

Note

**D'UN OUTIL CLIMATIQUE
À UN INSTRUMENT DE PUISSANCE :
IMPLICATIONS GÉOSTRATÉGIQUES ET DE DÉFENSE
DE LA GÉO-INGÉNIERIE SOLAIRE**

Octobre 2026





L'Observatoire Défense & Climat, lancé en décembre 2016, a pour objectif d'étudier les enjeux de sécurité et de défense liés au climat.

Il est coordonné par l'IRIS dans le cadre du contrat réalisé pour le compte de la Direction générale des relations internationales et de la stratégie (DGRIS) du ministère des Armées. Fort d'une équipe pluri et transdisciplinaire, l'Observatoire est composé de chercheurs spécialisés en relations internationales, sécurité, défense, migrations, énergie, économie, climatologie et santé. Il est dirigé par Mathilde Jourde et François Gemenne.

L'Observatoire a initié de nombreuses collaborations avec des partenaires européens (Pays-Bas, Luxembourg) et internationaux (Australie, États-Unis, Inde), des ONG internationales, des organismes publics nationaux et internationaux. Ces initiatives ont permis de renforcer la coopération sur les enjeux climatiques et leurs implications sécuritaires.

L'Observatoire Défense & Climat propose des rapports et notes, organise des séminaires restreints et des conférences ouvertes au public, et anime le podcast « Sur le front climatique ».

www.defenseclimat.fr

Le ministère des Armées fait régulièrement appel à des études externalisées auprès d'instituts de recherche privés, selon une approche géographique ou sectorielle venant compléter son expertise externe. Ces relations contractuelles s'inscrivent dans le développement de la démarche prospective de défense, qui, comme le souligne le dernier Livre blanc sur la défense et la sécurité nationale, *« soit pouvoir s'appuyer sur une réflexion stratégique indépendante, pluridisciplinaire, originale, intégrant la recherche universitaire comme des instituts spécialisés »*.

Une grande partie de ces études sont rendues publiques et mises à disposition sur le site du ministère des Armées. Dans le cas d'une étude publiée de manière parcellaire, la Direction générale des relations internationales et de la stratégie peut être contactée pour plus d'informations.

AVERTISSEMENT : Les propos énoncés dans les études et observatoires ne sauraient engager la responsabilité de la Direction générale des relations internationales et de la stratégie ou de l'organisme pilote de l'étude, pas plus qu'ils ne reflètent une prise de position officielle du ministère des Armées.

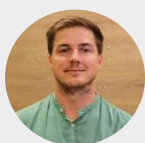
À PROPOS DE L'AUTRICE DE LA NOTE



Sofia Kabbej / IRIS

Sofia Kabbej est consultante et chercheuse indépendante, associée à l'IRIS dans le cadre du Programme Climat, environnement et sécurité. Ses travaux portent sur les implications géopolitiques et sécuritaires des changements climatiques et des méthodes de modification du climat. Elle est titulaire d'un doctorat (Ph.D.) de l'Université du Queensland (Australie). Sa thèse portait sur l'engagement de la France sur le changement climatique comme enjeu de sécurité.

COLLECTE DE DONNÉES, INFOGRAPHIES ET CARTOGRAPHIES



Antoine Diacre / IRIS

Antoine Diacre est responsable du pôle données, cartographie, infographie de l'IRIS.



Sami Nakib / IRIS

Diplômé de Sciences Po Saint-Germain-en-Laye en humanités digitales, Sami Nakib occupe le poste d'assistant de recherche au sein du pôle Géopolitique des technologies émergentes et d'analyste de données à l'IRIS.

TABLE DES MATIÈRES

PARTIE 1 - LA STRUCTURATION DU SECTEUR DE LA MRS ET SES IMPLICATIONS GÉOPOLITIQUES.....	8
A - Un secteur en pleine expansion traversé par des logiques de profit et des rapports de domination.....	9
B - Des dynamiques de structuration et de domination porteuses d'enjeux pour les intérêts français et européens	16
C - Des initiatives de gouvernance façonnées par des visions et des intérêts divergents	20
 PARTIE 2 - L'INJECTION D'AÉROSOLS STRATOSPHERIQUES (SAI) : UNE TECHNOLOGIE SUSCEPTIBLE D'ÊTRE INTÉGRÉE À DES LOGIQUES DE SÉCURITÉ	23
A - Une technologie aux effets transfrontaliers qui pose des enjeux capacitaires Erreur ! Signet non défini.	
B - La sécurisation des changements climatiques favorise l'appropriation de la SAI comme une mesure politique, voire une mesure de sécurité	31
C - La SAI : un objet de compétition géostratégique au potentiel d'arsenalisation et d'instrumentalisation	33
 ANNEXES	43
BIBLIOGRAPHIE.....	47

Dans le contexte de l'accélération des changements climatiques, les discours¹ portés par des acteurs scientifiques et politiques en faveur de l'étude des méthodes de géo-ingénierie solaire se multiplient. Ces méthodes, également désignées sous le terme de « modification du rayonnement solaire » (*Solar Radiation Modification, MRS*), sont plus ou moins complexes et visent à abaisser la température moyenne globale en réfléchissant une partie du rayonnement solaire (annexe 1). Selon ces discours « pro-recherche », les efforts d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (GES) et d'adaptation sont insuffisants pour contenir les risques liés à l'augmentation de la température moyenne globale, notamment le franchissement des points de bascule climatique² (Climate Intervention Research Letter, 2023 ; Gruener et Visoni, 2026 ; Zhao et al., 2025).

Bien que la MRS présente de nombreux risques et incertitudes, ce qui alimente une forte polarisation au sein de la communauté scientifique³ (Collomb, 2020 ; Oomen, 2025), ce secteur n'a cessé de croître depuis 2020. Cette croissance s'observe tant en termes de diversité et de nombre d'acteurs impliqués que de montants mobilisés. Pourtant, les dynamiques de structuration de cette expansion et les implications géopolitiques associées demeurent encore peu explorées. Parallèlement, plusieurs caractéristiques de l'environnement politique international influencent les conditions de recherche, les trajectoires de développement et les scénarios potentiels de déploiement de la MRS.

Cette note s'inscrit dans la continuité du [rapport de l'Observatoire Défense et Climat de 2023 sur les enjeux géostratégiques et de défense des méthodes de MRS](#) (De Guglielmo et al., 2023). Comme ce précédent travail, elle vise à élargir l'analyse de la MRS au-delà de ses effets géophysiques. Elle propose ainsi d'appréhender la MRS au-delà de ses seuls objectifs climatiques, en montrant que ce secteur d'activité est porteur d'enjeux géopolitiques marqués par des dépendances et des luttes d'influence. En prenant pour cas d'étude une méthode de MRS aux effets globaux, transfrontaliers et incertains, cette note questionne également son potentiel d'intégration dans des logiques de sécurité et de puissance. Les enseignements de cette note seront utiles aux acteurs de la défense, de la sécurité et des

¹ Le concept de discours renvoie ici à un phénomène d'expression et de communication par lequel un acteur formule et transmet des idées, dont la forme et le contenu sont influencés par ses intérêts et les contraintes auxquelles il est soumis (Bonditti et Kabbej, 2020).

² On entend par point de bascule un degré de changement de propriétés d'un système au-delà duquel on assiste à une réorganisation, potentiellement chaotique, de ce dernier (GIEC, 2019). Les points de bascule identifiés par le GIEC incluent des phénomènes de fonte et dégel de glaces et de sols gelés, des changements importants dans les circulations globales ou des changements de biomes (Tasse et Collet, 2025 ; Jourde et al., 2026).

³ Cette polarisation au sein de la communauté scientifique peut être envisagée comme un continuum, allant de positions favorables à la recherche sur la MRS, y compris, pour certaines, au développement de capacités de déploiement, à des positions opposées à toute recherche sur le sujet. Entre ces deux pôles, les positions sont multiples et variées, par exemple sur la question des expérimentations en extérieur et la mobilisation d'investissements publics dans ce domaine.

affaires internationales, ainsi qu'aux parties prenantes scientifiques et politiques de la gouvernance des changements climatiques.

La première partie analyse les implications géopolitiques des dynamiques de structuration du secteur de la MRS (I). Elle montre que l'expansion de ce secteur est traversée par des logiques de profits et des rapports de domination (I.A), qui contribuent à déterminer les dépendances, les récits dominants et les luttes d'influence liés à son développement (I.B). Ces dynamiques se manifestent également dans les initiatives de gouvernance, qui sont façonnées par des visions et des intérêts divergents (I.C).

La seconde partie se concentre sur l'Injection d'Aérosols Stratosphériques (*Stratospheric Aerosol Injection* — IAS) : la méthode de MRS suscitant le plus d'intérêt et présentant les plus faibles barrières techniques. Elle examine dans quelle mesure cette technologie est susceptible d'être intégrée dans des logiques de sécurité (II), notamment en raison de l'ampleur globale et transfrontalière de ses effets. Elle montre que le développement et le déploiement de cette technologie seraient dépendants de capacités inégalement réparties parmi les États (II.A). Elle explique ensuite que la sécurisation⁴ des changements climatiques favorise l'appropriation de l'IAS comme une réponse politique, voire une mesure de sécurité (II.B). Enfin, elle démontre que l'IAS doit être appréhendée comme un objet de compétition géostratégique, et que cette technologie présente un potentiel d'arsenalisation et d'instrumentalisation (II.C).

Périmètre de la note

Cette note n'a pas vocation à présenter les différentes méthodes de modification du rayonnement solaire (*Solar Radiation Modification*, MRS), ou géo-ingénierie solaire, ni à détailler les risques et incertitudes qu'elles font peser sur les systèmes naturels et sociaux. Un bref rappel de ces éléments est toutefois proposé en annexe : les principales méthodes de MRS sont présentées en annexe 1 et les principaux risques en annexe 2. Pour plus d'informations, le lecteur pourra se référer au rapport de l'Observatoire Défense et Climat (de Guglielmo et al., 2023).

⁴ La sécurisation se distingue de la *sécuritisation* au sens de Buzan et Wæver (1998). La *sécuritisation* désigne le processus par lequel un enjeu est construit comme une menace existentielle pour un objet de référence et justifie, sur cette base, le recours à des mesures exceptionnelles, c'est-à-dire qui excèdent les modalités ordinaires de gestion de cet enjeu. Dans cette perspective, si les changements climatiques font l'objet d'une sécurisation croissante, la littérature demeure partagée quant à la réussite de leur *sécuritisation*, notamment en raison de l'absence de mesures exceptionnelles rompant avec les cadres ordinaires de l'action publique.

Méthodologie de collecte des données

1 – Identification d’activités de MRS en cours

Les données relatives aux activités de MRS recensent toutes les opérations de financement destinées à des activités et à des organisations dont les activités sont principalement axées sur la recherche, le plaidoyer / la sensibilisation et la commercialisation de la MRS — et dont nous avons connaissance au moment de la publication (octobre 2026). Cette collecte de données s'appuie sur les informations rendues accessibles, notamment les déclarations publiques, les rapports publiés par les différentes institutions, rapports d'activités des différents projets, ainsi que les financements et les activités disponibles en source ouverte ou faisant l'objet de publicités. La base de données réalisée par l'IRIS recense ainsi 140 activités en cours.

2 – Recensement des montants associés aux activités identifiées

Pour affecter un montant à chaque activité, la méthodologie suivante a été retenue :

- Lorsque les activités identifiées mentionnent explicitement le montant affecté, ce montant a été comptabilisé.
- Pour des montants gouvernementaux pluriannuels annoncés, nous avons considéré la valeur de l'annonce de ce montant, même quand tous les fonds n'ont pas encore été consommés par le projet, à la date de la publication de cette note (octobre 2026).

