutions dans ces domaines, les gouvernements ont beaucoup de mal à tenir à jour leurs cadres réglementaires⁶³. Les technologies issues de la biologie de synthèse pourraient aussi être utilisées en association avec d'autres technologies émergentes et technologies de rupture pour créer des armes biologiques qui seraient employées contre des individus ou groupes spécifiques. Un tel usage combiné ne ferait d'ailleurs qu'aggraver les problématiques déjà complexes du respect de la vie privée, de l'éthique et de la réglementation⁶⁴.

Les implications morales, éthiques et juridiques de l'utilisation qui sera faite des biotechnologies sont loin d'être marginales. S'il est vrai que les biotechnologies présentent des avantages non négligeables pour les soins de santé, il n'en demeure pas moins que certaines posent question, notamment les technologies implantables. Les implants cérébraux, par exemple, pourraient être une solution pour mieux traiter des affections neurologiques comme l'épilepsie⁶⁵, mais on ne connaît guère leurs effets à long terme sur la santé physique et mentale. Cette problématique se pose également dans le contexte militaire : équiper les combattants de dispositifs qui améliorent leurs capacités cognitives, leur force ou d'autres aptitudes supposera de comprendre les effets à long terme de l'usage de tels dispositifs sur la santé des soldats, mais aussi ses autres répercussions, par exemple sur la cohésion du groupe. Il ne faut d'ailleurs pas perdre de vue que plus il sera facile de suivre les données biologiques personnelles, plus il sera difficile de les protéger. L'intervention génétique aussi pose de véritables dilemmes moraux, éthiques et juridiques, sachant en outre que la manière dont les biotechnologies seront intégrées dans le civil et dans le militaire variera sans doute fortement d'un Allié à l'autre.

3.3 État des lieux

Les experts prédisent que les développements dans le domaine de la biologie de synthèse vont s'accélérer au cours des dix prochaines années, compte tenu du fait que de nouveaux usages devraient apparaître dans divers secteurs, que les investissements en R&D devraient augmenter, que le coût du séquençage ADN devrait baisser et que les travaux scientifiques sur les biotechnologies devraient déboucher sur d'autres innovations⁶⁶. Le recours aux biotechnologies pour la production de biens et la fourniture de services (ce qu'on appelle la « bioéconomie ») pourrait générer au moins 20 000 milliards de dollars d'ici à 2030⁶⁷. À titre d'exemple, les biocapteurs ont permis récemment plusieurs avancées dans le domaine de la santé (détection de pathogènes d'origine alimentaire, monitoring cardiaque, lutte contre le cancer du sein, etc.^{68, 69, 70}), et les possibilités d'utiliser ces dispositifs dans d'autres secteurs se multiplient, grâce aux progrès réalisés dans d'autres domaines S&T, comme ceux de l'IA et des nanotechnologies^{71, 72, 73}. Au cours de l'année écoulée, l'utilisation combinée de l'IA et de la biologie de synthèse s'est aussi considérablement accrue, pour le remodelage de protéines, l'administration ciblée de médicaments ou la lutte contre les maladies pharmacorésistantes⁷⁴.⁷⁵ La convergence entre biologie de synthèse, IA et autonomie permet aussi aux bio-ingénieurs d'accélérer leurs travaux de recherche, d'analyse et d'expérimentation. L'IA pourrait en outre être utilisée dans les domaines de la défense CBRN et de la gestion des risques de biosécurité, dans

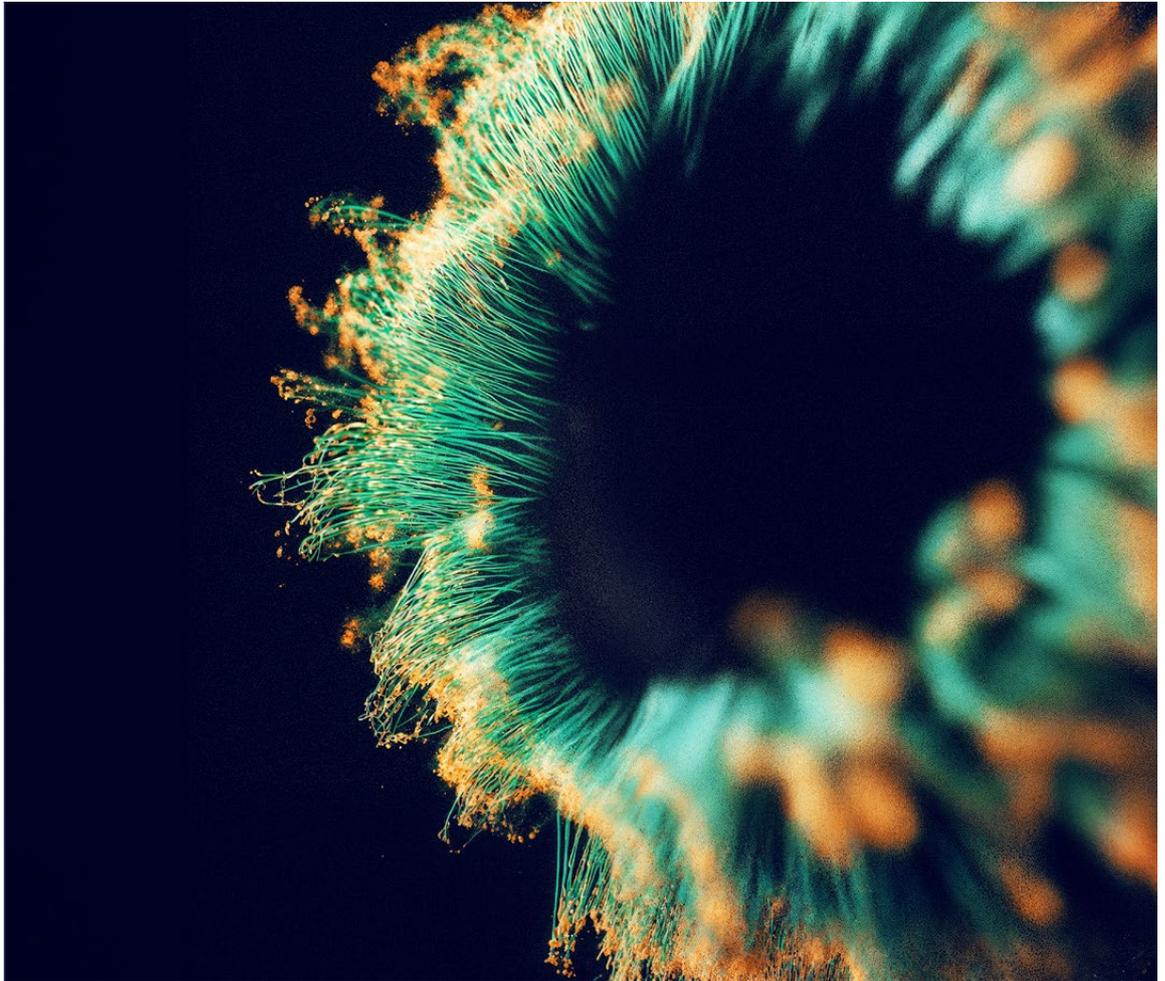
lesquels elle pourrait, en association avec les algorithmes d'apprentissage automatique, améliorer les mécanismes de détection et les protocoles de sécurité de manière à permettre une identification rapide des menaces potentielles⁷⁶.

Les biotechnologies ont certes de nombreuses applications utiles, mais le risque de détournement existe et doit être pris en compte. L'IA, les procédés de fabrication innovants, le « big data » et les technologies CRISPR (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*, «Courtes répétitions palindromiques groupées et régulièrement espacées», qui permettent de modifier de manière sélective l'ADN d'organismes vivants) pourraient potentiellement contribuer à la prolifération des armes biologiques⁷⁷. Par exemple, en combinant des outils IA entraînés au moyen de données biologiques et des technologies de réécriture génomique CRISPR, il pourrait être possible de procéder à des modifications génétiques ciblées et de créer de nouveaux agents pathogènes résistants aux contre-mesures ou aux antidotes existants⁷⁸.

L'utilisation combinée de la biologie de synthèse et d'autres technologies présente également des risques en termes de respect de la vie privée, d'éthique et de réglementation⁷⁹. Par exemple, l'IA permettra certes de découvrir plus rapidement de nouveaux composés, mais cela ne sera pas sans conséquence pour la protection des données

20 000
milliards
de dollars
au moins

Le valeur généré
par la bioéconomie
d'ici à 2030.



Sur le long terme, les armes biologiques qui seraient issues de la biologie de synthèse pourraient devenir aussi dangereuses que les armes nucléaires.

(biologiques), sans compter que des données incomplètes ou inexactes entraînent un risque d'erreur ou d'accident⁸⁰.

Sur le long terme, les armes biologiques qui seraient issues de la biologie de synthèse pourraient devenir aussi dangereuses que les armes nucléaires, alors même que les cadres réglementaires régissant les armes biologiques sont bien moins stricts. La convention sur les armes biologiques va nettement moins loin que le Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires et que la convention sur les armes chimiques : non seulement elle ne prévoit pas de régime de vérification, mais en plus elle n'interdit pas explicitement l'utilisation des armes biologiques⁸¹. Le rythme des découvertes biotechnologiques et la probabilité que, demain, des armes biologiques puissent être fabriquées sans nécessiter le soutien financier d'un État puissant ou d'une grande organisation viendront encore compliquer la mise en place et la mise en œuvre de garanties juridiques et éthiques appropriées⁸². Certains pays ont pris conscience de l'enjeu – les États-Unis, par exemple, ont publié en 2024 des recommandations sur la question, qui contiennent des orientations sur la lutte contre les menaces chimiques et biologiques décuplées par l'IA et proposent également des garde-fous pour l'accès aux bases de données scientifiques hautement sensibles ainsi que des principes à suivre dans les situations où des informations dangereuses sont générées par l'IA⁸³.

Changement climatique et CBRN

Le risque d'un recours accru aux armes biologiques est déjà élevé, et les effets du dérèglement climatique vont encore compliquer la donne. D'abord, les conditions climatiques (humidité, température, vent, etc.) ont une forte incidence sur les priorités et l'action des agents chimiques et biologiques⁸⁴. Ensuite, le réchauffement, qui entraîne le dégel du pergélisol et la fonte des glaces polaires, pourrait rendre accessibles des agents biologiques potentiellement dangereux. Enfin, les phénomènes météorologiques extrêmes et imprévisibles augmentent le risque d'accidents industriels et de rejet de matières toxiques. L'accessibilité accrue de matières dangereuses pourrait faciliter le développement d'armes biologiques, surtout si, à l'avenir, les adversaires n'ont plus besoin de laboratoires pour en fabriquer. Certains analystes sont d'avis qu'en l'absence de garanties, il ne serait pas inconcevable de voir les armes biologiques artisanales devenir monnaie courante⁸⁵. Par ailleurs, la dégradation et la perte d'habitats naturels entraînent une multiplication des contacts entre les humains et la faune sauvage, ce qui augmente le risque de propagation de zoonoses et d'apparition de nouvelles épidémies.

Les effets du changement climatique nuiraient aussi à l'efficacité des mesures d'atténuation des risques ou des mesures de sécurisation en cas d'incident. Ainsi, le réchauffement à la surface de la Terre fera à certains endroits tellement monter la température

que les équipements de protection actuels ne pourraient pas y être utilisés, les variations de température et l'imprévisibilité des délais d'évaporation compliqueraient considérablement le travail de décontamination, et comme les conditions météorologiques et les schémas de dispersion seront moins prévisibles, il sera plus difficile de mettre en œuvre les contre-mesures CBRN d'usage et de prévoir les directions dans lesquelles les agents aéroportés dangereux pourraient se propager ; les moyens spatiaux utilisés pour les prévisions météorologiques seront plus que jamais nécessaires pour en suivre la propagation.

90%

des brevets biotechnologiques sont détenus par les États-Unis et l'Union européenne.

Pays leaders du secteur

Les États-Unis sont le leader mondial des biotechnologies, un secteur dans lequel leurs investissements en R&D sont d'une ampleur inégalée. Ils sont également le leader mondial

des brevets biotechnologiques, une position d'ailleurs confortée par un cadre solide en matière de propriété intellectuelle et par tout un écosystème d'innovation⁸⁶. Cela étant, de nombreux autres pays ont accru leurs dépenses R&D et leurs investissements dans le domaine des biotechnologies, et pour faire des projections concernant l'évolution du secteur dans les vingt prochaines années, bien d'autres pays encore seraient à prendre en compte. Le Royaume-Uni est un pôle reconnu d'innovation biotechnologique, et son secteur connaît un essor grâce aux progrès récemment réalisés pour ce qui est des demandes de brevet et des start-ups du secteur des sciences de la vie, eux-mêmes à l'origine d'une hausse des investissements publics⁸⁷. Le pays se classe toujours au troisième rang mondial des citations en sciences médicales (derrière les États-Unis et la Chine)⁸⁸, et, selon les données disponibles, son secteur des biotechnologies en particulier va connaître une forte croissance et recruter à tour de bras⁸⁹. L'Allemagne, quant à elle, est l'un des leaders mondiaux des produits pharmaceutiques : son secteur occupe la quatrième place mondiale (derrière les États-Unis, la Chine et le Japon)⁹⁰. En plus des investissements substantiels du pays en R&D, les petites et moyennes entreprises et les instituts de recherche allemands contribuent aux avancées mondiales dans le domaine des biotechnologies et de la découverte de médicaments⁹¹. La Suisse, pour sa part, est, historiquement, un poids lourd du secteur des produits biopharmaceutiques, avec notamment un niveau record d'investissements privés réalisés dans les biotechnologies en 2023⁹². Dans les dix années à venir, la Chine et l'Inde devraient l'une et l'autre accroître leurs capacités dans ce domaine, au point, peut-être, de concurrencer ou de surpasser les puissances régionales traditionnelles, comme le Japon, mais aussi d'autres leaders du secteur. L'Inde a réalisé des progrès notables dans les biocarburants notamment, et elle devrait bientôt rattraper la Chine pour ce qui est des publications dans ce domaine, après avoir déjà dépassé les États-Unis⁹³.

Pour ce qui est du nombre de brevets détenus par la Chine dans le domaine des biotechnologies, il est difficile d'obtenir des informations actualisées, mais selon des données de 2020, le pays reste à la traîne des États-Unis et de l'Union européenne, avec seulement 10 % des brevets déposés dans le monde⁹⁴. Toutefois, le gouvernement chinois ayant désigné publiquement les biotechnologies comme essentielles à la compétitivité – il en a fait clairement l'une des priorités de son 14^e plan quinquennal⁹⁵ –, il y a fort à parier que la Chine progressera dans ce domaine⁹⁶. L'Inde, quant à elle, a récemment réalisé des avancées dans la biofabrication, entre autres, et elle a annoncé, en 2024, une politique « BioE3 » (la biotechnologie au service de l'économie, de l'environnement et de l'emploi) visant à encourager la poursuite des progrès⁹⁷.



3.4 Pistes de réflexion pour les dirigeants

Du fait des avantages considérables qu'elles pourraient offrir et des risques majeurs qu'elles impliquent, les biotechnologies représentent un défi inédit pour les responsables politiques, les scientifiques et les industriels. L'exploitation de tout le potentiel de la biologie de synthèse passera par l'adoption d'une approche interdisciplinaire axée sur la collaboration scientifique internationale et permettant, lorsqu'il y a lieu, de protéger les travaux de recherche sensibles⁹⁸.

Dans l'optique d'une approche responsable, il conviendrait de prendre les devants en élaborant des normes internationales de biosécurité et en mettant en place les garde-fous nécessaires, notamment à l'intention des laboratoires où des agents pathogènes dangereux sont manipulés⁹⁹. Il est par ailleurs indispensable d'investir davantage dans la défense biologique et la défense CBRN¹⁰⁰. Pour s'assurer que le développement des technologies issues de la biologie de synthèse est sûr et pérenne, il faudrait aussi mettre en place des mécanismes de contrôle appropriés (éthique, aspects juridiques et sécurité), dans le cadre d'une vaste collaboration internationale.

À l'OTAN, d'importants travaux ont déjà été menés à bien en ce qui concerne l'élaboration de normes et de règles applicables aux technologies

émergentes. La stratégie de l'OTAN relative aux biotechnologies et aux technologies d'amélioration des capacités humaines¹⁰¹ et la version révisée de la stratégie de l'OTAN pour l'intelligence artificielle¹⁰² montrent, exemples à l'appui, comment les pouvoirs publics et les forces armées peuvent promouvoir les principes d'utilisation responsable dans les domaines S&T présentant un risque de détournement élevé.

Pour ce qui est des menaces CBRN, les dirigeants doivent prendre conscience que les capacités de défense actuelles ne sont plus adaptées au vu de l'évolution de l'éventail des menaces et des effets du changement climatique. Dans un monde en constante mutation, les Alliés vont avoir beaucoup de mal à assurer une défense CBRN à toute épreuve, mais ils doivent y parvenir s'ils ne veulent pas se retrouver dans une situation dangereuse¹⁰³. La collaboration au sein de la communauté scientifique de l'OTAN – notamment la prise en compte des problématiques liées au changement climatique dans un éventail plus large de travaux S&T – sera essentielle dans le cadre de la lutte contre ces menaces. Pour favoriser les progrès et une exploitation éthique des avancées scientifiques, il importera que les Alliés et les partenaires alignent leurs travaux R&D sur leur socle commun de normes et de valeurs.

The background is an abstract, textured composition. On the left side, there are vibrant, layered orange and red tones, resembling a cross-section of a mineral or a biological tissue. These transition into a dark, almost black, textured area in the center, which then blends into a lighter, blue-grey textured area on the right. The overall effect is one of depth and complexity, with various textures and colors creating a rich, multi-dimensional visual field.

Grande tendance n° 4

Inégalités dans
l'accès aux
ressources



Impact attendu et chronologie

Présent

2025

Impact sur l'OTAN



Futur

2045

Ce qu'il faut retenir

Le changement climatique va avoir un impact sur l'accès des Alliés aux ressources essentielles pour l'innovation scientifique et technologique.

Les chocs qui s'annoncent, notamment ceux qui résulteront du changement climatique, vont exacerber les tensions entre les pays capables de s'en remettre relativement facilement et les autres.

Les technologies qui seront développées et adoptées demain aideront à apaiser ces tensions mais auront aussi pour effet de les aggraver.

4.1 Contexte

Si les inégalités dans l'accès aux ressources ont toujours existé, elles ne sont devenues un facteur géopolitique majeur que sous l'effet du développement technologique moderne. Les évolutions technologiques ont en effet contribué à la raréfaction des ressources (notamment en stimulant la demande en matériaux essentiels) et

au creusement des inégalités dans leur répartition (par exemple entre les pays riches et les pays moins prospères). Pour anticiper les incidences – positives et négatives – que la technologie aura sur l'offre et la demande, il est nécessaire de comprendre le contexte politique et économique complexe dans lequel s'inscrit cette tendance.

4.2 Incidences

La course aux ressources essentielles va s'intensifier, tout comme la course aux technologies qui permettront de se passer de ces ressources ou de s'en rendre moins tributaire, et plusieurs facteurs vont influencer cette tendance, notamment les conséquences du changement climatique – variables d'un pays ou d'une région à l'autre –, l'intensification des flux migratoires et la multiplication des conflits sous l'effet du dérèglement du climat, ou encore la diminution de la mobilité sociale dans plusieurs régions. Les moyens scientifiques et technologiques, toujours plus sophistiqués, jouent certes un rôle dans le creusement de ces inégalités, mais ils stimulent également le développement de solutions innovantes : l'IA, les biotechnologies, les technologies vertes et les matériaux alternatifs/innovants peuvent ainsi nous aider à améliorer la sécurité énergétique, à mieux protéger les infrastructures critiques et à sécuriser l'approvisionnement logistique.

Au cours des vingt prochaines années, pour une bonne gestion et une répartition adéquate des ressources, il sera d'autant plus indispensable d'accroître la résilience et la sécurité économiques, de même que de développer l'économie circulaire.

Dans ce contexte, les Alliés peuvent, pour renforcer leur résilience collective à 32, miser sur la mise en commun de leurs ressources et l'échange de bonnes pratiques. Le renforcement de leur résilience devrait également se répercuter sur les partenariats de l'OTAN, raison pour laquelle il est important que l'Alliance approfondisse et développe les relations qu'elle entretient aux quatre coins du monde.

Inégalités dans l'accès aux technologies

Si les solutions innovantes vont sans doute s'avérer incontournables lorsqu'il s'agira de relever les défis mondiaux de demain, elles ne profiteront probablement pas à tout le monde de la même manière. Par le passé, l'accès aux technologies émergentes a rarement été universel. Dans le monde d'aujourd'hui, les solutions technologiques qui seront développées pour favoriser l'accès aux ressources pourraient profiter surtout aux économies les moins vulnérables, à moins de mettre en place des politiques visant à en répartir plus équitablement les retombées positives. Dans le pire des scénarios, si aucun garde-fou n'est prévu pour réglementer les essais et l'utilisation des technologies émergentes par les pays puissants et les leaders du secteur privé, les pays moins

favorisés pourraient finir par pâtir du manque de réglementation et des abus (par exemple pour ce qui est de la géoingénierie).

À mesure que les technologies émergentes seront adoptées par les acteurs économiques, par le monde politique et par la société en général, il faudra en suivre les effets sur les économies plus fragiles. Si, par exemple, les technologies de pointe faisant appel à l'IA continuent d'être rapidement intégrées dans certains pans des économies modernes mais restent inaccessibles ou sous-utilisées dans d'autres, il en résultera un accroissement des inégalités de revenus, de richesse et de puissance¹⁰⁴. Avec la généralisation et la réglementation des technologies à l'échelle du globe, soit les fossés numériques existants s'élargiront, soit les pays traditionnellement sous-développés en bénéficieront et pourront ainsi doper leur productivité et leur croissance économique¹⁰⁵.

Incidences sur le monde du travail

Certains pâtiront plus que d'autres des inégalités dans la répartition des ressources, de la raréfaction des ressources et des conséquences du changement climatique, et cela aura également

des incidences sur le monde du travail. La hausse de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes obligera à adapter les horaires de travail dans divers secteurs. Ainsi, plus les températures augmenteront, plus les ouvriers, par exemple, auront du mal à accomplir leurs tâches. Ces tendances sont déjà perceptibles en Afrique centrale et dans le golfe Persique¹⁰⁶, mais il ne fait aucun doute que d'autres régions seront également affectées à l'avenir.

Par ailleurs, les technologies devraient continuer d'influencer considérablement l'évolution du monde du travail, en particulier pour ce qui concerne les compétences recherchées et les rémunérations proposées. Les experts s'attendent en effet à ce que l'accélération technologique continue d'encourager la transformation des entreprises dans les cinq prochaines années au moins, et à ce que la numérisation croissante et l'intégration de technologies nouvelles et émergentes dans le monde du travail viennent doper la croissance économique nette. Parmi les secteurs qui devraient connaître une forte croissance, on retrouve le commerce numérique¹⁰⁷ et, dans une moindre mesure, l'économie circulaire fondée sur la technologie, qui offre une piste de solution à la surconsommation¹⁰⁸.

Il sera crucial de suivre les effets de l'adoption des technologies émergentes sur les économies plus fragiles.

4.3 État des lieux

On observe depuis quelques années une résurgence de l'idée que le monde est divisé en deux camps : celui des pays qui profitent de l'ordre politique et économique en place, et celui des pays qui en pâtissent. Les résultats du vote sur la résolution des Nations Unies intitulée « Vers un nouvel ordre économique international » reflètent globalement ce constat, la grande majorité des Alliés ayant voté contre, de même que les partenaires de l'Indo-Pacifique¹⁰⁹. Si les pays d'Afrique, d'Amérique latine, du Moyen-Orient et d'Asie du Sud-Est ne peuvent certes pas être considérés comme un tout homogène, on remarque néanmoins que leurs doléances à l'encontre des États traditionnellement plus puissants tendent à converger de plus en plus. Ces tensions sont exacerbées par le changement climatique, les décideurs des pays moins riches faisant observer que ce sont eux qui sont les plus impactés par les conséquences de ce dernier alors que les pays riches sont responsables de près de la moitié des émissions mondiales¹¹⁰.

On observe également une diminution du volume de ressources essentielles disponibles, aussi bien les ressources de première nécessité que les minerais rares. Les experts prévoient d'ailleurs qu'à moins d'infléchir les trajectoires de surconsommation, il faudra en 2050 l'équivalent de trois fois les ressources de la Terre pour subvenir aux besoins de la population mondiale¹¹¹. Mais la surconsommation n'est pas le seul problème,

d'autres facteurs venant aggraver la tendance, comme le changement climatique (phénomènes météorologiques extrêmes, dégradation de l'environnement, etc.), la multiplication des conflits de longue durée, la croissance démographique et l'urbanisation. Au Moyen-Orient, en Afrique subsaharienne et en Asie du Sud en particulier, il devient de plus en plus difficile de satisfaire les besoins en certaines ressources élémentaires comme la nourriture, l'eau et l'énergie. Dans l'état actuel des choses, il n'est guère probable que la crise alimentaire mondiale se résorbe dans les dix à quinze prochaines années¹¹². En 2023, l'insécurité alimentaire a provoqué le déplacement de plus de 90 millions de personnes¹¹³. Si la pénurie d'eau est pour l'heure moins critique, elle devrait devenir aussi grave que l'insécurité alimentaire, et les experts estiment que la moitié de la population mondiale pourrait vivre dans des zones touchées par le manque d'eau dès 2025, ce qui risquerait d'entraîner le déplacement de plus de 700 millions de personnes d'ici 2030¹¹⁴.

Matériaux rares

La demande en matériaux et minerais rares (tels que le lithium) s'accroît sous l'effet de la croissance économique, en particulier dans les pays riches. Ce phénomène va d'ailleurs s'accroître du fait de la course aux substances rares (bien souvent essentielles à la fabrication de technologies de pointe) que se livrent ceux qui

cherchent à conserver leur avantage technologique. Et la découverte sporadique de nouveaux gisements de matériaux critiques – comme les gisements de terres rares découverts en Suède et en Norvège en 2023-2024¹¹⁵ –, ne suffira pas à changer la donne. Les ressources rares sont de plus en plus contrôlées par une poignée de pays, tandis que la demande continue de croître, notamment sous l'effet du développement technologique. Selon certains experts, on pourrait ainsi voir dans les années à venir des cartels se former dans ce domaine, d'autant que nous allons être de plus en plus tributaires des matériaux d'importance critique, dont ceux utilisés dans la fabrication des technologies essentielles à la transition énergétique. L'apparition de ces cartels viendrait sans doute encore intensifier la compétition stratégique, déjà forte, et modifierait considérablement la nature des partenariats mondiaux¹¹⁶. Dans ce contexte, le gouvernement chinois a publié un décret, entré en vigueur en octobre 2024, qui soumet l'extraction et le commerce de matériaux rares au contrôle de l'État¹¹⁷. Si ces diverses tendances se confirment, il deviendra indispensable d'être capable de développer des technologies sans matériaux rares et de privilégier l'économie circulaire¹¹⁸.