Lorsque les montants affectés à une activité n'étaient pas accessibles :

- Nous avons retenu le montant maximal pouvant être accordé à chaque projet. En l'absence de données précises sur les montants effectivement attribués, le recours au plafond annoncé permet d'éviter de sous-estimer les financements potentiellement associés aux projets identifiés
- Cette méthode a notamment été appliquée pour affecter des montants à des activités financées dans le cadre d'appels à projets, notamment ceux lancés par des fondations. Par exemple, le montant exact accordé à chacun des projets financés par la *Simons Foundation* n'est pas connu. En revanche, les informations disponibles indiquent que les financements accordés par projet se situent entre 500 000 et 1,5 million de dollars (US). La fondation ayant annoncé une enveloppe totale de 50 millions de dollars (US) pour ces projets, nous avons affecté le montant « plafond » de 1,5 million de dollars (US) aux 19 activités en cours financées par la *Simons Foundation*. Cette méthode conduit à estimer à 28,5 millions de dollars (US) les financements potentiellement associés à ces 19 activités.

Compte tenu des difficultés d'accès à tous les financements alloués aux activités de MRS et/ou à leur montant exact, **les chiffres avancés dans cette note doivent donc être considérés comme une estimation haute des financements alloués au secteur de la MRS.**

Dans cette note, les chiffres issus de cette collecte de données sont présentés suivis de la mention IRIS, 2026.

PARTIE 1

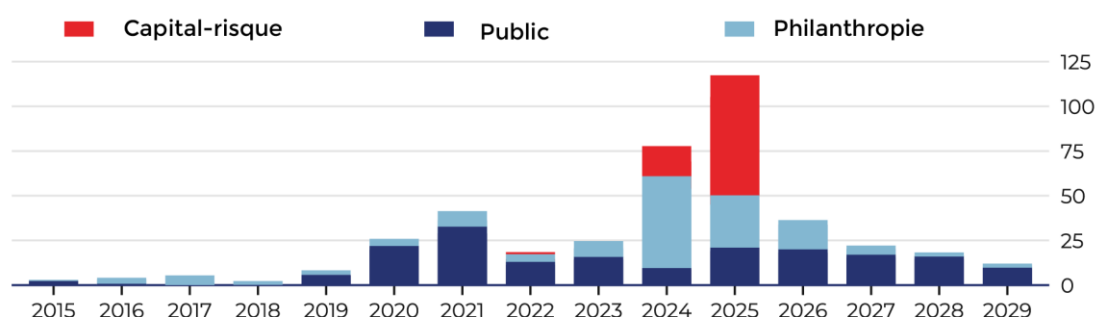
LA STRUCTURATION DU SECTEUR DE LA MRS ET SES IMPLICATIONS GÉOPOLITIQUES

A - Un secteur en pleine expansion traversé par des logiques de profit et des rapports de domination

Entre 2007 et 2026, 412 millions de dollars (US)

US ont été investis dans des activités de recherche, de plaidoyer et de sensibilisation, ainsi que de commercialisation de la MRS (IRIS, 2026). La majeure partie de ces financements, dont certains sont pluriannuels, a été octroyée depuis 2020 (cf. figure 1). Cela témoigne d'un intérêt croissant pour ces méthodes visant à abaisser la température moyenne globale.

Figure 1 – Financements identifiés de la MRS par année d'exécution et par type de source, 2015 à 2029, toutes activités recensées (dollars US)



Les montants retenus correspondent à la méthodologie employée sur l'ensemble de la base de données.
Pour les engagements pluri-annuels, les montants sont étalés sur la durée du projet

Source : Base de données IRIS

Cette croissance s'accompagne de deux transformations importantes dans la structuration du secteur, qui sont étroitement liées : la recomposition des sources de financement (cf. figure 1) et l'émergence de start-ups. Depuis le début des années 2020, les financements publics ont progressivement été dépassés par ceux provenant d'acteurs philanthropiques, et ces financements sont désormais également concurrencés par ceux de fonds d'investissement et de sociétés de capital-risque⁵ (SRM360, 2025b), lesquels représentent plus de 142 millions de dollars (US) entre 2020 et 2025 (IRIS, 2026). Cette diversification des sources de financement s'accompagne de l'émergence de plusieurs start-ups qui visent à commercialiser la MRS et lèvent des fonds auprès de ces sociétés d'investissement. **Ces deux transformations font basculer la MRS dans des logiques de marché et de recherche de rentabilité.**

La présence d'acteurs privés, d'abord issus principalement de la Silicon Valley, puis désormais étendue aux sphères financières et militaro-industrielles (Lazard, 2026a), marque une rupture dans la structuration du secteur de la MRS. Elle ne doit donc pas être considérée

⁵ Le capital-risque ou *Venture Capital* (VC) est un mode de financement d'entreprises émergentes présentant un fort potentiel de croissance. Il repose sur des investissements à risque élevé, généralement réalisés par des fonds spécialisés, appelées sociétés de capital-risque, qui prennent des participations au capital de start-ups et d'entreprises innovantes.

comme une anomalie ou une dérive isolée (Surprise et al., 2025). En outre, on observe des liens entre plusieurs sociétés de capital-risque investissant dans la MRS et le secteur de la défense, par exemple entre *AWZ Ventures* et le ministère israélien de la défense ; ou entre *Quadrature Capital* et *Palantir Technologies* (Bisset et Dyke, 2025). Au sein de l'écosystème MRS, l'implication de ces acteurs fait l'objet de débats (Cheng, 2025) et de nombreuses critiques, y compris de ceux favorables à la poursuite de la recherche sur la MRS (Keith et Visioni, 2025).

L'intérêt de ces acteurs privés doit être compris à la lumière de motivations économiques qui ne se limitent pas à la recherche de bénéfices climatiques : ils peuvent notamment chercher à anticiper une demande future des États et à se positionner comme contractants en détenant des technologies brevetées⁶ lorsque ceux-ci décideraient d'agir (Young, 2026). **Les profits potentiels liés à la commercialisation de ces technologies peuvent ainsi inciter ces acteurs à favoriser leur développement et, plus largement, à créer les conditions propices à leur utilisation future.**⁷

Deux modèles de financement et de conduite de la recherche sur la MRS : l'exemple d'*Exploring Climate Cooling* et de *Stardust Solutions*

Deux événements ont récemment marqué le secteur de la MRS. **Le premier est le lancement du projet britannique *Exploring Climate Cooling***, qui, avec ses 56,8 millions de livres sterling (environ 75 millions de dollars (US)), constitue **l'investissement public⁸ le plus important consacré à la recherche sur la MRS à ce jour**. **Le second est la levée de fonds réalisée par la start-up israélo-américaine *Stardust Solutions*, qui a réuni un total 75 millions de dollars (US) en octobre 2025**, soit près de 65 % des investissements privés dans le secteur (Hiar, 2025). **Ces deux initiatives poursuivent toutefois des objectifs distincts** : tandis que le programme britannique soutient des recherches portant sur plusieurs méthodes de MRS, *Stardust* se concentre sur la commercialisation d'un système complet d'injection d'aérosols stratosphériques (voir annexe 2).

Bien que distinctes, ces deux initiatives se rejoignent sur leur volonté déclarée de conduire des expérimentations sur le terrain dans les prochaines années, ce qui suscite de nombreuses controverses (Science Media Center, 2025). **Elles présentent toutefois des approches différentes en matière de conduite de ces activités**. Malgré les critiques dont il fait l'objet, le programme britannique est considéré par de nombreux acteurs du secteur comme un exemple de mise en œuvre de principes

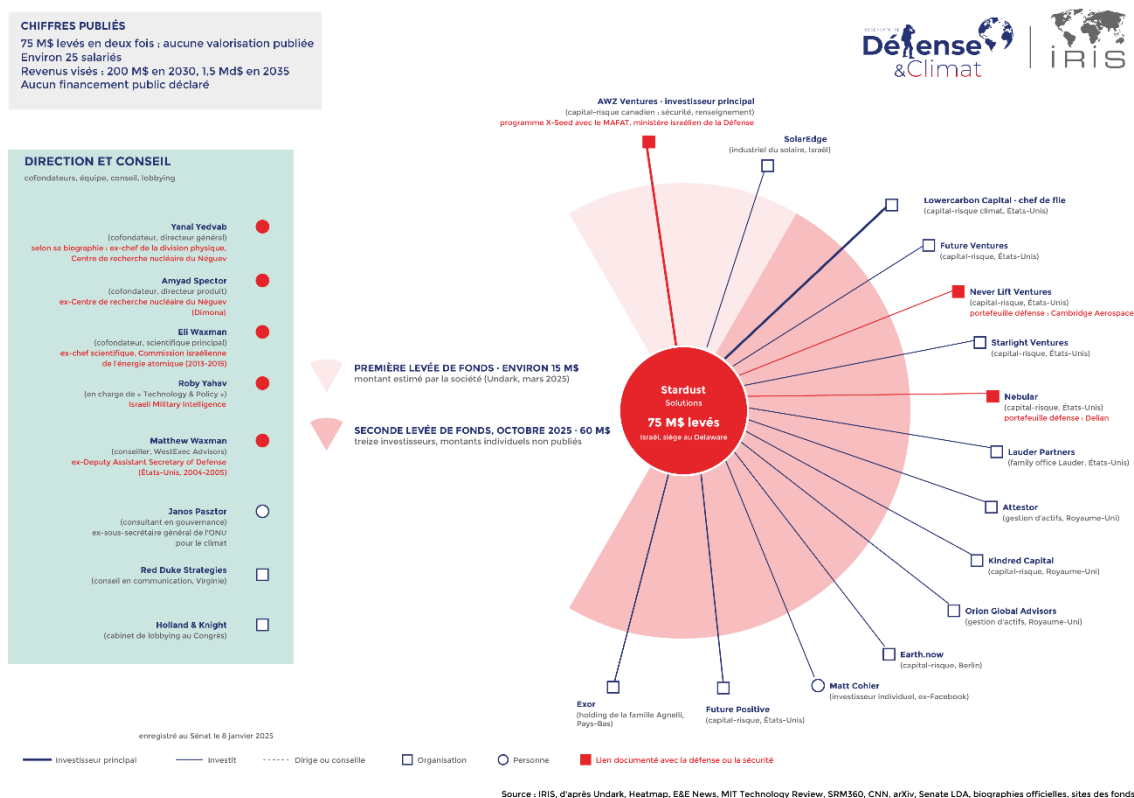
⁶ On peut par exemple citer la start-up américaine *Make Sunsets*, qui propose à la vente des « crédits de refroidissement » aux particuliers et aux entreprises, et qui a obtenu en 2025 son premier brevet aux États-Unis (Make Sunsets, 2025).

⁷ Cette perspective est d'autant plus importante à souligner que le maintien des effets climatiques recherchés par la MRS nécessiterait des déploiements sur plusieurs décennies, voire plusieurs siècles (Royal Society, 2025).

⁸ Financé par l'agence publique *Advanced Research and Innovation Agency* (ARIA), ce projet, lancé en mai 2025, soutient 22 équipes de recherche dans plus de 10 pays et a suscité de nombreuses controverses (de Freitas, W., 2025). L'agence publique britannique ARIA, créée en 2023, finance des activités de recherche dits « *high risk, high reward* ».

de gouvernance de la recherche⁹, notamment à travers la mise en place d'un comité de supervision indépendant (ARIA, 2025). À l'inverse, la start-up *Stardust* fait l'objet de nombreuses critiques, y compris de la part des scientifiques en faveur de la recherche sur la MRS. Ces critiques portent notamment sur le manque de transparence de certaines de leurs activités, sur leurs pratiques de lobbying non déclarées auprès de représentants politiques américains et sur leur proximité avec les services de renseignement et le secteur de la défense israéliens (cf. figure 2) (Lazard, 2026a).