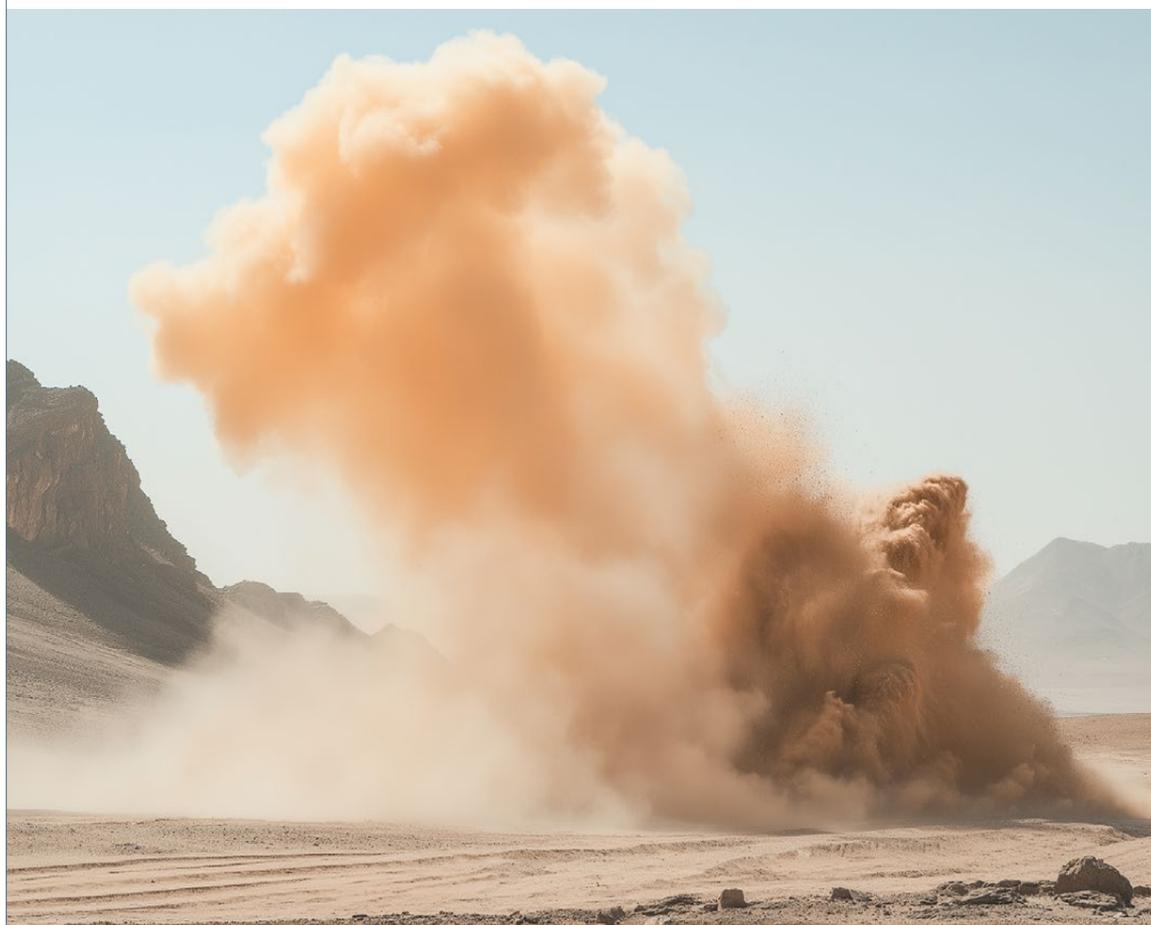
Les nouveaux matériaux pourraient constituer des alternatives à certaines substances essentielles au développement technologique.

Solutions technologiques

Les technologies émergentes joueront un rôle crucial dans la lutte contre les effets du changement climatique, notamment dans les

régions particulièrement vulnérables, et elles offriront des alternatives à des matériaux essentiels et à des ressources vitales. La biologie de synthèse, par exemple, pourrait bien révolutionner l'agriculture (voir la grande tendance n° 3), et les biotechnologies peuvent apporter des solutions à divers problèmes à l'origine des pénuries et de l'insécurité alimentaires : mise au point d'aliments qui présentent une haute valeur nutritionnelle et se conservent plus longtemps, production d'aliments microbiens pour accélérer la production et mieux respecter l'environnement, modification génétique de cultures pour les rendre plus résistantes aux perturbations environnementales^{119,120}, ou encore association des technologies spatiales (images satellites) avec des technologies de télédétection faisant appel à l'IA pour suivre avec une plus grande précision les événements météorologiques.

S'agissant de la pénurie de minerais rares, de nouveaux matériaux pourraient constituer des alternatives à certaines substances essentielles au développement technologique. Il est probable que, dans les vingt prochaines années, certains procédés technologiques comme le piégeage du carbone, le développement d'hydrogène vert, voire la géoingénierie solaire, deviendront de plus en plus utilisés. Longtemps délaissée en raison de questionnements, légitimes, au sujet de ses effets indésirables et du dilemme éthique qu'elle posait, la géoingénierie suscite depuis peu un regain d'intérêt de la part du secteur privé et des milieux universitaires^{121,122}.



4.4 Pistes de réflexion pour les dirigeants

S'il est difficile d'anticiper les chocs qui vont se produire dans le monde et leurs répercussions exactes, on peut néanmoins estimer très probable que le dérèglement climatique provoque davantage de tensions, de déplacements de populations et de conflits au cours des vingt prochaines années. Pour se préparer à ces développements, il faudra agir sur plusieurs fronts.

Les Alliés pourraient envisager de mener des activités de diplomatie en faveur de l'élaboration de normes et de la réduction des inégalités, croissantes, dans l'accès aux ressources. Ils pourraient notamment favoriser la collaboration internationale sur le développement de technologies qui permettent d'accroître la résilience des chaînes d'approvisionnement, d'améliorer la recyclabilité des matériaux et

de produire des matériaux nouveaux comme alternative à des minerais rares. L'initiative danoise « TechPlomacy » et la stratégie allemande pour une politique numérique internationale en sont de bons exemples^{123,124}. D'ailleurs, dans le cadre de ces activités de collaboration et de diplomatie, il faudra tenir compte du fait que la coopération internationale concernant l'élaboration de normes technologiques va devenir de plus en plus cruciale dans les vingt prochaines années.

L'Alliance devrait par ailleurs faire plus pour renforcer la sécurité énergétique, par exemple en sollicitant davantage le Centre d'excellence OTAN pour la sécurité énergétique, ce qui lui permettrait d'encourager le recours à des solutions énergétiques sûres pour répondre aux besoins opérationnels.



Grande tendance n° 5

Érosion de
la confiance
du public



Impact attendu et chronologie

Impact sur l'OTAN

Présent

2025



Futur

2045

Ce qu'il faut retenir

Les dirigeants de la planète doivent unir leurs voix pour encourager l'utilisation responsable des technologies émergentes et des technologies de rupture.

Aujourd'hui, des acteurs malintentionnés utilisent les technologies, en particulier l'intelligence artificielle, pour décrédibiliser les pouvoirs publics, les institutions et la science aux yeux des citoyens, et ce phénomène est appelé à s'aggraver encore sous l'effet d'une polarisation politique croissante.

Même si, sur le long terme, la technologie elle-même pourrait nous procurer les solutions dont nous avons besoin pour lutter contre la désinformation et la mésinformation, dans l'immédiat, nos meilleures armes face à ces phénomènes sont la communication stratégique, les mécanismes juridiques et réglementaires, ainsi que l'éducation à la technologie.

5.1 Contexte

La confiance que les citoyens placent dans la science, dans les institutions et dans les pouvoirs publics s'érode dans de nombreuses régions du monde et, à l'heure actuelle, les progrès scientifiques et technologiques – en particulier l'IA, qui permet de générer et de diffuser plus rapidement de fausses informations (mésinformation) ou des informations délibérément mensongères ou trompeuses (désinformation) – ont pour principal effet d'accélérer ce phénomène. On peut donc s'attendre à voir des concepts tels que le techno-nationalisme ou la souveraineté numérique gagner en importance. Dans le même temps, la nécessité de trouver des solutions scientifiques et technologiques fiables et transparentes mais aussi de sensibiliser au bon usage des technologies va se faire sentir de plus en plus ; enfin, les changements d'ordre démographique vont également avoir un impact sachant que les habitudes de consommation des médias numériques varient selon les générations et les régions.

En plus d'offrir de nouvelles possibilités dans le domaine de la guerre hybride et de la coercition économique (voir la grande tendance n° 1), les progrès technologiques facilitent la propagation de la désinformation et de la mésinformation ainsi que d'autres contenus préjudiciables. Le passage au numérique et la popularité des réseaux sociaux et autres plateformes en ligne ont rendu possibles la diffusion et l'échange d'informations depuis et vers n'importe quel endroit du globe. Utilisées avec prudence et bien réglementées, les plateformes en ligne sont de précieux outils d'échange, de socialisation et d'éducation à l'échelle internationale. Toutefois, en l'absence de réglementation rigoureuse, ces nouvelles technologies peuvent être facilement exploitées pour amplifier les effets d'une utilisation malveillante de la communication en ligne.

5.2 Incidences

Les technologies émergentes, en particulier l'IA, peuvent être manipulées et exploitées pour déformer la vérité et ainsi engendrer de l'instabilité¹²⁵. Les campagnes malveillantes consistant à diffuser des contenus de propagande et des informations mensongères pour influencer l'opinion publique ne sont pas un phénomène nouveau, mais le recours à la technologie pour

générer des informations préjudiciables qui soient plus plausibles et pour les diffuser rapidement et à grande échelle est source de nouveaux défis. Qu'il soit question d'ingérence électorale ou encore de *deepfakes*, les progrès technologiques non seulement rendent les contenus douteux plus vraisemblables, mais facilitent également l'accès aux informations trompeuses.

En raison du réalisme croissant du contenu généré par la technologie, de nombreux utilisateurs ont de la difficulté à distinguer le vrai du faux.

En raison du réalisme croissant du contenu généré par la technologie, de nombreux utilisateurs ont de la difficulté à distinguer le vrai du faux. Pour ne rien arranger, la rapidité avec laquelle il est désormais possible de générer des informations dommageables complique considérablement la tâche des dispositifs de contrôle des plateformes, de vérification des faits, de régulation et autres dont l'objectif est de promouvoir la diffusion d'informations fiables. La lenteur des réactions et l'absence de réglementation alimentent la méfiance envers les institutions et ne font que renforcer une tendance déjà inquiétante. Qui plus est, même les initiatives prises avec de bonnes intentions peuvent avoir des effets indésirables. Ainsi, une récente étude a révélé que les messages d'avertissement destinés à sensibiliser les lecteurs au risque de mésinformation amenaient malheureusement ces derniers à se méfier aussi d'informations pourtant exactes¹²⁶.

Un autre danger est celui de la manipulation de l'IA, qui peut nuire aux applications servant un objectif louable. On pense par exemple à l'injection, par le biais de « portes dérobées », de données incorrectes ou malveillantes dans les modèles d'IA, l'idée étant de manipuler la prise de décision ou de compromettre des systèmes utilisés à des fins médicales, industrielles, financières ou autres. Un tel scénario souligne la nécessité, pour les

opérateurs et les décideurs, de prendre toute la mesure du risque que peut représenter une dépendance excessive aux systèmes reposant sur l'IA : les solutions technologiques ne doivent pas supplanter la pensée critique et les compétences décisionnelles, mais plutôt les compléter en les rendant plus efficaces.

Ces différentes tendances ont pour l'OTAN des incidences à la fois directes et indirectes. D'une part, la technologie est utilisée pour propager des informations préjudiciables à l'Organisation – les analystes ont ainsi constaté qu'une grande partie des publications relatives à l'OTAN trouvées sur les réseaux sociaux en langue russe étaient générées de manière automatique¹²⁷. D'autre part, le fait que les citoyens se méfient de plus en plus des institutions et des pouvoirs publics influe sur la manière dont l'Alliance est perçue dans le monde, ce qui pourrait entraver sa capacité à atteindre ses objectifs. En effet, en étant perçue comme un acteur non fiable, l'OTAN pourrait avoir plus de mal à nouer et à renforcer ses partenariats avec d'autres pays ou avec le secteur privé et le monde universitaire. En outre, une perception négative des institutions du secteur de la défense, et l'OTAN en est une, viendrait certainement accentuer les difficultés que rencontrent certains Alliés pour atteindre leurs objectifs de recrutement militaire.

5.3 État des lieux

L'IA permet de répandre la désinformation comme jamais auparavant. En effet, l'IA générative est capable de produire en un minimum de temps des contenus imitant à s'y méprendre ceux qui sont créés par des humains, que les informations dont elle s'inspire soient exactes ou non. Et plus cette technologie évolue, plus il devient difficile de distinguer les contenus générés par la machine de ceux qui sont produits par des humains. L'utilisation combinée de l'IA et de l'apprentissage automatique pour créer des *deepfakes* est également de plus en plus performante. En outre, il ressort de récentes études que les grands modèles de langage (LLM) utilisés par l'IA sont capables de produire facilement des textes très persuasifs (notamment de propagande), et qu'une intervention humaine minime suffit pour corriger les éventuelles erreurs de l'IA et faire en sorte que le texte ainsi généré paraisse avoir été entièrement rédigé par un humain¹²⁸. Il est donc aisé de créer et de faire circuler des contenus trompeurs et préjudiciables car, dans la plupart des cas, leur production ne nécessite pas de recourir à des outils de pointe ou à des dispositifs onéreux.

Polarisation politique

S'il est impossible de prévoir jusqu'où iront les pratiques de désinformation et quelles seront leurs incidences, on peut toutefois raisonnablement penser que la polarisation géopolitique à l'échelle du monde (voir la grande tendance n° 1) et la polarisation politique au niveau des pays ainsi que l'émergence de gouvernements autoritaires, phénomènes qui ont pris de l'ampleur ces dernières années, influenceront sur le tour que prendront les choses. L'on se trouve en effet dans un cercle vicieux : la désinformation attise la méfiance et favorise la polarisation, tandis que les divisions et la polarisation politiques accentuent le risque de propagation de la désinformation et donnent davantage de crédit à cette dernière.

Fragmentation de l'internet

Certains experts prévoient que le secteur des technologies connaîtra lui aussi une fragmentation progressive, au gré des divisions régionales. La régionalisation des réseaux internet ou la fragmentation de l'internet en différents réseaux

étroitement contrôlés (« splinternet ») risquent de s'accroître, et ce pour plusieurs raisons, parmi lesquelles l'existence de différences entre les régions s'agissant des technologies adoptées et des réglementations applicables, la possible réduction des options matérielles disponibles si le secteur devait continuer de se concentrer autour d'un nombre réduit de fournisseurs, ou encore la volonté qu'auraient certains gouvernements autoritaires d'exercer un contrôle strict sur les médias en ligne et sur l'opposition politique. Si le « splinternet » devient une réalité, il est probable que les tensions géopolitiques mondiales s'en trouveront exacerbées, qu'il deviendra plus facile de propager des informations mensongères et que celles-ci seront plus facilement prises au sérieux.