Figure 2 : L'écosystème de Stardust Solutions : réseaux de direction et d'investisseurs



Alors qu'il est en pleine expansion et mutation, le secteur de la MRS est également marqué par des rapports de domination et de marginalisation. Deux tendances apparaissent particulièrement structurantes.

Premièrement, les financements perçus pour des activités relatives à la MRS¹⁰ sont très fortement concentrés dans les pays développés (environ 95%), principalement anglo-saxons (cf. carte 1). Cette concentration se remarque également entre pays développés, avec des financements répartis de manière très inégale : les États-Unis dominent le classement (28 %), suivis du Royaume-Uni et d'Israël (26 % chacun), de l'Australie (13%). L'Union européenne

⁹ La recherche inclut les travaux de modélisation, les observations ainsi que les expérimentations en laboratoire et celles sur le terrain.

¹⁰ Cela comprend des activités de recherche, de plaidoyer et sensibilisation, ainsi que de commercialisation.

(UE) (5%), et notamment la France, demeure absente des premiers rangs (IRIS, 2026). **Cette dynamique de domination apparaît particulièrement dans l'écart entre les pays développés et les pays en développement (cf. carte 2).** Entre 2007 et 2024, les chercheurs et organisations des pays développés ont reçu « plus de cinquante fois plus de financements que leurs homologues » dans les pays en développement (SRM360, 2025b).

La concentration des financements perçus s'accompagne d'une concentration tout aussi marquée des financements octroyés (cf. carte 1). Entre 2007 et 2026, 83 % des financements accordés aux activités de MRS proviennent de pays anglo-saxons, au premier rang desquels les États-Unis¹¹ et le Royaume-Uni (IRIS, 2026). L'UE et ses États membres demeurent en retrait, ne représentant ensemble qu'environ un cinquième des financements octroyés par les États-Unis (MRS360, 2025b). **Ainsi, même lorsque les financements bénéficient à des acteurs établis dans d'autres régions du monde, ils proviennent très majoritairement d'organisations basées dans les pays anglo-saxons.**¹² Les engagements de financement déjà annoncés pour les activités de MRS à l'horizon 2030 devraient encore accentuer cette tendance, en portant la part des financements provenant des pays anglo-saxons à près de 85 % (SRM360, 2025b).

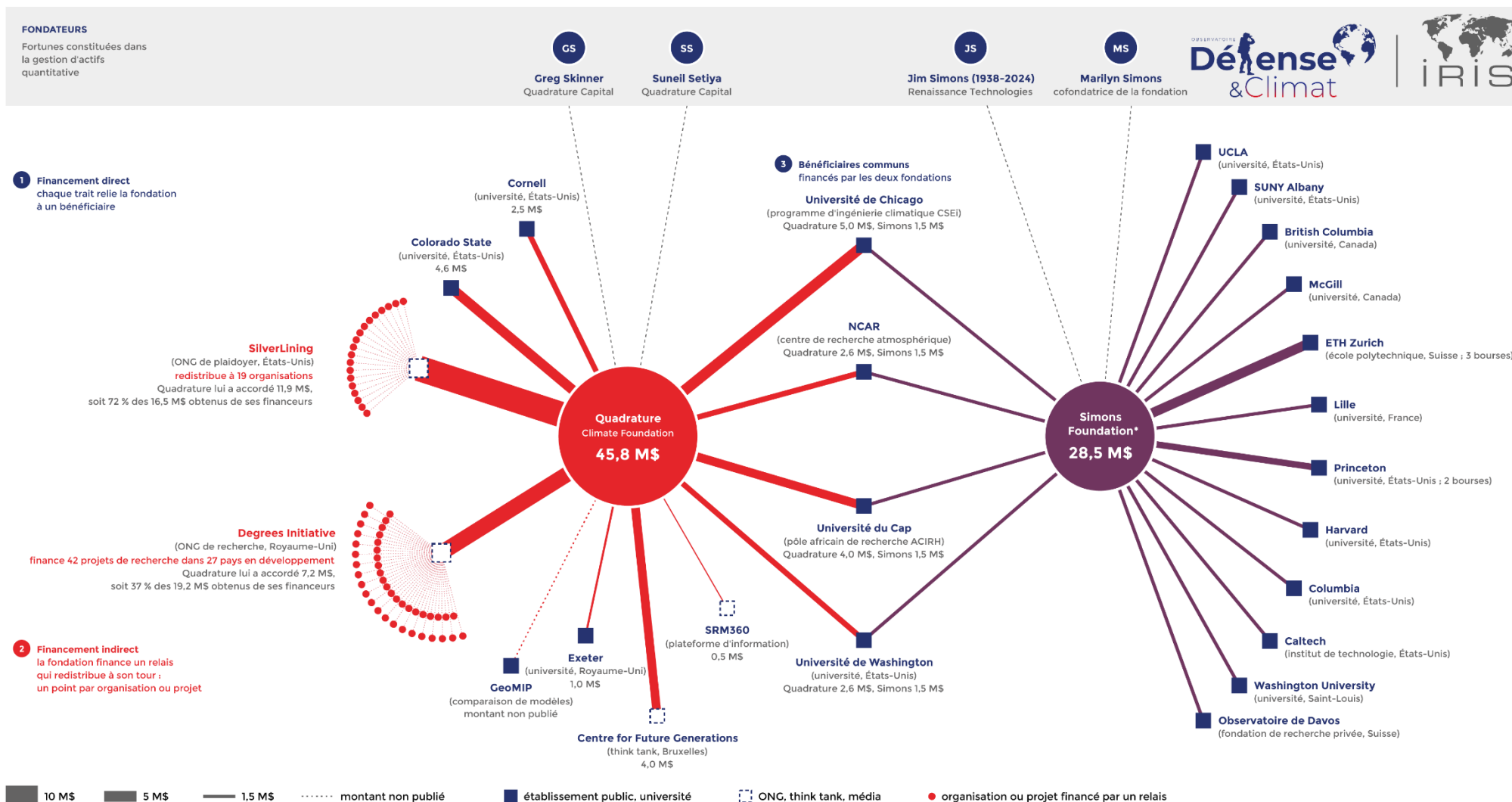
Deuxièmement, cette concentration géographique des financements perçus et octroyés s'accompagne d'une forte présence d'acteurs non étatiques dans les structures de financement des activités relatives à la MRS. Ces financements proviennent de sources diverses : organisations non gouvernementales et philanthropiques, individus fortunés, sociétés de capital-risque et fonds d'investissement. **Cette diversité apparente des financeurs masque toutefois une concentration des sources initiales de financement.** C'est notamment le cas d'organisations non gouvernementales qui financent des activités liées à la recherche ou au plaidoyer sur la MRS, mais dépendent elles-mêmes de financements philanthropiques souvent issus des mêmes bailleurs (cf. figure 3).¹³ **De plus, la présence d'acteurs privés complique l'accès aux données relatives aux financements, certains d'entre eux refusant de communiquer ces informations,** à l'image de la start-up américaine *Sunscreen* (Hiar, 2025).

¹¹ Cette concentration des financements dans les pays développés, en particulier aux États-Unis, se retrouve également dans d'autres secteurs d'innovation, notamment l'Intelligence Artificielle (IA) et les technologies quantiques (Lelièvre, 2026).

¹² La *Degrees Initiative*, basée au Royaume-Uni, en constitue une illustration : elle finance à elle seule plus de la moitié des activités de recherche conduits dans les pays en développement (SRM360, 2025b).

¹³ Par exemple, *Reflective* et la *Degrees Initiative*, deux acteurs importants du secteur qui financent des recherches sur la MRS, sont soutenus par plusieurs des mêmes bailleurs philanthropiques, dont le *Navigation Fund*, *Cranstar* et le *LAD Climate Fund*.

Figure 3 : Une concentration des sources initiales de financement : l'exemple de la *Quadrature Climate Foundation* et de la *Simons Foundation*

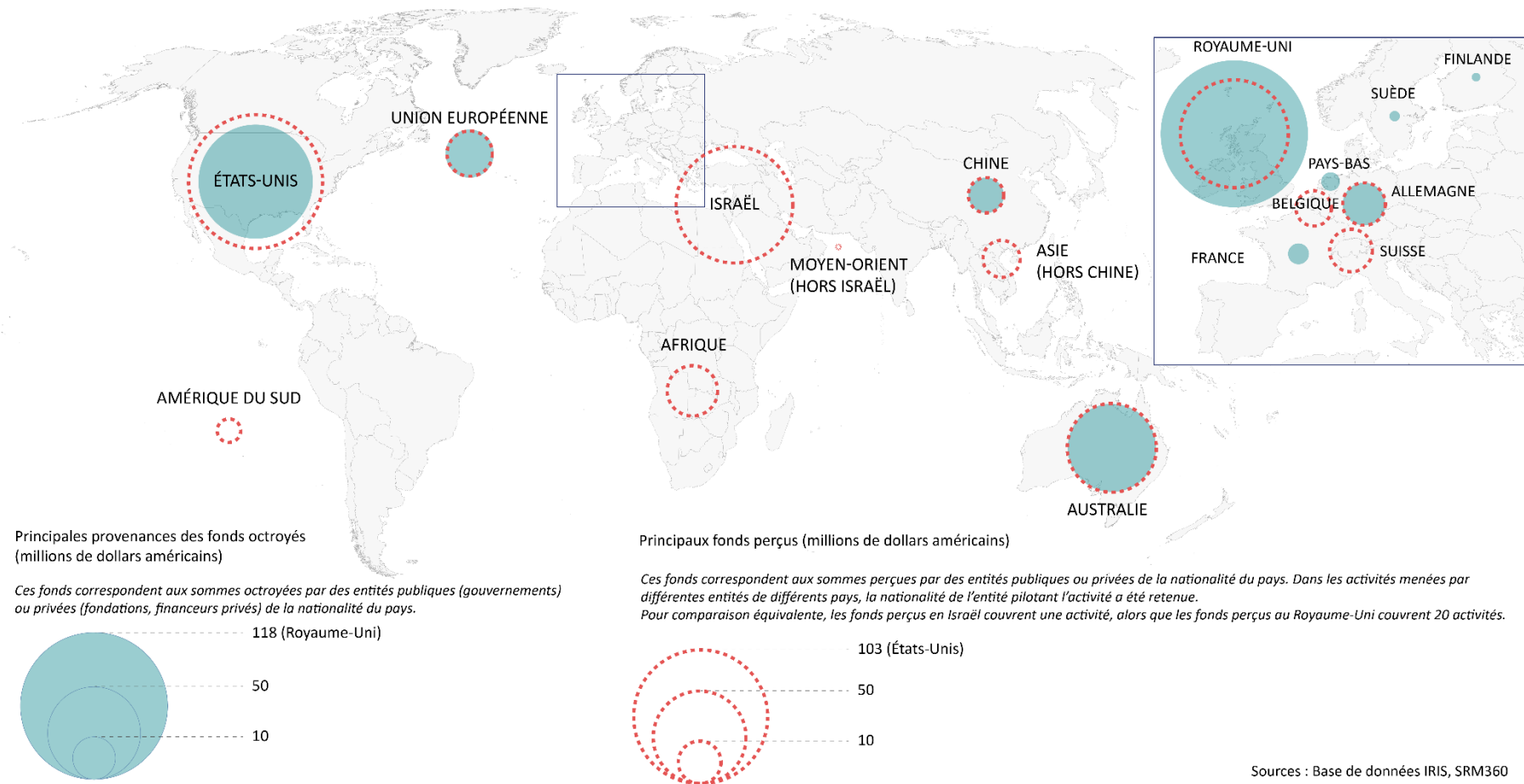


*Simons Foundation: 19 bourses ont été comptabilisées au plafond de l'appel (1,5 M\$, un seul montant publié), sur 50 M\$ annoncés sur cinq ans.

Source : IRIS, d'après Quadrature Climate Foundation, Böll 2026, Simons Foundation, Degrees Initiative, SRM360.

Carte 1 : Principales régions de bailleurs et de récipiendaires de fonds liés à des activités en cours de Modification du Rayonnement Solaire (MRS), en montants octroyés et perçus

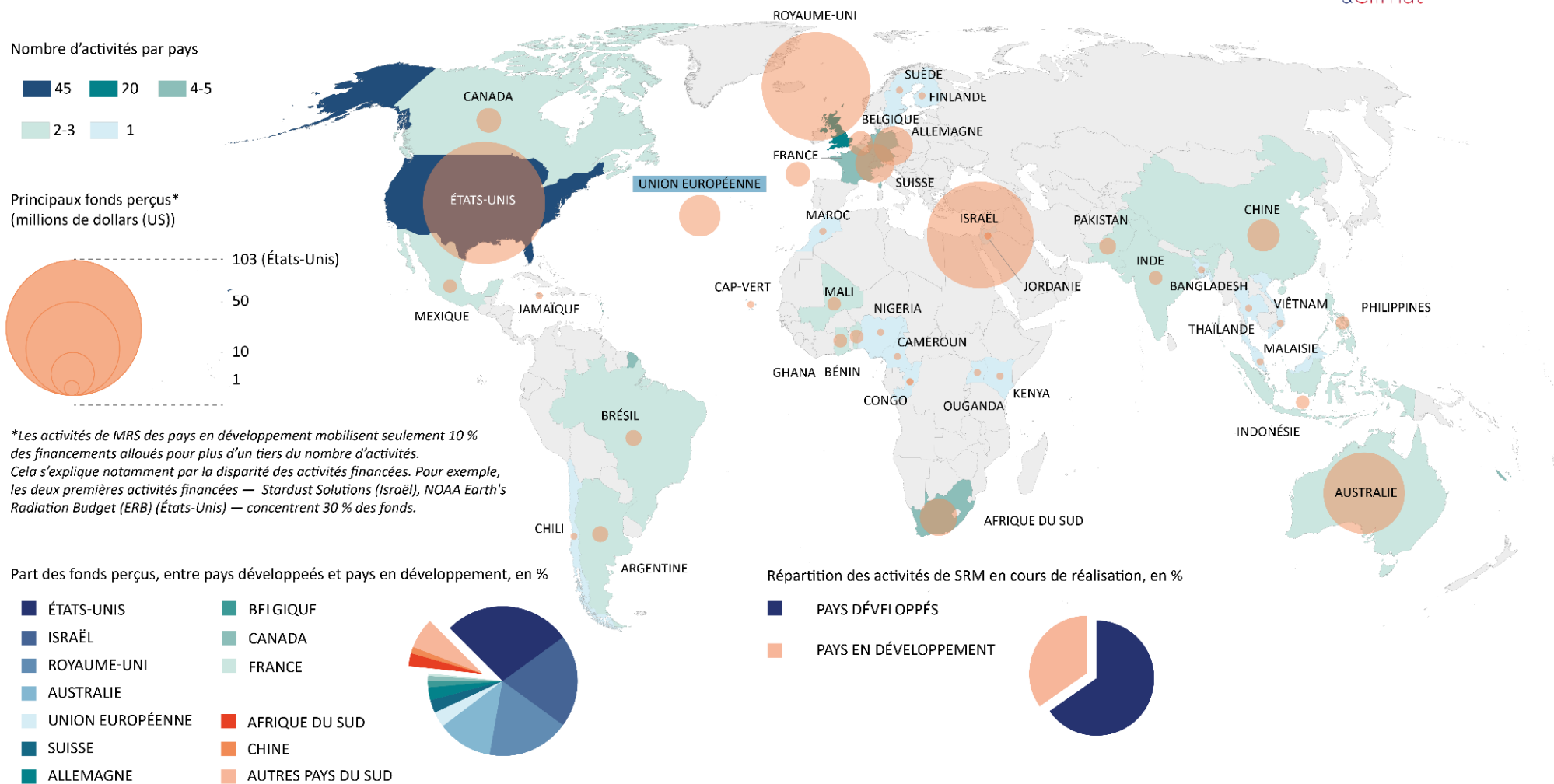
Principales régions de bailleurs et de récipiendaires de fonds liés à des activités en cours de Modification du Rayonnement Solaire (MRS), en montants octroyés et perçus



Sources : Base de données IRIS, SRM360

Carte 2 : Principales activités en cours de Modification de Rayonnement Solaire (MRS) et financements associés

Principales activités en cours de Modification du Rayonnement Solaire (MRS) et financements associés



Sources : Base de données IRIS, SRM360

B – Les implications des dynamiques de structuration et de domination pour les intérêts français et européens

Les dynamiques de structuration et de domination décrites précédemment ne caractérisent pas seulement le secteur de la MRS : elles ont également des implications géopolitiques. Trois de ces implications concernent directement les intérêts stratégiques et diplomatiques de la France et de l'UE.

Premièrement, la présence croissante d'acteurs privés souhaitant commercialiser la MRS soulève des enjeux profondément géopolitiques en raison de leur orientation idéologique et des récits¹⁴ qu'ils portent. En effet, certains acteurs, principalement issus des secteurs des technologies numériques, de la biotechnologie et de la finance, considèrent la MRS comme un instrument au service d'un projet civilisationnel marqué par l'accélération technologique dans les domaines du numérique et de l'intelligence artificielle (IA). Cet écosystème, principalement situé aux États-Unis, soutient une vision selon laquelle les limites biologiques et planétaires peuvent être dépassées par, et pour, le progrès technologique (Lazard, 2026a ; Lazard, 2026b). Ainsi, la MRS est appréhendée comme une réponse à la croissance de la demande énergétique nécessaire à l'expansion de l'IA.¹⁵

Les investissements d'acteurs issus des secteurs technologiques et financiers dans le secteur de la MRS s'inscrivent ainsi dans des agendas politiques et idéologiques qui dépassent la seule question climatique. Ces logiques sont également liées aux rivalités géostratégiques autour de la quatrième révolution industrielle¹⁶ (Lazard, 2026a ; voir II.3). Or, la France et l'UE restent largement extérieures aux écosystèmes techno-idéologiques qui les portent, tout en y étant connectées et en étant affectées par leurs évolutions (Benoit, 2024). Le développement de la MRS, lorsqu'il est appréhendé comme un instrument au service de l'accélération technologique, introduit ainsi une nouvelle dimension aux enjeux de souveraineté et d'autonomie stratégique française et européenne dans les domaines du numérique et de l'IA.

Deuxièmement, la concentration des principaux pôles d'activités et de financement dans un nombre limité de pays (cf. cartes 1 et 2) entraîne une concentration des capacités de production de connaissances et de récits sur ces technologies émergentes. Ces dispositions confèrent ainsi à un nombre réduit d'acteurs une capacité d'influence majeure sur les priorités

¹⁴ Le concept de récit se distingue de celui de discours en désignant non pas l'expression d'un acteur en particulier, mais une représentation d'un enjeu, construite à partir d'un ensemble d'idées et d'arguments qui lui confèrent un certain sens.

¹⁵ Ce lien de dépendance a notamment été explicitement formulé en 2024 par Sam Altman, PDG d'*OpenAI*, qui envisage la MRS comme un moyen de dépasser les limites planétaires (Bloomberg Live, 2024).

¹⁶ La quatrième révolution industrielle désigne une nouvelle façon d'organiser les moyens de production visant à faire converger le monde physique et le monde numérique.

et les orientations des recherches et, plus largement, sur les récits portés auprès des opinions publiques (Bisset et Dyke, 2025). **Elles leur permettent ainsi de produire des données et des expertises susceptibles de faire autorité et, ainsi, de façonner les récits sur la MRS qui alimentent ensuite les discussions politiques à différentes échelles.** Ces tentatives d'influence peuvent notamment s'observer dans les termes employés pour requalifier la MRS, à l'image du terme « stabilisation climatique », et dans la manière de la présenter dans le débat public, à l'image des débats émergents au sein de la communauté scientifique autour de la classification de la MRS comme pratique d'adaptation aux changements climatiques.¹⁷

Encadré. L'influence par le récit : l'exemple de la « stabilisation climatique »

Dans le cadre de la gouvernance climatique, l'objectif de stabilisation a progressivement évolué : initialement associé à la stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre, il a ensuite été formulé en termes de stabilisation de la température moyenne globale (Buck, 2026). **Désormais, certains acteurs cherchent à étendre cette notion à la MRS elle-même, en la présentant notamment comme un outil de stabilisation du climat.**

Cette requalification s'appuie notamment sur les préoccupations croissantes relatives aux points de bascule et sur l'idée que certaines interventions pourraient contribuer à limiter les risques associés à la déstabilisation du système climatique (Buck, 2026). Elle est principalement portée, à ce stade, par des acteurs extérieurs au monde académique et participe d'un effort plus large visant à reformuler les termes du débat autour de la MRS et à dépasser le tabou qui l'entoure. Parmi les promoteurs de cette terminologie figurent notamment des individus influents comme Paul Gambill et Ben Lachman, qui présentent la stabilisation comme un « troisième pilier de réponse aux changements climatiques, aux côtés de l'atténuation et de l'adaptation ». **Cette requalification est ouvertement présentée comme répondant à un objectif politico-stratégique :** favoriser une implication accrue des États en permettant aux responsables politiques de parler de la MRS « d'une manière susceptible de susciter l'adhésion de leurs électeurs » (Gambill, 2026). **Plusieurs acteurs ont adopté cette qualification,** témoignant de son influence et contribuant à renforcer sa diffusion. On peut notamment citer l'*ONG Ocean Visions*, des médias tels que *Foreign Policy* ainsi que des événements internationaux, comme le *Global Risk and Stabilization Summit* organisé en Islande en octobre 2026.

Dans ce contexte, **les déficits de la France et de l'UE en matière de production de connaissances sur la MRS sont susceptibles de nuire à leur indépendance et à leur capacité d'influence.** Ces déficits créent en effet une dépendance à l'égard des données produites et détenues à l'étranger (Kabbej, 2026a). Cette dépendance constitue une source de vulnérabilité, notamment parce qu'elle repose sur la volonté des parties prenantes de

¹⁷ Informations collectées dans le cadre de discussions informelles.

partager des données de manière transparente. Or, certaines pratiques de rétention d'information de la part d'acteurs privés sont déjà observées (Pasztor et Talati, 2025), et l'accès aux informations demeure particulièrement difficile dans certains contextes nationaux, notamment en Chine¹⁸ et en Russie (de Guglielmo et al., 2023 ; Lazard, 2026b). **Cette situation déficitaire soulève également des enjeux de souveraineté**, car elle affecte la capacité de la France à anticiper les impacts potentiels de la MRS sur ses territoires métropolitains et ultramarins, mais aussi à détecter et surveiller d'éventuels déploiements et leurs effets (cf. II.A).

En l'absence d'une base scientifique et d'une expertise propre suffisamment développées et reconnues, les capacités d'autonomie stratégique de la France et de l'UE se trouvent limitées. Celles-ci sont alors davantage contraintes de s'appuyer sur les données, les standards, les méthodologies et les référentiels élaborés par d'autres acteurs, et de définir leurs positions dans le cadre de récits façonnés ailleurs. **Ces déficits pourraient également affecter la capacité diplomatique de la France et de l'UE, en risquant de les marginaliser au sein des arènes où sont discutés les enjeux de gouvernance internationale de la MRS.** À moyen et long terme, cette situation pourrait également réduire la capacité de la France et de l'UE à proposer des analyses et des positions fondées sur une expertise scientifique propre.