Confiance dans la science

Les effets combinés de la propagation de la désinformation au moyen de l'IA et de l'absence de contrôle réglementaire doivent être replacés dans le contexte actuel de compétition stratégique accrue à l'échelle mondiale. Conjugés à la possibilité que l'économie mondiale, le paysage politique et même l'internet soient davantage régionalisés, ces phénomènes augmentent le risque d'érosion de la confiance du public et d'apparition de lignes de fracture sur les plans technologique, politique, économique et idéologique. Si cette tendance se confirme, il est très probable que la confiance dans les données empiriques et scientifiques diminuera elle aussi.

Les plateformes en ligne ont été envahies par une telle quantité de fausses informations au sujet de la pandémie que le phénomène a été qualifié d'« infodémie ».

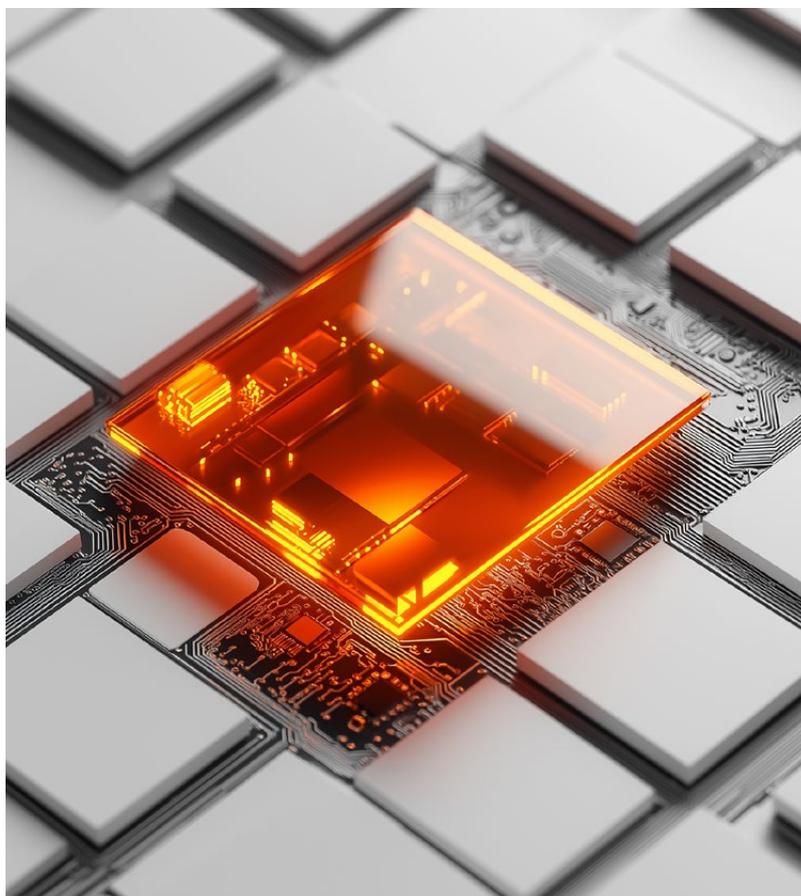
Si l'on prend l'exemple de la pandémie de COVID-19, les données montrent l'existence d'un fort lien de corrélation entre, d'une part, les convictions politiques et le niveau de confiance des citoyens à l'égard des pouvoirs publics et, d'autre part, le niveau de confiance dans les vaccins. Les plateformes en ligne ont été envahies par une telle quantité de fausses informations au sujet de la pandémie que le phénomène a été qualifié d'« infodémie »¹²⁹. En matière de santé publique, la disponibilité d'avis scientifiques fondés sur des données probantes demeurera essentielle pour la gestion des chocs à venir, tout comme les initiatives d'éducation inclusive à la santé publique.

Les décideurs doivent également prendre acte du fait que non seulement les facteurs à l'origine de cette infodémie sont aujourd'hui encore une source de défis majeurs, mais qu'ils sont aussi exacerbés par les progrès réalisés dans le domaine de l'IA générative, raison pour laquelle il conviendrait d'évaluer les risques ailleurs que dans le seul domaine de la santé publique, et d'envisager un éventail plus large de chocs potentiels.

Solutions technologiques

Il ne sera pas aisé de mettre en place la réglementation et les garde-fous qui s'imposent. Dans le cas de l'IA, les outils utilisés pour mesurer certains critères de base, tels que les biais algorithmiques, font toujours cruellement défaut, alors que ce besoin est largement reconnu. D'autres risques ne sont pas encore identifiés ou compris, et même quand ils le sont, ils ne font pas toujours l'objet d'un suivi. Quoi qu'il en soit, il est presque certain que l'un des prochains défis à relever sera lié à la capacité des fonctions de chat en direct de l'IA d'influencer les comportements humains et la prise de décision, sachant qu'il n'est pas encore possible aujourd'hui de mesurer l'ampleur de ce phénomène¹³⁰. Alors que les chercheurs peinent à appréhender les risques actuels et à cerner ceux qui pourraient apparaître prochainement, les technologies continuent d'évoluer à grande vitesse. Ainsi, des spécialistes ont récemment constaté que les chatbots basés sur l'IA étaient capables de contourner les garde-fous existants et de générer des informations dangereuses en dépit des mesures que les développeurs mettent en place pour empêcher que cela se produise¹³¹.

Face à ces défis de taille qui s'additionnent, il convient d'apporter des solutions globales et créatives. Dans de nombreux domaines, la communauté scientifique et technologique internationale a un rôle crucial à jouer. L'*International Panel on the Information Environment*, par exemple, fournit aux responsables politiques, à l'industrie et à la société civile des avis concernant les menaces qui pèsent sur l'environnement informationnel, telles que les biais de l'IA et la désinformation algorithmique¹³².



L'un des prochains défis à relever sera lié à la capacité des fonctions de chat en direct de l'IA d'influencer les comportements humains et la prise de décision.

Pour ce qui est de la réglementation des technologies et des plateformes, il sera probablement nécessaire de s'appuyer sur des outils avancés d'IA et de LLM et de mettre en place des dispositifs de veille en ligne permettant de repérer les comportements dangereux et d'y réagir. Toutefois, les experts ne sont pour l'instant pas en mesure de déterminer si, à terme, les outils technologiques profiteront plutôt aux personnes qui veillent à la sécurité des informations en ligne ou à celles qui cherchent à la compromettre¹³³. Il faudra en outre impérativement suivre une approche pilotée par la donnée au moment d'évaluer les solutions envisageables pour réduire le risque de propagation d'informations préjudiciables. De récentes études montrent en effet que, contrairement aux idées reçues, les utilisateurs qui font des recherches en ligne pour s'assurer de la véracité d'informations sont en fait davantage

susceptibles de croire à de fausses informations¹³⁴. Il semblerait donc qu'il faille repenser l'éducation aux médias, car l'utilisation d'outils de recherche pour vérifier l'information est souvent conseillée dans les formations actuelles. Cette éducation aux médias ne devrait d'ailleurs plus être fondée sur une approche unique, mais être adaptée aux différents types d'utilisateurs en ligne, ceux-ci n'étant pas confrontés aux mêmes situations suivant leur âge et leur nationalité.

Opérer un changement à grande échelle pourrait toutefois s'avérer très complexe, car l'objectif, de plus en plus populaire, de la souveraineté numérique nationale se heurte à de sérieux obstacles, tels que l'influence accrue du secteur privé ainsi que des objectifs concurrents en matière de sécurité nationale, sans compter la politique intérieure des pays concernés¹³⁵.

5.4 Pistes de réflexion pour les dirigeants

Les recherches tendent à suggérer que la confiance que les citoyens placent dans la science, les institutions et les pouvoirs publics risque très fortement de continuer à s'éroder. Pour lutter contre ce phénomène, et contrer la menace que représentent les informations générées par l'IA, des solutions scientifiques et technologiques fiables doivent être mises en place. Pour ce faire, il conviendra probablement d'investir de manière substantielle dans des outils d'IA et de LLM permettant d'assurer une veille et de repérer ainsi les contenus préjudiciables et prévenir leur propagation, ainsi que de mettre en place une réglementation visant à garantir que ce service de veille soit exécuté de manière responsable. Par ailleurs, au cours des vingt prochaines années, il deviendra indispensable de sensibiliser les citoyens au bon usage des médias et des technologies, notamment en les incitant à se fonder sur les faits et à faire preuve d'esprit critique.

Pour atténuer l'érosion de la confiance du public dans la science et la technologie, les hauts dirigeants devraient continuer de donner la priorité à la communication stratégique, et notamment

à l'anticipation et à la réfutation des thèses mensongères. Il est également essentiel de prôner une utilisation responsable des technologies, au travers par exemple de l'élaboration et de l'application de principes d'utilisation responsable (PRU). Pour favoriser la confiance, la communication, qui devra être claire et cohérente, relative à ces PRU et à toutes les autres initiatives qui seraient prises devra rester au premier rang des priorités. Les dirigeants des pays de l'OTAN devraient également réfléchir à la meilleure façon d'établir le contact avec les communautés internationales d'experts travaillant sur les aspects techniques de l'environnement informationnel.

Il importe, enfin, de prendre pleinement conscience du fait qu'il est très facile d'instrumentaliser à moindre coût certaines technologies pour générer des malentendus et répandre de fausses vérités. L'IA permet aujourd'hui de propager rapidement la mésinformation et la désinformation, et cette dernière, lorsqu'elle est efficace, peut instiller le doute au sein d'un public cible même sans récit ou faits plausibles à l'appui.



Grande tendance n° 6

Intégration des
technologies et
dépendances



Impact attendu et chronologie

Présent

2025

Impact sur l'OTAN



Futur

2045

Ce qu'il faut retenir

L'interopérabilité des capacités scientifiques et technologiques de demain devra être assurée dès la conception.

L'interopérabilité sera plus essentielle que jamais pour les Alliés au cours des vingt prochaines années mais, pour y parvenir, il faudra surmonter de nouvelles difficultés, qui résultent du fait que les disparités s'accroissent en ce qui concerne l'accès aux technologies, leur utilisation et leur réglementation.

Il est nécessaire de coopérer sur le plan économique avec les pays qui partagent nos valeurs et avec les partenaires du secteur privé.

Sachant que la science et la technologie jouent un rôle de plus en plus central dans la conduite d'un éventail d'opérations militaires de plus en plus large, la dépendance croissante à l'égard des acteurs privés pour des capacités de défense d'importance critique va devenir de plus en plus problématique.

6.1 Contexte

La poursuite de l'exploitation des technologies émergentes dans la recherche-développement, dans la production industrielle, dans les transports et dans les communications, pour ne citer que quelques domaines, pourrait entraîner une accélération rapide des progrès scientifiques et de l'innovation. Demain, de nombreuses personnes et de nombreux secteurs bénéficieront de ces progrès, qu'il s'agisse, par exemple, de nouvelles perspectives pour l'exploration spatiale, de nouvelles avancées dans les domaines de

l'hypersonique et de la propulsion spatiale, ou encore de la possibilité de réinventer les systèmes de santé publique en appliquant les principes de la mécanique quantique à la conception des vaccins. Des avantages économiques et logistiques apparaissent déjà dans plusieurs domaines, grâce par exemple au recours à l'IA et à des technologies de fabrication avancée. Il est toutefois impératif de comprendre les risques et les défis que l'adoption des technologies pourrait comporter sur le long terme.

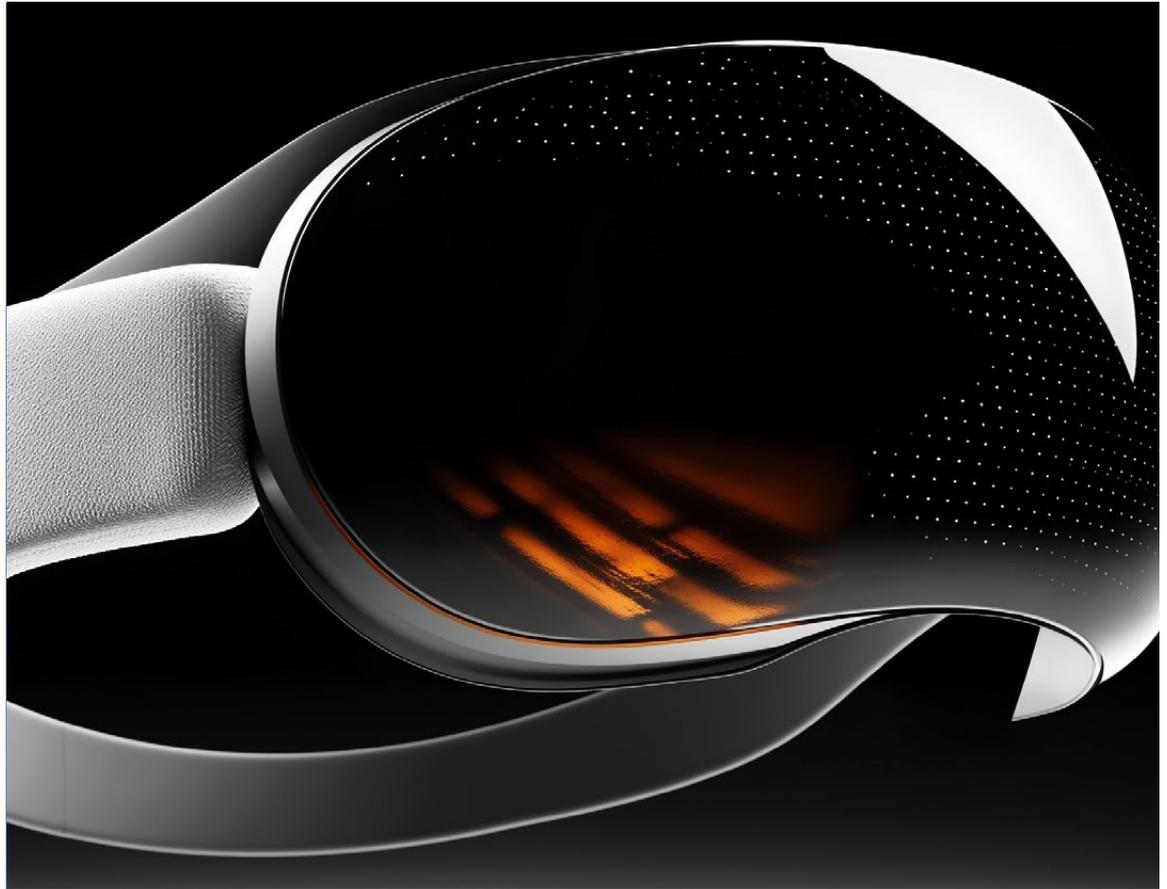
6.2 Incidences

À l'avenir, les progrès scientifiques et technologiques continueront certes d'apporter des solutions à des défis complexes, mais l'accès à ces solutions sera inégal, même entre pays membres ou partenaires de l'OTAN. Pour les pays ayant accès à des technologies de pointe, les différences en matière d'utilisation et de réglementation poseront probablement des difficultés pour ce qui est de l'interopérabilité ainsi que de l'harmonisation des normes sur les plans éthique et réglementaire. Dans le même temps, l'innovation étant de plus en plus portée par le secteur privé, de nouveaux défis pourraient apparaître sur le plan de l'intégration civilo-militaire et, sur le long terme, la dépendance accrue à l'égard de la science et de la technologie dans les domaines civils et militaires aura

probablement des conséquences inattendues, positives comme négatives. En outre, le recours croissant aux technologies à double usage, aux environnements synthétiques (virtuels ou de réalité mixte) et aux acteurs commerciaux entraînera sans doute une redéfinition des concepts traditionnels de dissuasion et d'escalade.