Troisièmement, la forte dépendance des activités de recherche et de plaidoyer menées dans les pays en développement à des financements provenant d'institutions des pays développés (cf. carte 1) suscite de vifs débats quant au risque d'instrumentalisation des vulnérabilités climatiques de ces pays. Certaines organisations de la société civile estiment que l'asymétrie des financements contribue à favoriser la diffusion d'un agenda favorable à la recherche, voire au déploiement de la MRS, notamment en influençant les thématiques étudiées par les chercheurs des pays en développement (Chalmin, 2024). **Ces critiques sont toutefois contestées par les organisations concernées (Degrees Initiative, ACIRH) et par des représentants scientifiques et étatiques.** Ces derniers défendent une approche fondée sur le renforcement des capacités scientifiques dans les pays en développement, afin de leur permettre de produire leurs propres recherches et de participer activement aux débats internationaux (Degrees Initiative, 2026 ; ACIRH, 2026).

Ces positions concurrentes témoignent de luttes d'influence autour du positionnement que devraient occuper les pays les plus vulnérables aux changements climatiques dans les

¹⁸ Un rapport publié en septembre 2026 par le think tank américain *American Council for Capital Formation* indique que le ministère chinois de la Science et de la Technologie aurait accru ses investissements spécifiquement consacrés à la MRS, notamment à l'injection d'aérosols stratosphériques et à l'éclaircissement des nuages marins. Ces financements demeurent toutefois marginaux au regard des montants octroyés dans les pays anglo-saxons, s'élevant à environ 6 millions de dollars (US) (Bowen, 2026).

débats internationaux sur la MRS. Ceux-ci doivent ainsi composer avec des logiques d'autonomisation et de souveraineté scientifique, tout en étant exposés à des risques d'instrumentalisation de leurs vulnérabilités climatiques. **Ces dynamiques sont susceptibles d'avoir des répercussions sur la diplomatie climatique française et européenne, tant sur leur crédibilité auprès de ces pays que sur leur capacité à maintenir un leadership climatique.** Alors qu'un nombre réduit d'acteurs anglo-saxons domine le secteur, et que les pays les plus vulnérables aux changements climatiques sont de plus en plus impliqués dans les débats internationaux relatifs à la MRS (cf. I.C.), **l'absence d'engagement de la France et de l'UE risquerait de les faire apparaître comme des acteurs ne répondant pas pleinement aux nouveaux enjeux de la gouvernance climatique.**

Figure 4 – Trois dynamiques de structuration du secteur de la MRS, trois implications géopolitiques pour la France et l'UE



C - Des initiatives de gouvernance façonnées par des visions et des intérêts divergents

L'architecture internationale de gouvernance de la MRS est à la fois fragmentée et incomplète (de Guglielmo et al., 2023). Aucun cadre juridique international n'interdit aujourd'hui explicitement le déploiement de la MRS et aucun accord multilatéral n'est spécifiquement consacré à sa gouvernance. Plusieurs cadres existants couvrent néanmoins, ou sont susceptibles de couvrir, certains aspects de la recherche ou du déploiement de ces méthodes. Cela s'explique par la diversité des enjeux pouvant être affectés par les dispositifs envisagés : la couche d'ozone, le climat, la biodiversité, les droits humains ou encore la sécurité internationale (Ruddigkeit et al., 2025 ; Parlement européen, 2026).

Des initiatives cherchent à combler les lacunes existantes, à l'image des résolutions suisses discutées lors des Assemblées des Nations unies pour l'environnement (ANUE) en 2019 et en 2024.¹⁹ Bien qu'infructueuses, **ces initiatives illustrent les principaux clivages qui structurent les débats autour de la gouvernance de la MRS** (Corry et McLaren, 2025). **Deux approches s'y opposent**. La première, majoritaire et notamment défendue par l'UE, privilégie **une approche prudente** fondée sur le principe de précaution, le recours aux cadres de gouvernance existants et la mobilisation de savoirs issus des sciences sociales. **La seconde, plus permissive**, soutenue notamment par les États-Unis et l'Arabie saoudite, considère au contraire que l'élaboration de mécanismes de gouvernance devrait intervenir une fois les connaissances scientifiques davantage établies. En 2024, ces États se sont notamment opposés à l'inclusion des sciences sociales dans le panel de connaissances mobilisées pour évaluer les méthodes de MRS.

Ces positions divergentes doivent être replacées dans le contexte plus large de l'économie politique des négociations climatiques internationales. **D'un côté, certains États ayant des intérêts économiques et politiques liés à la poursuite de l'exploitation des énergies fossiles défendent une approche plus permissive** (à l'image des États-Unis et de l'Arabie saoudite). **De l'autre, les États qui privilégient une approche plus prudente peuvent y voir un levier d'influence**, notamment lorsque la diplomatie climatique, y compris l'Accord de Paris, constitue un pilier de leur politique étrangère (à l'image de plusieurs pays membres de l'UE) ; ou lorsqu'ils dépendent fortement de financements octroyés dans le cadre des négociations climatiques internationales (à l'image de petits États insulaires ou de nombreux pays africains).

¹⁹ Ces deux propositions visaient à produire un rapport d'évaluation sur la géo-ingénierie du CO₂ et solaire en 2019, puis sur la MRS spécifiquement en 2024.

Au-delà de ces divergences, **les débats sur la gouvernance de la MRS ont connu deux évolutions majeures entre 2019 et 2026. La première concerne l'engagement croissant des pays en développement et des États les plus vulnérables aux changements climatiques** (Corry et McLaren, 2025 ; Hassan, 2024). Cet engagement se manifeste notamment par l'adoption de décisions dédiées (Conférence ministérielle africaine sur l'environnement), par des délibérations en groupe régional lors des discussions internationales (Groupe Afrique), ainsi que par l'accueil de conférences internationales sur la MRS (Afrique du Sud, Ghana). **La seconde évolution réside dans l'implication croissante des communautés scientifiques dans la proposition de cadres de gouvernance de la MRS**, à l'image du *Solar Geoengineering Non-Use Agreement*.²⁰ **Cette initiative**, qui propose de restreindre le développement de la MRS en interdisant les financements publics, les expérimentations de terrain, les brevets, le déploiement et le soutien à ces technologies dans les enceintes internationales, **demeure toutefois controversée**.²¹

Certaines initiatives nationales d'encadrement de la MRS émergent également, portées par des logiques très différentes. Au **Mexique**, le lancement de ballons atmosphériques par la start-up américaine *Make Sunsets*, sans concertation préalable avec les autorités mexicaines (Daly *et al.*, 2025), a conduit le gouvernement à annoncer l'adoption d'une interdiction de toute expérimentation de MRS sur son territoire. Bien qu'elle n'ait pas été adoptée, cette séquence constitue un précédent important dans la gouvernance de la MRS. Aux **États-Unis**, les initiatives législatives témoignent également d'une implication croissante des pouvoirs publics, mais dans un contexte largement marqué par les théories complotistes. En 2025, des propositions de loi visant à interdire les activités de modification de la météo²² et de MRS ont été déposées dans vingt-deux États, dont trois les ont adoptées (SRM360, 2025a). Ces propositions s'appuient en partie sur la théorie des *chemtrails*, selon laquelle des avions répandraient délibérément des substances toxiques afin de stériliser ou d'asservir les populations. Plusieurs responsables politiques républicains ont d'ailleurs explicitement mobilisé cette rhétorique pour soutenir ces propositions de loi (Buck, 2025).

Dans ce contexte marqué par des controverses et par l'échec des initiatives multilatérales, **de nombreuses initiatives volontaires et informelles²³ cherchent à définir les conditions d'une**

²⁰ Cette initiative est soutenue par plusieurs centaines de chercheurs, de nombreuses organisations de la société civile ainsi que certains représentants étatiques, notamment les ministres de l'Environnement de l'Union africaine.

²¹ Les controverses portent principalement sur son opposition aux financements publics et sur le manque de représentativité géographique dans les perspectives défendues par ses promoteurs.

²² Contrairement à la MRS qui est en cours de développement et aurait des conséquences globales sur le long terme, la modification de la météo via l'ensemencement des nuages est déjà largement pratiquée - malgré une efficacité assez faible - dans une cinquantaine d'États et vise à influencer la distribution des ressources hydriques en affectant les régimes de précipitation (de Guglielmo et Jash, 2025).

²³ Parmi ces initiatives, on peut citer le rapport NASEM de 2021, de l'AGU en 2024, de l'agence ARIA en 2025, mais aussi les principes publiés par la start-up Stardust en 2026.

recherche²⁴ sur la MRS qui pourrait être considérée comme étant conduite de manière responsable (Brent et al. 2025). **Portées par des acteurs non-étatiques, elles poursuivent à la fois des objectifs normatifs**, en diffusant des standards de gouvernance, **et réputationnels**, en construisant leur légitimité dans un secteur controversé. Ces initiatives présentent des convergences (Brent et al. 2025), mais aussi d'importantes divergences sur le fond, notamment sur le type d'activités de recherche auxquelles ces principes devraient s'appliquer et sur la place du public dans la gouvernance de la recherche. En outre, **la production de ces principes est largement dominée par des acteurs anglo-saxons, qui cherchent — et parviennent dans une certaine mesure — à structurer les normes de la recherche à l'échelle internationale.**

Ces initiatives volontaires de gouvernance de la recherche sur la MRS émergent alors que les prochaines années seront marquées par de nouvelles activités menées en extérieur (SRM360, 2025d). **Or, leur conduite demeure très controversée** (King, 2025). Les acteurs favorables à la poursuite de recherches sur le terrain les considèrent nécessaires compte tenu des limites des modèles et des expériences en laboratoire. D'autres soulignent toutefois qu'aucune expérimentation de terrain ne permettra d'appréhender l'ensemble des effets de la MRS sans être conduite à l'échelle d'un déploiement. Ainsi, **un enjeu important est celui de la distinction entre les activités de terrain relevant de la recherche et celles relevant du déploiement.** Une question centrale sera alors celle des critères retenus pour les distinguer, qu'il s'agisse de l'intention des acteurs, de leurs effets géophysiques, mais aussi des conséquences sociales et politiques de ces activités.

²⁴ La recherche inclut les travaux de modélisation, les observations ainsi que les expérimentations en laboratoire et celles sur le terrain. C'est sur cette dernière catégorie que le contentieux est le plus vif.

PARTIE 2

**L'INJECTION D'AÉROSOLS
STRATOSPHERIQUES (IAS) :
UNE TECHNOLOGIE
SUSCEPTIBLE D'ÊTRE
INTÉGRÉE À DES LOGIQUES DE
SÉCURITÉ**

L'IAS, une technologie aux effets incertains et transfrontaliers

L'Injection d'Aérosols Stratosphériques (*Stratospheric Aerosol Injection* — IAS) consiste à injecter des millions de tonnes de particules réfléchissantes dans la basse stratosphère, entre environ 10 km d'altitude aux hautes latitudes et 20 km dans les tropiques. L'objectif est de créer un panache d'aérosols permettant de réfléchir une partie du rayonnement solaire afin de refroidir relativement rapidement la surface terrestre. Cette méthode vise à reproduire les effets de refroidissement temporaire observés à la suite de grandes éruptions volcaniques.²⁵

Les connaissances actuelles indiquent, d'une part, qu'un déploiement affectant le fonctionnement du système climatique²⁶ aurait des effets géophysiques transfrontaliers et, d'autre part, que ceux-ci affecteraient les régimes météorologiques de manière différenciée selon les territoires (Smith et al., 2026). La distribution de ces effets dépendrait notamment des objectifs poursuivis (stabilisation, baisse de la température globale), et des modalités de déploiement : type de particules, quantité injectée, sites et calendrier d'injection, durée du déploiement (Pope et al., 2012 ; Smith et al., 2026 ; Duffey et al., 2025).

De nombreux effets de l'IAS restent encore largement incertains, notamment sur les régimes météorologiques, les écosystèmes, les systèmes alimentaires et hydriques, la couche d'ozone, la santé et la production d'énergie solaire. Un risque majeur est celui du choc de terminaison²⁷ : une interruption d'un déploiement significatif alors que les concentrations de GES resteraient élevées pourrait entraîner un réchauffement très rapide, auquel les sociétés humaines et les écosystèmes ne pourraient que très difficilement s'adapter (Académie des sciences, 2025).

Par ailleurs, dans la plupart des travaux existants, l'utilisation de l'IAS et ses effets climatiques projetés sont envisagés à travers des scénarios et des modélisations idéalisés, fondés sur des comportements rationnels et des objectifs climatiques optimaux (Määtänen et al., 2026). Or, ces hypothèses ne sont pas nécessairement plausibles sur le plan géopolitique. Ce faisant, ces approches ne permettent pas pleinement d'appréhender les conséquences environnementales et (géo)politiques de scénarios de déploiement non idéaux, non rationnels, non coopératifs ou contestés. De plus, malgré l'amélioration des modèles et la réduction des incertitudes permises par la recherche, l'ensemble des conséquences d'un déploiement ne pourrait être anticipé avant sa mise en œuvre.

Ces caractéristiques transfrontalières et incertaines font de l'IAS une technologie aux implications géopolitiques importantes.

²⁵ Par exemple, l'éruption en 1991 du mont Pinatubo aux Philippines est estimée avoir causé un refroidissement de l'ordre de 0,3 °C à 0,5 °C sur une période de 2 à 3 ans (Haywood et Times, 2022).

²⁶ Les effets d'un déploiement de l'IAS, y compris ceux transfrontaliers, dépendent de l'ampleur de la perturbation du système climatique, qui dépend notamment de la quantité d'aérosols libérée.

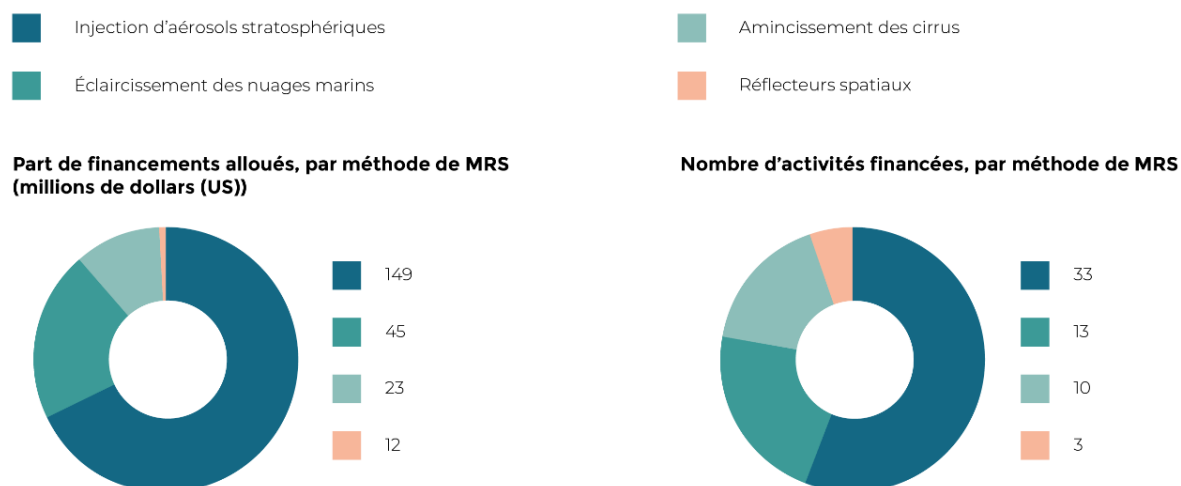
²⁷ Cette terminologie est traduite de l'anglais « *termination shock* ». Il est aussi appelé risque de choc terminal.

A – Les enjeux capacitaires d’une technologie aux effets transfrontaliers

L’IAS est aujourd’hui la méthode MRS qui suscite le plus d’intérêt et attire le plus de financements (IRIS, 2026, cf. figure 5). Cet intérêt s’explique notamment par le fait qu’elle présente les barrières techniques les plus faibles parmi les méthodes de MRS faisant l’objet de recherches. **Néanmoins, son développement et son éventuel déploiement dépendront de la maîtrise d’enjeux capacitaires (cf. figure 6) répartis de manière très inégale entre les États, ce qui soulève des enjeux géopolitiques.**

Figure 5 – Activités en cours et financements identifiés, par méthode de MRS

Activités en cours et financements identifiés, par méthode de MRS*

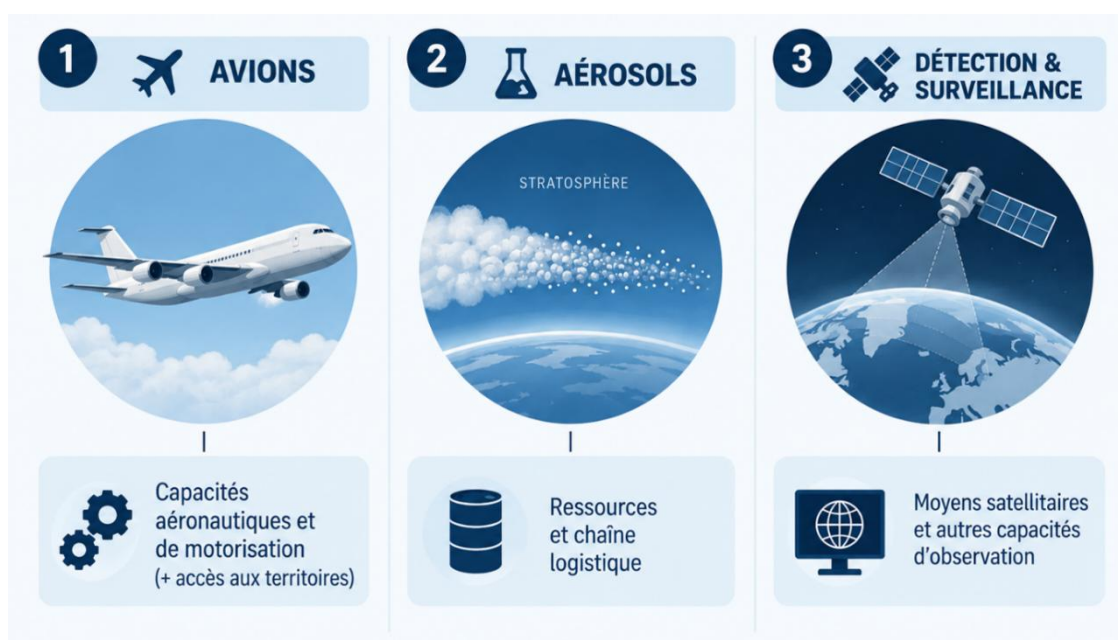


*Ici ne sont recensées que les activités clairement identifiées comme étant portées sur une seule méthode de MRS. Ainsi sont prises en compte 82 activités sur 140, représentant 220 millions US dollars sur 328 millions US dollars.

Les autres projets non comptabilisés ici correspondent à des activités de financement des SRM, des activités pluri-disciplinaires (études, modélisations) dans lesquelles s'inscrivent l'analyse de plusieurs méthodes de MRS.

Source : base de données IRIS

Figure 6 – IAS : trois enjeux capacitaires aux répercussions géopolitiques



1. Enjeu capacitaire 1 : La dépendance aux industries aéronautiques et de motorisation

Le premier enjeu capacitaire concerne la disponibilité et l'adéquation des avions.²⁸ La capacité à déployer l'IAS dépendrait en effet des modalités d'injection, notamment de l'altitude et de la latitude auxquelles les aérosols seraient dispersés. **Les simulations privilégient généralement des injections à haute altitude, autour de 18 km et dans les tropiques, où elles produisent un effet de refroidissement plus important** (Duffey et al., 2025 ; Zhang et al., 2024). Or, les avions existants sur le marché mondial ne permettent pas de répondre à ces exigences : leur plafond d'altitude est généralement d'environ 13 km, tandis que les rares jets capables d'atteindre 15,5 km ne peuvent embarquer une charge d'aérosols suffisante pour produire un effet de refroidissement significatif (Smith & Wagner, 2018 ; Keith & Smith, 2024).

Un déploiement à haute altitude nécessiterait ainsi le développement d'une flotte d'environ une centaine d'avions capables d'atteindre la stratosphère à proximité de l'équateur, de transporter des charges importantes d'aérosols et de maintenir une combustion prolongée à haute altitude (Smith & Wagner, 2018 ; Horton et al., 2025). Le développement de ces appareils et des infrastructures associées pourrait prendre environ deux décennies, pour un coût estimé à plusieurs dizaines de milliards de dollars (US) par an (Smith & Wagner, 2018 ;

²⁸ Bien que plusieurs dispositifs d'injection des aérosols aient été envisagés (fusées, ballons atmosphériques), l'utilisation d'avions est considérée comme le moyen le plus efficace (Horton et Irvine, 2024).

Robock, 2020). **Des travaux plus récents²⁹ suggèrent toutefois que ces barrières pourraient être réduites en privilégiant un déploiement de moindre ampleur**, avec des aéronefs pilotés à distance (drones) afin d'économiser de l'énergie et de la charge. Ces perspectives contribuent à alimenter l'hypothèse d'un déploiement à plus court terme et moins coûteux.

Afin de contourner ces contraintes techniques, temporelles et économiques, des chercheurs envisagent de modifier les modalités d'injection. Des scénarios envisagent ainsi des injections saisonnières à basse altitude, autour de 13-15 km, dans les régions polaires (60°N ; 60°S). **Des avions existants, tels que le Boeing 777F, pourraient alors être adaptés pour transporter des charges d'aérosols.** Ce scénario « polaire » serait toutefois moins efficace qu'un déploiement tropical³⁰ et présenterait des risques et des incertitudes supplémentaires, notamment concernant l'exposition des populations et des écosystèmes aux particules et les effets sur les précipitations (Duffey et al., 2025). Ce scénario de déploiement polaire est présenté par certains chercheurs comme une **première étape de déploiement à court terme**, permettant de réduire les coûts d'entrée et l'échéance temporelle associés à la recherche et au développement des avions (Reflective, 2026 ; Temple, 2026).

Ces deux scénarios — tropical et polaire — illustrent que les objectifs et modalités de déploiement déterminent à la fois les capacités aéronautiques requises et le délai dans lequel un déploiement de l'IAS pourrait être réalisé. En l'occurrence, il n'existe actuellement aucune barrière technique majeure empêchant la réalisation d'expériences à petite échelle utilisant des avions existants, sous réserve de certaines modifications. De plus, les barrières techniques permettant de réaliser un déploiement ayant un effet significatif sur le climat global sont relativement faibles (Horton et Irvine, 2024).