Dans le contexte OTAN, les futures capacités de défense dépendront de l'aptitude des planificateurs, des ingénieurs et des opérateurs à faire fonctionner les nouvelles solutions technologiques sur les plateformes d'ancienne génération. Ces efforts d'intégration devront par ailleurs être menés dans le respect des normes OTAN et des normes internationales. Les dépendances de long terme

L'innovation étant de plus en plus portée par le secteur privé, de nouveaux défis pourraient apparaître sur le plan de l'intégration civilo-militaire.



à l'égard de certaines technologies devront également être prises en considération au moment d'aligner les besoins dans le cadre du processus OTAN de planification et de défense (NDPP) et de développer des capacités collectives dans le cadre, par exemple, de projets à haute visibilité¹³⁶. Les entraînements et les exercices effectués à l'échelle de l'Alliance seront essentiels pour la compréhension des défis futurs en matière d'interopérabilité et des interdépendances complexes qui caractérisent le combat en coalition.

Dépendance à l'égard du secteur privé

Le secteur privé est aujourd'hui à l'origine de la vaste majorité des innovations dans le domaine de la défense, et une grande partie des technologies dont les forces armées ont besoin pour obtenir ou conserver l'avantage militaire sont, de ce fait, à double usage. Il est donc davantage probable que les technologies de pointe adoptées par les forces armées d'un pays donné puissent être intégrées par d'autres. Cela peut ouvrir des perspectives intéressantes pour les armées qui souhaitent s'exercer et s'entraîner ensemble, mais cela signifie aussi que ces technologies sont aisément accessibles à des compétiteurs ou des adversaires. Ainsi, si les Alliés ont souvent recours aux capacités sur étagère proposées par l'industrie parce qu'elles ont l'avantage d'être rapidement déployables et généralement moins chères, il faut garder à l'esprit qu'une dépendance excessive à l'égard d'entités commerciales pour l'acquisition de capacités d'importance critique pourrait engendrer des vulnérabilités en cas de

conflit avec un adversaire de force quasi égale. En outre, une dépendance croissante à l'égard du secteur privé pour l'obtention de capacités de défense stratégique pourrait également conduire à une remise en question de la manière dont les dirigeants militaires et les décideurs politiques envisagent traditionnellement la dissuasion.

Conséquences sociales

Au-delà des aspects militaires, économiques et géopolitiques, il importe également de comprendre les effets que l'intégration des technologies et les dépendances qui en résultent pourraient à la longue avoir sur les individus. Des recherches sur la dépendance aux technologies chez les enfants et les jeunes adultes laissent à penser qu'une utilisation excessive des technologies a des effets négatifs importants sur la santé mentale et sur la santé physique ainsi que sur le comportement social^{137,138} de ces personnes, sans oublier la possibilité d'une exposition à des campagnes de désinformation¹³⁹. S'agissant des technologies portables et en particulier des technologies implantées (implants cérébraux, prothèses avancées, exosquelettes intelligents, etc.), leurs effets sur la santé, sur les capacités cognitives et sur les repères identitaires des personnes concernées restent largement inconnus. Comme l'ont indiqué les experts, seules les utilisations de l'IA qui font l'objet d'un suivi peuvent être gérées de manière adéquate¹⁴⁰, raison pour laquelle il est vital de développer des mécanismes permettant de suivre et de mesurer l'impact de l'utilisation des technologies du futur sur l'être humain.

Il est vital de développer des mécanismes permettant de suivre et de mesurer l'impact de l'utilisation des technologies du futur sur l'être humain.

6.3 État des lieux

Si de nombreuses technologies présentent des avantages à court terme évidents, les conséquences à long terme de leur utilisation restent quant à elles souvent difficiles à prévoir. Il importe donc de réfléchir sérieusement aux scénarios qui pourraient se présenter à mesure que la science et la technologie seront intégrées dans les divers aspects de la vie quotidienne.

L'industrie manufacturière offre un exemple concret des effets positifs et négatifs de l'intégration des technologies. Dans ce secteur, les outils faisant appel à la technologie (alliance de l'IA et de la fabrication additive, par exemple) induisent déjà une transformation des flux de travail et une hausse des marges bénéficiaires dans de nombreuses entreprises, grâce à une amélioration substantielle de leur productivité et de leur efficacité. Toutefois, en élargissant le tableau, on constate que cette évolution pourrait avoir des répercussions négatives sur le long terme. Il est probable, par exemple, que l'automatisation du travail conduira au remplacement de nombreux travailleurs peu qualifiés et à l'augmentation de la demande en travailleurs hautement qualifiés, et qu'elle favorisera une plus grande concentration du marché, ce qui aura pour effet de renforcer encore le pouvoir des grands acteurs de l'industrie¹⁴¹.

Les responsables militaires s'appuient déjà sur l'IA pour prendre des décisions critiques en temps réel dans divers scénarios opérationnels, celle-ci facilitant une prise de décision rapide pilotée par la donnée. Pour autant, la technologie utilisée dans les solutions d'IA reste imparfaite (en raison des biais algorithmiques, par exemple) et c'est pourquoi les forces armées des Alliés exigent que les humains restent « dans la boucle » lorsqu'il s'agit de prendre des décisions. Une dépendance excessive des mécanismes décisionnels à l'égard de l'IA pourrait avoir des conséquences majeures imprévisibles en termes d'escalade sur le champ de bataille. Les acteurs de l'industrie s'emploient à atténuer ces risques en s'appuyant sur des approches de conception centrées sur l'humain, mais il reste nécessaire de réfléchir aux vulnérabilités qui pourraient apparaître sur le long terme.

Rôle du secteur privé

Le secteur privé occupe une position de plus en plus dominante dans le paysage économique et géopolitique mondial, les solutions technologiques qu'il fournit devenant incontournables pour ceux qui veulent rester compétitifs dans ce monde imprévisible où les chocs politiques et économiques se font de plus en plus fréquents. S'appuyer sur l'industrie pour obtenir les outils nécessaires à la mise en œuvre d'initiatives aussi indispensables que la transformation numérique ou la priorisation de la durabilité dans les activités commerciales, est sans le moindre doute une nécessité. Par

ailleurs, de nombreux pays n'ont pas d'autre option pour réduire leur dépendance à l'égard des États qui instrumentalisent leur contrôle sur les approvisionnements énergétiques. Pour ces pays, le secteur privé jouera un rôle essentiel dans la réalisation de leurs objectifs à long terme de résilience économique et de sécurité nationale.

Toutefois, le fait de dépendre d'entités privées n'est pas sans risque. Même dans le domaine de la défense, l'innovation est passée des mains des pouvoirs publics à celles des grandes entreprises du secteur privé. Or, puisque les décideurs politiques, les décideurs militaires et de nombreux chefs d'entreprise et autres acteurs accordent de plus en plus d'importance au fait d'obtenir ou de conserver l'avantage technologique, la dépendance mondiale à l'égard des leaders de l'industrie ne va faire que s'accroître. Il importe, par conséquent, d'envisager ce qu'il pourrait se passer si des entités guidées par l'appât du gain recouraient à des pratiques coercitives pour augmenter encore la dépendance à l'égard de leurs produits et services, et de réfléchir aux mesures à prendre dans pareil scénario.

Certains pays ont cherché à atténuer les risques découlant de la combinaison d'une dépendance excessive à l'égard du secteur privé et de la faiblesse des cadres réglementaires, notamment en tentant de mettre un frein à la circulation incontrôlée des technologies émergentes. Pourtant, même des acteurs comme l'Union européenne, qui a lancé de multiples initiatives visant à préserver les économies et les citoyens de ses États membres des effets néfastes des grandes entreprises technologiques ou autres, éprouvent des difficultés à suivre, sur le plan de la réglementation, le rythme effréné des progrès scientifiques et technologiques. Il ne faut pas non plus oublier que de nombreux pays dans le monde continuent d'offrir un environnement fiscal favorable aux entités privées sans appliquer, en parallèle, les mesures nécessaires pour réglementer les pratiques préjudiciables.

Interopérabilité

L'intégration des technologies dans le domaine militaire est source à la fois de défis et d'opportunités. Les forces armées sont confrontées depuis longtemps à des problèmes d'interopérabilité, notamment quand il s'agit d'associer de nouveaux systèmes à des systèmes d'ancienne génération ou des systèmes de faible technologie à des systèmes de haute technologie, mais la situation est encore plus compliquée aujourd'hui compte tenu du rythme effréné auquel la technologie et ses applications potentielles évoluent désormais. Certains experts insistent par ailleurs sur le fait que la haute technologie ne doit pas être considérée comme un substitut au volume

Le secteur privé occupe une position de plus en plus dominante dans le paysage économique et géopolitique mondial.

des capacités et que, dans certains cas, il suffit de disposer d'un nombre adéquat de capacités de faible technologie pour atteindre les objectifs du champ de bataille¹⁴². Cette idée transparait également dans certaines politiques récentes, telles que l'initiative « Replicator » du département de la Défense des États-Unis, laquelle vise l'acquisition de milliers de systèmes autonomes peu onéreux (c'est-à-dire à usage unique) pouvant être adoptés et déployés (mais aussi remplacés) rapidement¹⁴³.

Pour les forces militaires de l'OTAN, l'interopérabilité est un élément plus crucial que jamais. En effet, la sécurité de l'Alliance dépend de la capacité des forces armées des 32 pays membres à s'exercer, à s'entraîner et à combattre ensemble. Si le fait de pouvoir compter sur des forces et des capacités diverses constitue sans aucun doute un avantage pour les Alliés et les partenaires, l'adoption croissante des technologies est source de défis en matière d'interopérabilité, car les armées fonctionnent selon des approches et des calendriers différents. Il n'en reste pas moins que l'intégration de la technologie aura des effets

positifs. Grâce à l'essor de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée ou des « métasphères », par exemple, les militaires peuvent désormais suivre des entraînements en temps réel basés sur des scénarios plus réalistes. Associés à des techniques de modélisation et de simulation toujours plus avancées, ces technologies pourraient révolutionner l'avenir de l'entraînement militaire et favoriser l'accès aux entraînements synthétiques multisites, qui permettent aux soldats de s'immerger dans des environnements d'entraînement en réalité virtuelle ou en réalité mixte très réalistes. Toutefois, parvenir à intégrer les technologies nouvelles ou émergentes tant aux systèmes d'ancienne génération qu'aux systèmes des autres Alliés et des pays partenaires tout en assurant l'interopérabilité constituera l'un des grands défis des vingt prochaines années. Si les disparités techniques entre Alliés donnaient lieu à des disparités dans les concepts d'opération, l'interopérabilité à l'échelle de l'Alliance pourrait s'en trouver gravement compromise.