Ces scénarios montrent également que la capacité à développer et déployer l'IAS dépendra directement des capacités des industries aéronautiques et de motorisation. L'implication d'entreprises de ces industries serait indispensable à l'adaptation d'aéronefs existants ou à la conception de nouveaux appareils. **Ces entreprises sont toutefois inégalement réparties à l'échelle mondiale puisqu'elles sont implantées dans une douzaine d'États environ** (parmi lesquels les États-Unis, la France, l'Allemagne, le Royaume-Uni, le Japon, le Canada, la Russie, la Chine, l'Inde et le Brésil). De plus, **les acteurs de ces industries de pointe constituent « des atouts stratégiques »** (Horton et al., 2025), notamment en raison de leurs liens étroits avec

²⁹ Ces recherches ont été présentées en mai 2026 dans le cadre du programme *Climate Systems Engineering initiative* de l'Université de Chicago, qui constitue l'épicentre des recherches sur le développement d'aéronefs et de système de dispersion des aérosols, qui demeure un enjeu capacitaire central (Temple, 2026). L'entreprise américaine *Iris Aero* développe ainsi un aéronef pouvant, selon les estimations disponibles, être construit en trois ans pour environ 120 millions de dollars (US) (Levitan, 2026b).

³⁰ L'efficacité d'un refroidissement dans le cadre d'un déploiement polaire est estimée entre 50% et 65% de celle d'un déploiement tropical (Duffey et al., 2025).

les bases industrielles de défense. Ces dispositions rendent peu probable leur implication dans des activités liées à l'IAS sans l'aval officiel ou non officiel des autorités gouvernementales.

Les capacités de déploiement sont également dépendantes de l'accès aux territoires et aux infrastructures nécessaires au lancement et au stationnement des aéronefs, ainsi que de l'autorisation de survol des espaces aériens concernés. Un déploiement par un acteur privé sans l'aval, officiel ou non, d'un gouvernement apparaît ainsi peu probable (de Guglielmo et al., 2023). **Ces contraintes confèrent toutefois un avantage aux États disposant de capacités industrielles et de territoires répartis sur plusieurs latitudes**, en leur offrant davantage d'options pour définir les modalités de déploiement, voire pour envisager un déploiement unilatéral.³¹ Par ailleurs, **les opérations impliquant la diffusion de quantités significatives d'aérosols devraient être soumises à un processus de réglementation auprès d'organismes spécifiques³², permettant d'en assurer la traçabilité.** Cette possibilité reste dépendante de la volonté de l'acteur ou des acteurs impliqués d'agir dans le respect des normes relatives au transport de marchandises par cargo (Wagner, 2026).

2. Enjeu capacitaire 2 : La dépendance aux chaînes logistiques de différents types d'aérosols

Le second enjeu capacitaire concerne l'ampleur des quantités d'aérosols qui seraient nécessaires à la conduite d'un déploiement significatif, et les chaînes logistiques qui leur seraient associées. À titre d'exemple, un refroidissement de l'ordre de 1 °C nécessiterait de diffuser plusieurs dizaines de millions de tonnes de dioxyde de soufre (SO₂) par an (Horton et Irvine, 2024), ce qui soulève **des enjeux importants en matière de disponibilité, de stockage et de transport des particules, ainsi que de capacités industrielles associées.**

Les recherches sur les aérosols à privilégier sont encore en cours et ne font pas l'objet d'un consensus scientifique. Les aérosols sulfatés³³ sont ceux pour lesquels les données sont les plus nombreuses, notamment en raison de leur présence passée et actuelle dans l'atmosphère et de l'analogie naturel fourni par les éruptions volcaniques (Visioni, 2026 ; Vattioni, 2025). **Son utilisation présente toutefois des risques importants**, notamment de réchauffement de la stratosphère, de destruction de la couche d'ozone et de pluies acides. **D'autres particules solides, comme la calcite ou la poussière de diamant, sont également**

³¹ Les États-Unis disposent à cet égard d'une combinaison particulièrement favorable de capacités économiques, industrielles et territoriales pour développer et, le cas échéant, déployer l'IAS à une échelle susceptible d'avoir un effet climatique significatif. La Chine pourrait également disposer à terme d'options similaires, notamment grâce à ses investissements dans le cadre de la *Belt and Road Initiative* (Horton et al., 2025 ; Möller et Young, 2026).

³² Par exemple l'*International Air Transport Association* (IATA)

³³ Les aérosols sulfatés sont de minuscules particules solides ou liquides composées de sulfates.

étudiées, tandis que la start-up *Stardust* explore la **production de particules synthétiques**³⁴ (Spector et al., 2026). Ces particules solides présentent davantage d'incertitudes concernant leur comportement dans la stratosphère, leurs interactions écologiques et les dispositifs de dispersion adéquats³⁵ (Henry, 2026 ; Visioni, 2026).

Le recours à des particules réfléchissantes existantes ou synthétiques impliquerait des enjeux distincts de géopolitique des ressources³⁶ : relatifs au contrôle des chaînes d'approvisionnement, aux dépendances et vulnérabilités associées, ainsi qu'aux effets sur les marchés (Hack et al., 2025).

Par exemple, l'utilisation du SO₂ reposerait principalement sur la récupération du soufre comme sous-produit du raffinage du pétrole et du traitement du gaz naturel. Cette option serait donc étroitement liée à l'industrie fossile (Nwuneli, 2026). Cela pourrait renforcer deux risques associés à l'IAS : d'une part, un verrouillage sociotechnique, en contribuant à maintenir les infrastructures et dépendances associées aux énergies fossiles ; d'autre part, un aléa moral, en réduisant les incitations à agir sur les causes des changements climatiques à travers la réduction des émissions de GES. Par ailleurs, la demande globale de SO₂ ne cesse de croître, notamment pour la production d'engrais, et les capacités d'exportation sont concentrées dans peu de régions, notamment au Moyen-Orient (Arabie Saoudite et Qatar) (Hebebrand et al., 2026) et au Canada. Ces caractéristiques peuvent accroître les pressions sur les marchés et les sources de vulnérabilités relatives aux approvisionnements. Par ailleurs, le recours à des particules synthétiques solides supposerait de maîtriser, à très grande échelle, l'ensemble des capacités industrielles nécessaires à leur chaîne de valeur : fabrication, stockage, transport et dispersion.

3. Enjeu capacitaire 3 : La dépendance à des dispositifs de détection et de surveillance

Le troisième enjeu capacitaire concerne l'accès et l'adéquation des dispositifs de détection et de surveillance d'un éventuel déploiement de l'IAS. Plusieurs dispositifs actuellement opérationnels permettraient théoriquement de détecter des concentrations anormales d'aérosols stratosphériques ou de leurs précurseurs dans l'atmosphère, notamment l'instrument européen TROPOMI. **Un déploiement d'une ampleur suffisante pour affecter le climat global serait ainsi détectable par satellite, mais également à travers la logistique qui**

³⁴ Publiés sous forme de *preprints*, sans avoir été évalués par les pairs, les travaux de Stardust font l'objet de critiques au sein de la communauté scientifique (SRM 360, 2026).

³⁵ Les mécanismes existants ne permettent pas, à ce stade, d'éviter l'agglomération (Visioni, 2026).

³⁶ Peu de travaux ont jusqu'alors été conduits pour évaluer la géographie des capacités de récupération et/ou de production de ces différentes alternatives, les pays concernés et leurs implications géopolitiques. Cela pourrait faire l'objet d'une recherche plus approfondie dans le cadre d'une autre note.

lui serait associée (Smith et al., 2026). Les décollages et atterrissages répétés d'un nombre important d'aéronefs, ainsi que les flux de précurseurs d'aérosols nécessaires à leur approvisionnement, généreraient en effet des signatures logistiques susceptibles d'être identifiées par les moyens de surveillance existants.

Les capacités actuelles présentent toutefois des limites pour détecter des injections de petite échelle. En effet, **aucun pays ne dispose de capacités adaptées à la détection d'une injection non déclarée de petite échelle** (Visioni, 2026).³⁷ Or, ces déploiements sont indispensables à la construction de capacités de déploiement à grande échelle, en permettant de réduire certaines incertitudes scientifiques. **Le développement de capacités de détection est donc essentiel pour identifier d'éventuelles activités conduites de manière non transparente.**

La surveillance des effets d'un éventuel déploiement présente également d'importantes lacunes capacitaires. Plusieurs dispositifs de surveillance seront prochainement mis hors service³⁸, ce qui fait peser un risque « imminent de désert de données » (Salawitch et al., 2025), notamment pour l'observation de la couche d'ozone et la détection d'éventuelles injections d'aérosols. De plus, **les capacités actuelles ne permettent pas encore de disposer de données suffisamment fines et continues sur les effets d'un déploiement de l'IAS.** Le renforcement de ces capacités de surveillance pourrait notamment combiner des moyens satellitaires, des ballons et/ou des campagnes aéroportées (Visioni, 2026).

Enfin, ces capacités de détection et de surveillance sont aujourd'hui réparties de manière très inégale entre les États. Peu de satellites, principalement américains, disposent d'un niveau de précision suffisant pour détecter des panaches d'aérosols, et ceux qui en disposent présentent des limites en matière de couverture géographique et temporelle. Ces limites sont particulièrement contraignantes pour la détection et la surveillance d'activités conduites dans les régions polaires. **Le contrôle des données de détection et de surveillance par certains acteurs et les dépendances qui en résultent peuvent avoir des conséquences géopolitiques.** Dans un contexte de remise en question croissante de l'information et de la science plus largement, **la concentration de ces capacités pourrait alimenter la méfiance entre acteurs autour des données relatives à la détection et à la surveillance d'activités de SAI.**

³⁷ Le seuil de 0,55 tonne de SO₂ a été identifié dans un papier récent (Smith et al., 2026).

³⁸ Il s'agit du *Atmospheric Chemistry Experiment–Fourier Transform Spectrometer* (ACE-FTS) sur *SCISAT-1* et du *Microwave Limb Sounder* (MLS) sur le satellite *Aura* de la NASA. La plateforme *Aura* arrive au terme de sa durée de vie opérationnelle, tandis que *SCISAT-1* est en service depuis plus de 20 ans.

B - La sécurisation des changements climatiques favorise l'appropriation de l'IAS comme une mesure politique, voire une mesure de sécurité

Les analyses présentées ci-dessus sont utiles pour explorer les enjeux capacitaires de l'IAS et leurs implications géopolitiques, mais **elles omettent les facteurs politiques susceptibles d'affecter les conditions d'un éventuel déploiement de l'IAS et ses conséquences**. Elles ne tiennent en effet pas compte des modalités de décision relatives à un éventuel déploiement de l'IAS : qui déciderait de déployer, pour quelles raisons, selon quelles procédures et avec quelles conséquences sur les relations entre États.

Parmi ces facteurs figure la sécurisation³⁹ croissante des changements climatiques. De nombreux acteurs étatiques et non étatiques, y compris certains impliqués dans des activités relatives à l'IAS, qualifient les changements climatiques de phénomènes générateurs de risques, voire de menaces (Gemenne et al., 2021 ; Climate Diplomacy, 2026 ; McDonald, 2024 ; Kabbej, 2025). **Ces discours sont toutefois hétérogènes,⁴⁰ et se traduisent par la promotion et la mise en œuvre de réponses politiques de nature différente** (Vogler, 2023) : atténuation des émissions de GES, restauration de certains écosystèmes, mise en place de systèmes d'alerte précoce, construction de digues, etc.

Bien qu'hétérogènes, les discours sur la sécurité climatique portés dans plusieurs États, parmi lesquels les États-Unis, l'Allemagne et la France, se sont progressivement détournés de considérations écologiques⁴¹ pour se centrer sur des enjeux de sécurité nationale et internationale (Von Lucke, 2015 ; Von Lucke, 2023 ; Kabbej, 2025). **Ces évolutions ont alors eu des effets concrets sur les orientations des réponses politiques apportées.** Celles-ci ont eu tendance à favoriser la mise en œuvre de pratiques d'adaptation et de gestion de l'urgence, au détriment de la réduction de la consommation des énergies fossiles — pourtant à l'origine de la menace identifiée (Kabbej, 2025).