Supériorité informationnelle

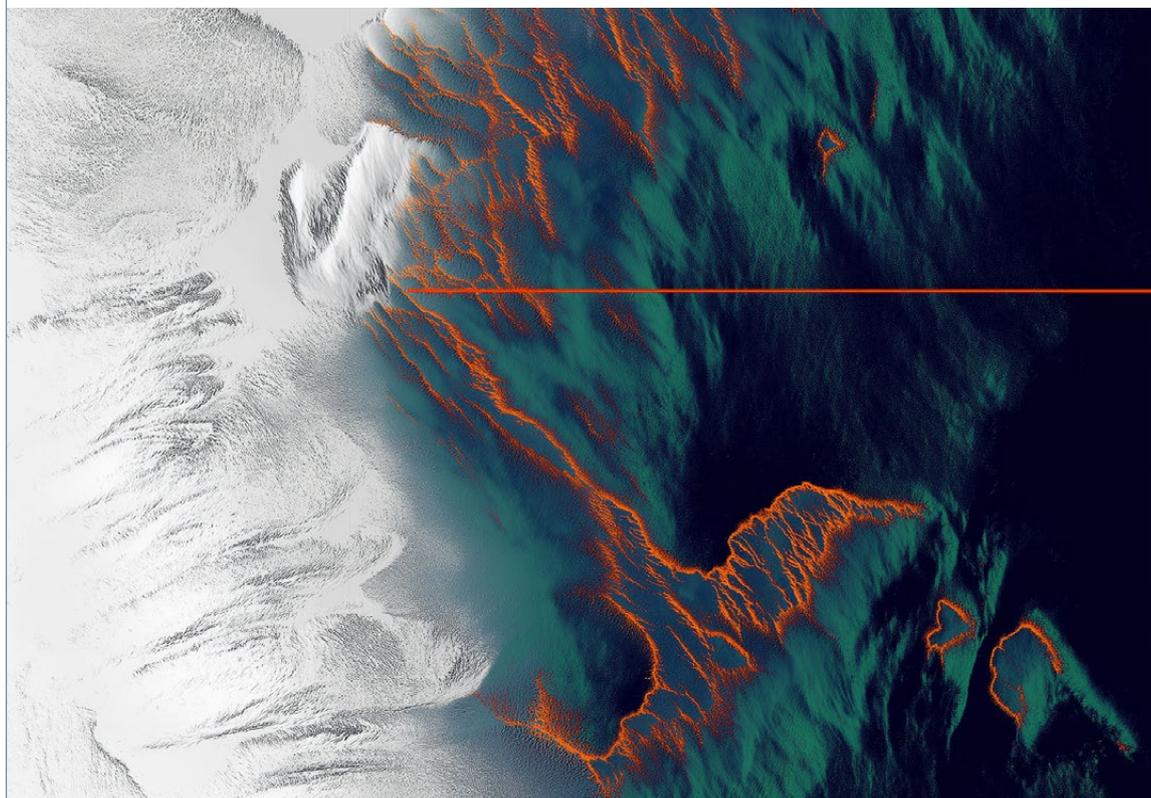
L'accélération des investissements dans la technologie et le recours croissant à la guerre électronique ont fait de la supériorité informationnelle un facteur plus déterminant que jamais dans le contexte de défense actuel. Compte tenu du rôle joué par la donnée dans la guerre cognitive, la guerre électronique et la guerre conventionnelle, les forces armées seront de plus en plus tributaires de la technologie des capteurs au cours des vingt prochaines années¹⁴⁴. L'importance que les dirigeants militaires accordent à la supériorité informationnelle a déjà donné lieu à une hausse substantielle des investissements dans le domaine des capteurs avancés et des capteurs en réseau¹⁴⁵, et la demande devrait continuer d'augmenter. La guerre de demain fera la part belle aux capteurs avancés, capables de fournir en un temps record des informations plus précises – grâce à la collecte en temps réel de données, notamment d'images haute résolution – et d'assurer une surveillance plus complète et plus précise. À elle seule, la technologie des capteurs avancés confèrera aux forces armées davantage de souplesse en mission, leur permettra d'allouer plus efficacement leurs ressources et accroîtra la résilience de leurs systèmes de communication. Associées à des outils comme l'IA, les futures capacités de détection permettront également d'obtenir des renseignements critiques grâce au traitement avancé de données ainsi qu'à l'analyse et à la reconnaissance des formes.

Toutefois, l'hypernumérisation et l'hyperconnexion de l'espace de bataille sont également porteuses de vulnérabilités et de risques. Par exemple, le recours croissant à des systèmes militaires complexes reposant en très large partie sur des technologies spatiales pour l'accès à des informations



essentielles et à durée de vie critique pourrait avoir des conséquences catastrophiques si l'accès à l'espace et aux satellites venait à être dégradé¹⁴⁶. Notons que ces risques concernent également le monde civil, car les réseaux utilisés par les infrastructures critiques sont également vulnérables face à ce type de perturbations. Comme indiqué dans la grande tendance n° 1, l'espace pourrait devenir le théâtre d'une conflictualité plus marquée dans les années à venir.

En outre, les moyens persistants de renseignement, de surveillance et de reconnaissance généreront des quantités de données si colossales que celles-ci pourraient en devenir difficiles à traiter et à interpréter ; les systèmes pourraient même s'en trouver saturés, empêchant ainsi l'information de circuler. Quoi qu'il en soit, cela limiterait l'avantage décisionnel que la technologie peut apporter à un commandant sur le terrain, quand bien même les informations auraient été collectées.



6.4 Pistes de réflexion pour les dirigeants

Comprendre les avantages et les risques associés aux technologies, notamment en termes de convergence et d'intégration, permettra aux hauts dirigeants de prendre des décisions éclairées concernant les applications nécessaires de la science et de la technologie dans les domaines civil et militaire. Il leur faudra notamment tenir compte des effets à long terme des technologies sur les individus, la société, l'économie et les forces armées, des risques de dépendances critiques (à l'égard des technologies et des acteurs commerciaux) ainsi que des disparités probables entre Alliés et entre Alliés et pays partenaires s'agissant de l'utilisation et de la réglementation des technologies. En surveillant de près ces effets, les décideurs seront à même de prendre aujourd'hui les mesures qui prépareront l'OTAN aux scénarios de demain.

Les dirigeants gagneraient également à mieux appréhender la manière dont leurs adversaires et

concurrents exploitent et combinent les nouvelles technologies. Ils seraient ainsi en mesure de mieux comprendre comment la science et la technologie peuvent être utilisées pour obtenir un avantage stratégique, opérationnel ou tactique.

Au moment d'évaluer les risques et les opportunités offerts par la poursuite de l'intégration des technologies, il importera que les décideurs politiques et militaires consultent des représentants des milieux de la science et de la technologie et de la recherche-développement ainsi que des partenaires de confiance du secteur privé. Recueillir cette expertise interdisciplinaire ne suffira toutefois pas : les dirigeants devront également veiller à la mise en place d'une réglementation et de garde-fous, qui permettront aux citoyens et aux combattants des pays de l'Alliance de tirer le meilleur parti possible des progrès technologiques futurs tout en restant résilients face aux chocs catastrophiques qui pourraient se produire.

Conclusions

Les tendances sociotechniques décrites dans le présent document sont appelées à façonner le paysage stratégique de la science et de la technologie au cours des vingt prochaines années. Elles auront évidemment une incidence sur la collaboration et la recherche scientifiques, mais également sur les options s'offrant aux instances politiques des Alliés, sur les capacités de défense et les opérations militaires de l'Alliance, ainsi que sur les fonctions de l'entreprise OTAN.

La science et la technologie jouant un rôle essentiel dans la réalisation des objectifs tant politiques que militaires, une meilleure compréhension des interdépendances à l'œuvre permettra à l'OTAN d'être mieux préparée et moins susceptible de se laisser surprendre sur le plan stratégique. Les dirigeants des pays de l'Alliance trouveront dans la présente analyse, qui s'appuie sur des données probantes, toute une série de pistes de réflexion sur la manière de relever les grands enjeux militaires et politiques de demain.

En passant en revue les interactions entre les avancées scientifiques et technologiques et l'économie, la géopolitique et la société, le présent rapport donne des éléments de contexte utiles pour comprendre le monde d'aujourd'hui et anticiper

celui qui nous attend. C'est toutefois aux dirigeants qu'il revient de prendre les décisions qui s'imposent pour préparer l'avenir.

Si certaines tendances se dessinent déjà, d'autres mettront du temps à se confirmer. Quoiqu'il en soit, les décisions que les dirigeants prennent aujourd'hui auront, sur les pays de l'OTAN et sur leurs citoyens, des répercussions qui se feront sentir pendant de nombreuses années. Il sera essentiel d'analyser soigneusement tous les scénarios possibles et leurs incidences probables pour faire en sorte que l'Alliance conserve sa capacité d'action et de réaction au fur et à mesure de l'évolution de ces tendances. Le volume II du présent rapport, qui est classifié, contient, à l'intention des dirigeants des pays de l'OTAN, des recommandations au sujet des solutions scientifiques et technologiques dont l'Alliance aura besoin pour se donner les moyens de faire la guerre.

Les choix qui seront opérés sur la base des options exposées dans les volumes I et II du présent rapport détermineront le niveau de préparation que l'OTAN et les Alliés atteindront pour faire face aux défis du futur ainsi que leur capacité à tirer parti des solutions scientifiques et technologiques.

Abréviations

ACT – Commandement Allié Transformation

ADN – Acide désoxyribonucléique

BioE3 – Biotechnologie au service de l'économie, de l'environnement et de l'emploi

BRICS – Brésil, Russie, Inde, Chine, Afrique du Sud (formellement la république fédérative du Brésil, la fédération de Russie, la république de l'Inde, la république populaire de Chine et la République d'Afrique du Sud ; au mois de mars 2025 sont aussi membres du BRICS la république arabe d'Égypte, la république démocratique fédérale d'Éthiopie, la république islamique d'Iran et les Émirats arabes unis)

CBRN – Agents chimiques, biologiques, radiologiques et nucléaires

CRISPR – *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*

C2 – Commandement et contrôle

GPS – *Global Positioning System* : Système mondial de positionnement ou Géo-positionnement par satellite

IA – Intelligence artificielle

ISR – *Intelligence, surveillance, and reconnaissance* : Renseignement, surveillance et reconnaissance

ITPP – *Individually Tailored Partnership Programme* : Programme de partenariat individualisé

LLM – *Large Language Model* : Grand modèle de langage

NCIA – *NATO Communications and Information Agency* : Agence OTAN d'information et de communication

OTAN - Organisation du traité de l'Atlantique nord

PIB – Produit intérieur brut

PNT – *Positioning, navigation, and timing* : positionnement, navigation et synchronisation

PRU – *Principles of responsible use* : Principes d'utilisation responsable

R&D – Recherche et développement

SPS – *NATO Science for Peace and Security Programme* : Programme OTAN pour la science au service de la paix et de la sécurité

STO – *NATO Science & Technology Organization* : Organisation OTAN pour la science et la technologie

S&T – Science et technologie

Méthode

Le présent rapport a été rédigé sur la base :

- d'une analyse des programmes de travail de la STO, y compris de ses groupes de recherche, ainsi que de fiches de veille technologique et de récentes publications de la STO ;
- d'une analyse des résultats de plusieurs enquêtes menées auprès du réseau d'experts de la STO par le Bureau du conseiller scientifique de l'OTAN ;
- d'un travail de recherche et d'analyse de sources ouvertes, et notamment de l'examen thématique :

- d'un large éventail de documents stratégiques nationaux,
- d'analyses de prospective stratégique
- et de rapports de think tanks,

mené par le personnel du Bureau du conseiller scientifique, notamment à l'aide d'outils d'IA.

En outre, des analyses de tendances ont été réalisées avec le concours des participants aux ateliers « Science & Technology Trends Workshop » et « Young Voices Workshop » en 2024.

Contributeurs

Jordan Sweeney, Daniel Bayliss, Fiona Butcher, Salvatore Calabro, Lucas Cox, Georgiana Dragomir, Ulf Ehlert, Alvaro Martin-Blanco, Sascha Simon

Remerciements

La présente publication n'aurait pas vu le jour sans les précieuses contributions des membres du réseau d'experts de l'Organisation OTAN pour la science et la technologie et des organisations et bureaux mentionnés ci-après.

Centre for European Reform (CER)

Defence Science and Technology Laboratory (Dstl)

Organisation européenne pour la cybersécurité (ECSSO)

Agence européenne de défense (AED)

Centre commun de recherche (JRC) de la Commission européenne

Institut Fraunhofer

German Marshall Fund of the United States, *bureau de Bruxelles*

Ministère de la Défense du Japon, Département de la stratégie technologique, Agence pour les acquisitions, la technologie et la logistique (ATLA)

Leonardo S.p.A.

Commandement Allié Transformation (ACT)

Centre OTAN pour la recherche et l'expérimentation maritimes (CMRE) :

État-major militaire international de l'OTAN, *Cabinet de la présidence du Comité militaire*

Secrétariat international de l'OTAN, *Division Politique et plans de défense*

Secrétariat international de l'OTAN, *Division Innovation, hybride et cyber*

Bureau du secrétaire général de l'OTAN, *Unité Analyse de politique générale*

Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée (TNO)

Centre norvégien de recherche pour la défense (FFI)

Institut des technologies de l'armée de l'air polonaise

Université militaire polonaise des forces terrestres

PricewaterhouseCoopers

Agence suédoise de recherche de défense (FOI)

Institut von Karman de dynamique des fluides

Production

Rédaction et conception par Studio Miko : Phoebe Barker, Laurence Denmark, Martha Howlett, George Messer, Alistair Millen

Bibliographie

1. NATO, *2022 Strategic Concept*, Jun 2022. Available: https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2022/6/pdf/290622-strategic-concept.pdf
2. The United States Space Force. *The Case for Change: Optimizing for Great Power Competition*, Feb 2024. Available: https://www.af.mil/Portals/1/documents/2024SAF/GPC/USSF_Case_for_Change.pdf
3. T. F. Lynch. "Strategic Assessment 2020," *National Defence University Press*, Nov 2020. Available: <https://ndupress.ndu.edu/Media/News/News-Article-View/Article/2404286/>
4. Lawfare. (2024, Sep. 20). *Could AI Lead to the Escalation of Conflict? PRSC Scholars Think So* [Online]. Available: <https://www.lawfaremedia.org/article/could-ai-lead-to-the-escalation-of-conflict--prc-scholars-think-so>
5. NATO 2022 Strategic Concept (n. 1)
6. The Economist. (2024, Jun 13). *How worrying is the rapid rise of Chinese science?* [Online]. Available: <https://www.economist.com/leaders/2024/06/13/how-worrying-is-the-rapid-rise-of-chinese-science>
7. United Nations. "Outer Space Becoming Contested Domain for Supremacy with Space-Based Communications, Intelligence Assets, Anti-Satellite Weapons," *Presented at UN General Assembly, First Committee*, 2023 [Meeting minutes]. Available: <https://press.un.org/en/2023/gadis3722.doc.htm>
8. United States Space Force (n. 2)
9. Fact Sheet: Space Weapons, *Center for Arms Control and Non-Proliferation*, Nov 2023. Available: <https://armscontrolcenter.org/fact-sheet-space-weapons/>
10. D. Francis, et al. (2023), *Journal of the British Interplanetary Society (JBIS)*, vol. 76, pp. 389-400. Available: <https://bis-space.com/shop/product/jbis-076-11-0389/>
11. NATO Allied Command Transformation (ACT), *First Allied Foresight Conference: Conference Summary*. Available: https://www.act.nato.int/wp-content/uploads/2024/08/AFC_HelsinkiSummaryReport_FINAL.pdf
12. Press Statement. (2022, May 10). *Attribution of Russia's Malicious Cyber Activity Against Ukraine* [Online]. Available: <https://www.state.gov/attribution-of-russias-malicious-cyber-activity-against-ukraine/>
13. C. Mills, 13 Nov 2023, *Emerging and disruptive defence technologies*. House of Commons Library. <https://researchbriefings.files.parliament.uk/documents/CBP-9184/CBP-9184.pdf>
14. NATO Allied Command Transformation (ACT), *Multi-Domain operations in NATO – Explained*, Oct 2023. Available: <https://www.act.nato.int/article/mdo-in-nato-explained/>
15. The Economist. (2023, Feb. 8). *The history and limits of America's favourite new economic weapon* [Online]. Available: <https://www.economist.com/united-states/2023/02/08/the-history-and-limits-of-americas-favourite-new-economic-weapon>
16. E. Höra, S. Weiss, "The New Geo-Economic Instruments of the European Union," *Bertelsmann Stiftung, Gütersloh*, Apr 2024. Available: <https://www.bertelsmann-stiftung.de/en/our-projects/sovereign-europe/project-news/the-new-geo-economic-instruments-of-the-european-union>
17. Chatham House. (2023, May 18) *Five priorities for G7 to strengthen economic security* [Online]. Available: <https://www.chathamhouse.org/2023/05/five-priorities-g7-strengthen-economic-security>
18. *European Journal of International Law*. (2023, Jun. 22). *The G7's Fear of Economic Coercion through Weaponised Interdependence – Geopolitical Competition Cloaked in International Law?* [Online]. Available: <https://www.ejiltalk.org/the-g7s-fear-of-economic-coercion-through-weaponised-interdependence-geopolitical-competition-cloaked-in-international-law/>
19. A. Searight. "Expanding the US-Japan economic security partnership: Engaging allies and partners," *Atlantic Council*, Sep 2024. Available: <https://www.atlanticcouncil.org/in-depth-research-reports/issue-brief/expanding-the-us-japan-economic-security-partnership-engaging-allies-and-partners/>
20. G. P. Heard, "Great Power Competition and Europe," *Journal of European Security and Defense Issues*, vol. 10, issue 3 (2020). Available: https://www.marshallcenter.org/sites/default/files/files/2020-10/pC_V10N3_en.pdf
21. F. Hill, et al. "Balancing act: Major powers and the global response to US-China great power competition," *Brookings Institution*, Jul 2020. Available: <https://www.brookings.edu/articles/balancing-act-major-powers-and-the-global-response-to-us-china-great-power-competition/>
22. E. Hogan, S. Patrick. "A Closer Look at the Global South," *Carnegie Endowment for International Peace*, May 2024. Available: <https://carnegieendowment.org/research/2024/05/global-south-colonialism-imperialism?lang=en>
23. P. Parameswaran, "Rising Global South Discontent Amid Strategic Competition in the Indo-Pacific and Beyond," *Wilson Center*, Aug 2024. Available: <https://www.wilsoncenter.org/article/rising-global-south-discontent-amid-strategic-competition-indo-pacific-and-beyond>
24. Government of Canada, *Policy Horizons Canada. Disruptions on the Horizon: 2024 report*. Available: https://horizons.service.canada.ca/en/2024/disruptions/Disruptions_on_the_Horizon_2024_report.pdf
25. Organisation for Economic Co-operation and Development, *Space Economy*. Available: <https://www.oecd.org/en/topics/policy-issues/space-economy.html>
26. M. D. Ziegler, et al. "Back to the Future: A Refresh of Future Scenarios for Project Evergreen Strategic Foresight Activities," *RAND Corporation*, Aug 2024. Available: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA2992-1.html
27. University of Exeter. (2024, Jul. 10). *Greater focus needed on how existing international law can prevent the increasing militarization of outer space* [Online]. Available: <https://www.sciencedaily.com/releases/2024/07/240710131005.htm>
28. Information Technology & Innovation Foundation (ITIF). (2023, Jan. 23). *Wake Up, America: China Is Overtaking the United States in Innovation Capacity* [Online]. Available: <https://itif.org/publications/2023/01/23/wake-up-america-china-is-overtaking-the-united-states-in-innovation-capacity/>
29. Nobel Prizes 2024: Chemistry. Available: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2024/summary/>
30. Nobel Prizes 2024: Physics. Available: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2024/summary/>
31. Goldman Sachs. (2024, Mar. 13). *AI i showing "very positive" signs of eventually boosting GDP and productivity* [Online]. Available: <https://www.goldmansachs.com/insights/articles/AI-is-showing-very-positive-signs-of-boosting-gdp>
32. M. Neil Baily, A. T. Kane. "How will AI affect productivity?," *Brookings Institution*, May 2024. Available: <https://www.brookings.edu/articles/how-will-ai-affect-productivity/>
33. Tech UK. (2024, Jun. 7). *The role of AI and automation in transforming digital business landscapes* [Online]. Available: <https://www.techuk.org/resource/the-role-of-ai-and-automation-in-transforming-digital-business-landscapes.html>

34. Army Recognition. (2024, Jun. 26). *Integration of AI on the Modern Battlefield: Insights from the Ukraine War* [Online]. Available: <https://armyrecognition.com/news/army-news/army-news-2024/integration-of-ai-on-the-modern-battlefield-insights-from-the-ukraine-war>
35. Forbes. (2024, Oct. 16). *22 Top AI Statistics And Trends In 2024* [Online]. Available: <https://www.forbes.com/advisor/business/ai-statistics/>
36. McKinsey & Company, "The state of AI in early 2024: Gen AI adoption spikes and starts to generate value," [Online], May 2024. Available: <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai>
37. World Economic Forum. (2024, Jun. 3). *Explainer: What is quantum technology and what are its benefits?* [Online]. Available: <https://www.weforum.org/agenda/2024/07/explainer-what-is-quantum-technology/>
38. New Scientist. (2024, Sep. 30). *Useful quantum computers are edging closer with recent milestones* [Online]. Available: <https://www.newscientist.com/article/2450065-useful-quantum-computers-are-edging-closer-with-recent-milestones/>
39. McKinsey & Company (n. 36)
40. World Economic Forum (n. 37)
41. S. Shivakumar, et al. "Investing in Science and Technology: The United States Needs to Up Its Game" *Center for Strategic International Studies (CSIS)*, Jun 2024. Available: <https://www.csis.org/analysis/investing-science-and-technology>
42. D. F. Reding, et al. "Science & Technology Trends Report: 2023-2043," *NATO Science & Technology Organization (STO)*, vol. 1, Mar 2023. Available: https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2023/3/pdf/stt23-vol1.pdf
43. National Science Foundation (NSF). *Science & Engineering Indicators: The State of U.S. Science and Engineering 2024* [Online]. Available: <https://ncses.nsf.gov/pubs/nsb20243/discovery-u-s-and-global-r-d#global-r-d>
44. OECD Main Science and Technology Indicators (MSTI database). Available: <https://data-viewer.oecd.org/?chartId=80feaac0-9eac-4307-a324-921e8e1b9f70>
45. National Science Foundation (n. 43)
46. Information Technology & Innovation Foundation (n. 28)
47. Techopedia. (2024, Oct. 28). *Top 10 Countries Leading in AI Research & Technology in 2024* [Online]. Available: <https://www.techopedia.com/top-10-countries-leading-in-ai-research-technology>
48. Macro Polo, Paulson Institute. (2024). *The Global AI Talent Tracker 2.0* [Online]. Available: <https://macropolo.org/digital-projects/the-global-ai-talent-tracker/>
49. D. Peterson, et al. "Assessing China's AI Workforce: Regional, Military, and Surveillance Geographic Job Clusters," *Center for Security and Emerging Technology (CSET)*, Nov 2023. Available: <https://cset.georgetown.edu/wp-content/uploads/CSET-Assessing-Chinas-AI-Workforce.pdf>
50. Center for Security and Emerging Technology (n. 49)
51. O. J. Daniels. "CSET Analyses of China's Technology Policies and Ecosystem: The PRC's Domestic Approach," *Center for Security and Emerging Technology (CSET)*, Sep 2023. Available: https://cset.georgetown.edu/wp-content/uploads/20230035_The-PRCs-Domestic-Approach.pdf
52. B. K. Williams. "The Innovation Race: US-China Science and Technology Competition and the Quantum Revolution," *Wilson Center*, Oct 2023. Available: https://www.wilsoncenter.org/sites/default/files/media/uploads/documents/Williams_2022-23%20Wilson%20China%20Fellowship_Understanding%20China%20Amid%20Change%20and%20Competition.pdf
53. CXO Today. (2024, Feb. 20). *Quantum Computing: It's Us vs China* [Online]. Available: https://cxotoday.com/news-analysis/quantum-computing-its-us-vs-china/#google_vignette
54. The Economist. (2024, Jun. 13). *How worrying is the rapid rise of Chinese science?* [Online]. Available: <https://www.economist.com/leaders/2024/06/13/how-worrying-is-the-rapid-rise-of-chinese-science>
55. G. Bailey, et al., "Eyes on the Future - Signals from recent reports on emerging technologies and breakthrough innovations to support European Innovation Council strategic intelligence," *European Commission Joint Research Centre (JRC)*, vol. 1, Jun 2024. Available: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC137811>
56. Tech Bullion. (2024, Jul. 1). *Innovative Biotech Breakthroughs: A Closer Look at the Future of Medicine* [Online]. Available: <https://techbullion.com/innovative-biotech-breakthroughs-a-closer-look-at-the-future-of-medicine/>
57. T. Anwar, "The Future of Bioinformatics: Building Expertise for Data-Driven Discovery", *Centre of Bioinformatics Research & Technology (CBIRT)*, Nov 2024. Available: <https://cbirt.net/the-future-of-bioinformatics-building-expertise-for-data-driven-discovery/>
58. NATO Science & Technology Organization (n. 42)
59. R. Manickam, et al. (2022, December). "Nanotechnology-Enabled Biosensors: A Review of Fundamentals, Design Principles, Materials, and Applications" *Biosensors 2023* [Online]. vol. 13, issue 40. Available: <https://doi.org/10.3390/bios13010040>
60. McKinsey & Company, *The future of biotech: AI-driven drug discovery*. November 2022. Available: <https://www.mckinsey.com/-/media/mckinsey/featured%20insights/the%20next%20normal/the-future-of-biotech-ai-driven-drug-discovery.pdf>
61. Bio News. (2024, Apr. 26). *U.S. biotech leadership is rooted in strong IP protection* [Online]. Available: <https://bio.news/federal-policy/ip-biotech-world-intellectual-property-day-leadership-innovation/>
62. McKinsey & Company (n. 60)
63. SynBio Beta. (2024, Jun. 3). *The Ethics Of Accessibility: Who Controls The Power In Synthetic Biology?* [Online]. Available: <https://www.synbiobeta.com/read/the-ethics-of-accessibility-who-controls-the-power-in-synthetic-biology>
64. University of Bristol. (2024, Jul. 8). *Improving safety of AI research for engineering biology* [Online]. Available: <https://www.bristol.ac.uk/news/2024/july/improving-safety-of-ai-research-for-engineering-biology.html>
65. Imperial College London. (2024, 12 Nov). *£1m to advance MintNeuro's transformative semiconductor tech for neural implants* [Online]. Available: <https://www.imperial.ac.uk/news/258194/1m-advance-mintneuro-transformative-semiconductor-tech/>
66. BBC Research. "Synthetic Biology: Global Markets", *BBC Publishing*, Aug 2024. Available: <https://www.bccresearch.com/market-research/biotechnology/synthetic-biology-global-markets.html>
67. National Intelligence Council. "Global Trends 2040: The Future of Biotech." *Office of the Director of National Intelligence*, Apr 2021. Available: <https://www.dni.gov/index.php/gt2040-home/gt2040-deeper-looks/future-of-biotech>
68. T. Dong, et al. (2024, July). "Advances in heart failure monitoring: Biosensors targeting molecular markers in peripheral bio-fluids," *Biosens Bioelectron* [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38569250/>
69. T. A. Bruce-Tagoe, et al. (2024, July). "Advances in aptamer-based biosensors for monitoring foodborne pathogens." *J Food Sci Technology*. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38910921/>
70. R. da Fonseca Alves, et al. (2024, July) "Peptide-based biosensing approaches for targeting breast cancer-derived exosomes," *Biosens Bioelectron*. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38537428/>
71. S. Bisht, et al. (2024, May). "Examining the Intersection of Artificial Intelligence and Biosensors in Healthcare: Complex Neurodegenerative Issues," *2024 4th International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)*, pp.1004-1007. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10617197>

72. A. Goswami, et al., "Review – Nanotechnology-Based Biosensors for Biomedical Applications." *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 171, n. 9, Sep 2024. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1945-7111/ad7908>
73. Biosensors 2023 (n. 59)
74. Tech Story. (2024, Jun. 26). *Ex-Meta Scientists Launch Evolutionary Scale with \$142M Investment to Unveil Next-Gen AI Model for Protein Design* [Online]. Available: <https://techstory.in/ex-meta-scientists-launch-evolutionaryscale-with-142m-investment-to-unveil-next-gen-ai-model-for-protein-design/>
75. Investopedia. (2024, Jul. 25). *Why Drugmaker Eli Lilly Is Partnering With ChatGPT Maker OpenAI* [Online]. Available: <https://www.investopedia.com/why-drugmaker-eli-lilly-is-partnering-with-chatgpt-maker-openai-8668887>
76. J. Barton, S. Patrick, Mitigating Risks from Gene Editing and Synthetic Biology: Global Governance Priorities. *Carnegie Endowment for International Peace*, Oct 2024. Available: <https://carnegieendowment.org/research/2024/10/mitigating-risks-from-gene-editing-and-synthetic-biology-global-governance-priorities?lang=en>
77. Hastings Center. (2024, Apr. 16). *How to Avoid a Genetic Arms Race* [Online]. Available: <https://www.thehastingscenter.org/how-to-avoid-a-genetic-arms-race/>
78. Tina Wünn, Exploring AI-Biosecurity Governance in the Global South, 5 Dec 2024, Nuclear Threat Initiative (NTI). Available: <https://www.nti.org/atomic-pulse/exploring-ai-biosecurity-governance-in-the-global-south/>
79. University of Bristol. (2024, Jul. 8). *Improving safety of AI research for engineering biology* [Online]. Available: <https://www.bristol.ac.uk/news/2024/july/improving-safety-of-ai-research-for-engineering-biology.html>
80. University of Bristol (n. 79)
81. J. Golblat. "The Biological Weapons Convention: An overview," *International Review of the Red Cross*, Jun 1997. Available: <https://international-review.icrc.org/articles/biological-weapons-convention-overview>
82. M. Chui, et al. "The Bio Revolution: Innovations transforming economies, societies, and our lives," *McKinsey & Company*, May 2020. Available: <https://www.mckinsey.com/industries/life-sciences/our-insights/the-bio-revolution-innovations-transforming-economies-societies-and-our-lives>
83. Fed Scoop. (2024, Jun. 24). *DHS releases AI chemical safety recommendations, building off voluntary White House pledges* [Online]. Available: <https://fedscoop.com/dhs-releases-ai-chemical-safety-recommendations-building-off-voluntary-white-house-pledges/>
84. C. Mora, et al. (2022, February) "Over half of known human pathogenic diseases can be aggravated by climate change," *Nat. Clim. Chang.* issue 12, pp. 869–875. Available: <https://www.nature.com/articles/s41558-022-01426-1>
85. Government of Canada, Policy Horizons Canada (n. 24)
86. S. Shivakumar, et al. "Understanding the U.S. Biopharmaceutical Innovation Ecosystem," Center for Strategic International Studies (CSIS), Aug 2024. Available: <https://www.csis.org/analysis/understanding-us-biopharmaceutical-innovation-ecosystem>
87. McKinsey & Company. *The UK biotech sector: The path to global leadership* [Online]. Available: <https://www.mckinsey.com/industries/life-sciences/our-insights/the-uk-biotech-sector-the-path-to-global-leadership>
88. UK Government. (2024, Jul. 11). *Life sciences competitiveness indicators 2024: summary* [Online]. Available: <https://www.gov.uk/government/publications/life-sciences-sector-data-2024/life-sciences-competitiveness-indicators-2024-summary>
89. Life sciences: Super Clusters for Global Britain and Northern Ireland. 2022. Northern Health Science Alliance (nhsa); MedCity; Health Innovation Research Alliance (Hirani). Available: <https://www.medcityhq.com/wp-content/uploads/2022/02/Life-sciences-Super-Clusters-for-Global-Britain-and-Northern-Ireland.pdf>
90. Chem Xpert. (2024, Oct. 1). *The Pharmaceutical Industry In Germany: Its Present & Future* [Online]. Available: <https://chemxpert.com/blog/the-pharmaceutical-industry-in-germany>
91. Dr Ernst-Dieter Jarasch, et al. *Drug Discovery and Biotechnology in Germany*, PricewaterhouseCoopers and the Council of German BioRegions. May 2009. Available: <https://www.pwc.com/gx/en/pharma-life-sciences/pdf/pwc-drug-discovery.pdf>
92. Federal Council of the Swiss Confederation. (2024, May 8). *Record funding for Swiss biotechnology* [Online]. Available: <https://www.kmu.admin.ch/kmu/en/home/New/news/2024/record-funding-for-swiss-biotechnology.html>
93. Australian Strategic Policy Institute (ASPI), Critical Technology Tracker. Available: <https://techtracker.aspi.org.au/>
94. European Commission, Joint Research Centre (JRC). (2024, Mar. 20). *The global landscape of biotech innovation: state of play* [Online]. Available: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/global-landscape-biotech-innovation-state-play-2024-03-20_en
95. Center for Security and Emerging Technology (CSET). *Translation of: Outline of the People's Republic of China 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development and Long-Range Objectives for 2035* [Online]. Available: https://cset.georgetown.edu/wp-content/uploads/t0284_14th_Five_Year_Plan_EN.pdf
96. S. Barbosu. "How Innovative Is China in Biotechnology?" *Information Technology & Innovation Foundation (ITIF)*, Jul 2024. Available: <https://itif.org/publications/2024/07/30/how-innovative-is-china-in-biotechnology/>
97. *Government of India, Ministry of Science & Technology, Department of Biotechnology*. Available: <https://dbtindia.gov.in/news-features/cabinet-approves-bioe3-biotechnology-economy-environment-and-employment-policy>
98. M. Knutzen. "Synthetic Bioweapons Are Coming," U.S. Naval Institute, Jun 2021. Available: <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2021/june/synthetic-bioweapons-are-coming>
99. Carnegie Endowment for International Peace (n. 76)
100. U.S. Naval Institute (n. 98)
101. NATO, *Summary of Summary of NATO's Biotechnology and Human Enhancement Technologies Strategy*, Apr 2024. Available: https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_224669.htm
102. NATO, *Summary of NATO's revised Artificial Intelligence (AI) strategy*, Jul 2024. Available: https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_227237.htm
103. S. Macartney. "Biological threats have evolved for the worse, and we are not prepared," *Center for Arms Control and Non-Proliferation*, Sep 2023. Available: <https://armscontrolcenter.org/biological-threats-have-evolved-for-the-worse-and-we-are-not-prepared/>
104. Jack O'Neill, et al. "AI and the Future of Work in Africa," *Microsoft Corporation (White Paper)*, Jun 2024. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/research/uploads/prod/2024/06/AlandTheFutureofWorkinAfricaWhitePaper-June2024-666aa97e6eb8d.pdf>
105. World Economic, Insight Report (19th Edition). "The Global Risks Report 2024," Jan 2024. Available: https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2024.pdf
106. "Horizon Scanning: Emerging Issues for EU Policymaking," issue 5, *European Strategy and Policy Analysis System*, Mar 2024. Available: https://espas.eu/files/horizon/HorizonScanning_ESPAS_05.pdf
107. World Economic Forum, Insight Report. "Future of Jobs Report 2023," May 2023. Available: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs_2023.pdf
108. J. Cramer. "How circular economy and digital technologies can support the building sector to cope with its worldwide environmental challenge?" *npj Urban Sustainability*, vol. 3 n. 28, May 2023. Available: <https://www.nature.com/articles/s42949-023-00109-w>

109. United Nations. "General Assembly Takes Up Second Committee Reports, Adopting 38 Resolutions, 2," *Presented at UN General Assembly, Plenary, 2022* [Meeting minutes]. Available: <https://press.un.org/en/2022/ga12482.doc.htm>
110. Carnegie Endowment for International Peace (n. 22)
111. J. Cramer. "How network governance powers the circular economy: Ten guiding principles for building a circular economy, based on Dutch experiences," *Amsterdam Economic Board*, Mar 2022. Available: <https://amsterdameconomicboard.com/en/news/building-a-circular-future/>
112. *Food Security Information Network (FSIN)*, "Global Report on Food Crises 2024," Apr 2024. Available: <https://www.fsinplatform.org/grfc2024>
113. *Food Security Information Network* (n. 112)
114. UNICEF, *Water scarcity: Addressing the growing lack of available water to meet children's needs*. Available: <https://www.unicef.org/wash/water-scarcity>
115. Institut de relations internationales et stratégiques (IRIS) Interview with [Emmanuel Hache](#), "Rare Earth Deposit Discovered in Norway: A Good News for European Mineral Sovereignty?," Jun 2024. Available: <https://www.iris-france.org/187043-rare-earth-deposit-discovered-in-norway-a-good-news-for-european-mineral-sovereignty/>
116. Strategy and Policy Analysis System (n. 106)
117. The State Council, The People's Republic of China, China issues regulations on rare earth administration, June 29, 2024. Available: https://english.www.gov.cn/policies/latestreleases/202406/29/content_WS66800cfcc6d0868f4e8e8b15.html
118. European Strategy and Policy Analysis System (n. 106, 116)
119. S. Shi, et al., "Synthetic biology: a new frontier in food production," *Trends Biotechnol.* Jul 2022, vol. 40 issue 7, pp. 781-803. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2022.01.002>
120. S. Singh, et al. "Mechanisms and Applications of Microbial Biotechnology in Soil Health and Agricultural Productivity: A Review," *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, Jul 2024. Available: <https://journaljabb.com/index.php/JABB/article/view/1104>
121. MIT Technology Review. (2024, Aug. 23). *Andrew Ng's new model lets you play around with solar geoengineering to see what would happen* [Online]. Available: <https://www.technologyreview.com/2024/08/23/1097292/andrew-ngs-new-model-lets-you-play-around-with-solar-geoengineering-to-see-what-would-happen/>
122. National Public Radio (NPR). (2024, Apr. 21). *Startups want to cool Earth by reflecting sunlight. There are few rules and big risks* [Online]. Available: <https://www.npr.org/2024/04/21/1244357506/earth-day-solar-geoengineering-climate-make-sunsets-stardust>
123. Ministry of Foreign Affairs of Denmark, Office of Denmark's Tech Ambassador, *The TechPlomacy Approach*. Available: <https://techamb.um.dk/the-techplomacy-approach>
124. Federal Ministry for Digital and Transport, Strategy for International Digital Policy of the Federal Government, Feb 7, 2024. <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/EN/Articles/K/strategy-international-digital-policy.html>
125. University of Exeter. (2024, May 15). "Democratic nations should rely on international law to tackle growing 'hybrid' and 'gray zone' security threats." Available: <https://phys.org/news/2024-05-democratic-nations-international-law-tackle.html>
126. S. Williams-Ceci, et al. "Misinformation does not reduce trust in accurate search results, but warning banners may backfire," *Scientific Reports*, vol. 14, n. 10977, May 2024. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-61645-8>
127. R. Fredheim. "Virtual Manipulation Brief 2023/1: Generative AI and its Implications for Social Media Analysis" *NATO Strategic Communications Centre of Excellence*, Jun 2023. Available: <https://stratcomcoe.org/publications/virtual-manipulation-brief-20231-generative-ai-and-its-implications-for-social-media-analysis/286>
128. J. Goldstein, et al. "How persuasive is AI-generated propaganda?," *PNAS Nexus*, vol. 3, issue 2, Feb 2024, pp. 1-34. Available: <https://academic.oup.com/pnasnexus/article/3/2/pgae034/7610937?searchresult=1&login=true>
129. A. Albert. "Understanding the 'Infodemic' Threat: A Case Study of the COVID-19 Pandemic." *Korean Journal of Family Medicine*, vol. 45 issue 4, pp. 183-188, May 2024. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38720234/>
130. Lawfare. (2024, Mar. 28). *For Government Use of AI, What Gets Measured Gets Managed* [Online]. Available: <https://www.lawfaremedia.org/article/for-government-use-of-ai-what-gets-measured-gets-managed>
131. Digital Trends. (2024, Jun. 28). *A dangerous new jailbreak for AI chatbots was just discovered* [Online]. Available: <https://www.digitaltrends.com/computing/skeleton-key-jailbreak-chatbot-exploit-dangerous-information/>
132. International Panel on the Information Environment (IPIE) <https://www.ipie.info/>
133. NATO Strategic Communications Centre of Excellence (n. 127)
134. K. Aslett, et al. "Online searches to evaluate misinformation can increase its perceived veracity," *Nature*, vol. 625, pp. 548-556, Dec 2023. Available: <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06883-y>
135. Y. Afina. "Towards a global approach to digital platform regulation," Chatham House, Feb 2024. Available: <https://www.chathamhouse.org/2024/01/towards-global-approach-digital-platform-regulation/03-regulatory-pathways-and-potential>
136. NATO, *Multinational Capability Cooperation*, Oct 2024. Available: https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics_163289.htm
137. P. Limone. "Psychological and Emotional Effects of Digital Technology on Children in COVID-19 Pandemic," *Brain Sci.*, vol. 11 n. 9, Aug 2021. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8465704/>
138. Imperial College. (2024, Feb. 7) *Unveiling the Impact of Digital Technologies on Adolescent Mental Health* [Online]. Available: <https://www.imperial.ac.uk/news/251333/unveiling-impact-digital-technologies-adolescent-mental/>
139. J. M. Rickli, et al. "Peace of Mind: Cognitive Warfare and the Governance of Subversion in the 21st Century," *Geneva Centre for Security Policy*, Aug 2023. Available: <https://www.gcsp.ch/publications/peace-mind-cognitive-warfare-and-governance-subversion-21st-century>
140. Lawfare (n. 130)
141. World Bank Group, *The Future of Work: Implications for Equity and Growth in Europe*, Nov 2023. Available: <https://www.worldbank.org/en/region/eca/publication/europe-future-of-work>
142. War on the Rocks. (2024, Jun. 19). *Quality Has a Quality All Its Own: The Virtual Attrition Value of Superior-Performance Weapons* [Online]. Available: <https://warontherocks.com/2024/06/quality-has-a-quality-all-its-own-the-virtual-attrition-value-of-superior-performance-weapons/>
143. US Department of Defense. (2023, Sep. 7). *Hicks Discusses Replicator Initiative* [Online]. Available: <https://www.defense.gov/News/News-Stories/Article/Article/3518827/>
144. Saab. (2024, May 24). *Silent guardians: portable passive sensors close tactical gap in electronic warfare* [Online]. Available: <https://www.saab.com/markets/norway/editorial-articles/silent-guardians-portable-passive-sensors-close-tactical-gap-in-electronic-warfare2>
145. Nasdaq. (2024, May 14). *Leidos (LDOS) Wins \$631M Deal to Aid US Army's DIABLO Program* [Online]. Available: <https://www.nasdaq.com/articles/leidos-ldos-wins-631m-deal-to-aid-us-armys-diablo-program>
146. RAND Corporation (n. 26)