L'IAS pourrait ainsi faire écho aux orientations politiques privilégiant la gestion des effets des changements climatiques, y compris de leurs implications sécuritaires. Cette perspective est renforcée par l'émergence de récits au sein du secteur de la MRS qui présentent l'IAS

³⁹ Cf. introduction.

⁴⁰ Il n'existe pas de consensus sur ce qui constitue la « sécurité climatique ». Les divergences portent notamment sur les menaces identifiées (événements climatiques extrêmes, déplacements de populations, tensions autour des ressources, etc.), ce qui doit être protégé (l'état, les populations, les écosystèmes, etc.), les réponses à privilégier (réduction de la consommation d'énergies fossiles, systèmes d'alerte précoce, adaptation des infrastructures, etc.) et qui doit les mettre en œuvre (les gouvernements, les organisations internationales, les individus, etc.) (McDonald, 2013).

⁴¹ Parmi ces considérations écologiques figure l'identification des océans, de la biodiversité, des espèces marines ou terrestres comme objets de protection.

comme un moyen potentiel de protection, et ce malgré des divergences importantes sur la caractérisation du problème⁴² (Kabbej, 2026b). **L’articulation de ces deux tendances** — d’une part, une gestion étatique des enjeux de sécurité climatique qui tend à se détourner des causes du phénomène et, d’autre part, la construction de l’IAS comme un moyen potentiel de protection — **pourrait créer les conditions favorables à l’appropriation de l’IAS comme mesure politique, voire comme mesure de sécurité.**

Pour des responsables politiques, l’IAS peut présenter les attributs d’une solution politique concrète, visible et valorisable politiquement (Young, 2026). Cette technologie répondrait aux attentes sociétales relatives aux changements climatiques, sans pour autant s’attaquer aux causes du phénomène ni remettre en question les structures de pouvoir économique et politique existantes.⁴³ Elle permettrait ainsi de démontrer une prise en compte des attentes sociétales, y compris par des régimes populistes et autoritaires (Michaelowa, 2021). **Dans cette perspective, la rhétorique sécuritaire autour des changements climatiques pourrait contribuer à inscrire l’IAS dans une logique de sécurité préventive, où une mesure d’urgence serait adoptée au nom de la gestion d’une menace, sans que l’ensemble de ces conséquences potentielles ne soit pleinement pris en compte** (Young, 2023).

L’hypothèse de l’appropriation de l’IAS comme mesure de sécurité préventive doit également être appréhendée au regard de la primauté accordée à la souveraineté dans les logiques sécuritaires.⁴⁴ Or, **dans le contexte d’une sécurisation croissante des changements climatiques caractérisée par l’absence de consensus sur ce qui devrait être protégé, la place centrale accordée à la souveraineté pourrait favoriser des approches non coopératives autour de l’IAS.** Cette possibilité est renforcée par la capacité des États à reformuler des problèmes transnationaux dans des termes qui leur permettent d’exercer un pouvoir. À l’image de la gestion de la pandémie de Covid-19, marquée par des contrôles aux frontières et des enjeux de propriété intellectuelle sur les vaccins, **« l’IAS pourrait ainsi être envisagée comme un moyen de reformuler le problème climatique dans des termes intelligibles et compatibles avec l’exercice de la souveraineté »** (Young, 2026).

Une appropriation de l’IAS comme mesure de sécurité pourrait se traduire par une trajectoire de déploiement unilatérale ou mini-latérale de l’IAS de la part d’un ou de plusieurs États, soulevant dès lors des implications géopolitiques. Cette perspective est

⁴² À l’image des débats plus larges sur la sécurité climatique, cette sécurisation recouvre des approches hétérogènes, notamment quant à la nature des menaces associées aux changements - ou indirectes - et de ce qui devrait être protégé : la biosphère, l’humanité, les États-nations ou encore l’ordre international (Kabbej, 2026b).

⁴³ Ces dispositions peuvent mener à envisager l’IAS sans disposer de preuves scientifiques suffisantes de son efficacité (Young, 2023).

⁴⁴ Les logiques sécuritaires « tendent à reproduire l’idée de l’importance primordiale de la survie de l’État et du maintien de sa souveraineté sur son territoire » (Young, 2023, p. 270).

renforcée par les transformations de l'environnement politique international, mais aussi par le **potentiel de militarisation de l'IAS**, entendue comme l'implication de moyens militaires humains et techniques nécessaires pour initier ou maintenir un déploiement (de Guglielmo et al., 2023 ; Chalecki, 2026). **Dans ce contexte, des désaccords pourraient émerger sur les objectifs d'un déploiement ; autrement dit, sur ce que l'IAS devrait protéger et comment cette protection serait apportée.** Ces désaccords pourraient donner lieu à un recours à la contre-géoingénierie⁴⁵, mais aussi faire l'objet de réponses diplomatiques, coercitives et offensives, y compris sur les terrains militaires⁴⁶.

C - L'IAS : un objet de compétition géostratégique au potentiel d'arsenalisation et d'instrumentalisation

Les analyses présentées jusqu'ici, y compris celles envisageant un déploiement non coopératif, considèrent encore l'IAS comme un outil visant principalement des objectifs climatiques. Or, **l'IAS pourrait également être développée et utilisée au service d'objectifs stratégiques et politiques dépassant largement les considérations climatiques pour lesquelles cette technologie a initialement été envisagée** (Corry et al., 2025 ; Young, 2023 ; Sovacool et al., 2023 ; Surprise, 2020 ; McLaren, 2024). En octroyant théoriquement à un État la capacité de contrôler les conditions d'habitabilité planétaire en influençant le climat et les régimes météorologiques à l'échelle globale, **l'IAS présente en effet les caractéristiques d'un instrument de puissance** (Möller et Young, 2026, p. 1-3).

⁴⁵ Deux formes de contre-géoingénierie ont jusqu'ici été envisagées : une visant la neutralisation ou l'élimination des aérosols, et l'autre visant la compensation de leurs effets (de Guglielmo et al., 2023). La première consisterait « à diffuser de nouvelles substances afin d'accélérer le dépôt atmosphérique des premiers produits diffusés » (de Guglielmo et al., 2023, p.30). Elle a récemment fait l'objet d'une étude d'efficacité, dont les résultats doivent être pris avec précaution en raison des conditions de simulation (Jones et al., 2026). La seconde chercherait « à inverser les effets de ces produits en injectant des agents de réchauffement (particules ou gaz à effet de serre) » (de Guglielmo et al., 2023, p.30).

⁴⁶ Ces réponses peuvent ainsi s'inscrire sur un continuum très large, incluant le rappel d'ambassadeurs ou la rupture des liens diplomatiques, des instruments d'ordre économique et commerciaux (comme les sanctions ou les droits de douane), des demandes de compensations financières, ou encore la neutralisation via la destruction ou le sabotage des dispositifs logistiques nécessaires au déploiement (aéronefs, pistes de décollage, systèmes de surveillance, etc.) (de Guglielmo et al. 2023 : Kabbej, 2026a).

Figure 7 – L’IAS comme instrument de puissance



1. L’IAS comme objet de compétition géostratégique

Le développement de l’IAS tend à s’inscrire dans une dynamique de compétition autour de la maîtrise d’une technologie de rupture, plutôt que dans une logique coopérative (Nielsen, 2025 ; Möller et Young, 2026). Cette compétition pourrait se dessiner en amont d’un éventuel déploiement, à travers la construction progressive des capacités techniques et scientifiques nécessaires à sa maîtrise. La constitution de ces capacités pourrait devenir un objectif stratégique en soi, indépendamment de la décision de procéder effectivement à un déploiement. Ces capacités pourraient être perçues comme un moyen de conserver une marge de manœuvre face à une évolution du contexte climatique ou géopolitique, de réduire sa dépendance à l’égard de capacités étrangères et de disposer d’un levier dans les négociations internationales relatives à la gouvernance de l’IAS (Young, 2026).

Dans cette perspective compétitive, l’intérêt d’un État pour cette technologie pourrait également être motivé par des ambitions de supériorité technologique, et non seulement par la capacité potentielle de l’IAS à atténuer l’ampleur du réchauffement climatique. En ce sens, la maîtrise de l’IAS pourrait constituer un attribut de prestige, en permettant à un État de signaler sa puissance et sa prééminence (Horton, 2026). Cette maîtrise technologique pourrait effectivement être atteinte, mais également annoncée sans que la véracité des discours relatifs au refroidissement puisse être évaluée à court ou moyen terme — à minima

quelques années, voire une ou deux décennies (Henry, 2026 ; Baur, 2026).⁴⁷ Ces incertitudes, associées à la concentration des capacités de surveillance, pourraient fragiliser la confiance accordée aux discours politico-scientifiques qui entoureraient un éventuel déploiement, et seraient susceptibles de nourrir de la méfiance.

Ces logiques de compétition s'inscrivent dans un contexte géopolitique marqué par la rivalité sino-américaine, qui structure d'ores et déjà des dynamiques entourant le développement et le déploiement potentiel de l'IAS (Horton et al., 2025 ; Nielsen, 2025). Des considérations relatives à l'autodétermination, à l'autonomie stratégique et au potentiel d'arsenalisation associées à l'IAS ont ainsi fait l'objet de rapports par plusieurs *think tanks* conservateurs américains (TCCRI, 2026 ; ACCF, 2026, Rainey Center et Silverlining, 2026). Dans ces travaux, **l'IAS est présentée comme un instrument de puissance qui se détache complètement des enjeux climatiques. Ces acteurs défendent ainsi le développement, sous un leadership américain, des capacités de MRS au nom de la sécurité nationale.** Ces capacités y sont notamment présentées comme un moyen d'assurer « une souveraineté météorologique » face aux ambitions perçues de la Chine (Noyon, 2026) et la continuité de l'exploitation des énergies fossiles (Levitan, 2026a), indispensable à la politique de domination énergétique américaine (Goeffron, 2026).

L'intégration de l'IAS comme instrument de puissance dans les récits de la rivalité sino-américaine répond d'abord à des logiques partisans, mais elle est également ancrée dans des considérations capacitaires. La conduite d'un déploiement à grande échelle ne dépendrait pas uniquement de la maîtrise technologique, mais également de la capacité d'un État à imposer une décision de déploiement. **Un scénario possible est ainsi celui d'un déploiement unilatéral, mené ou soutenu, par les États-Unis ou par la Chine** (Horton et al., 2025). Compte tenu de leurs capacités militaires, économiques, politiques et technologiques, de leur contrôle territorial ainsi que de leur politique climatique et énergétique, **les États-Unis seraient plus susceptibles de recourir à l'IAS que la Chine**⁴⁸ (Young, 2026). **Néanmoins, un changement de positionnement de Pékin demeure envisageable**, notamment si une opportunité diplomatique était identifiée afin de faire valoir un leadership auprès de pays particulièrement vulnérables aux effets des changements climatiques.

Une coopération entre les deux superpuissances autour de l'IAS demeure toutefois possible. Du point de vue des effets géophysiques, un déploiement coopératif idéal pourrait théoriquement contribuer à réduire l'ampleur des risques associés à l'augmentation des

⁴⁷ Cela s'explique par le recul temporel nécessaire pour pouvoir établir avec certitude qu'un éventuel refroidissement observé est effectivement imputable au déploiement de l'IAS. L'ampleur de ce recul temporel dépendrait des modalités de déploiement.

⁴⁸ Cette analyse se base exclusivement sur la collecte de données en source ouverte.

températures aux États-Unis et en Chine. **Ce scénario ne tient toutefois pas compte des logiques politiques susceptibles d'influencer la prise de décision, ni des enjeux de cohérence politique liés à la construction de ces deux superpuissances comme rivales systémiques.** Des travaux soulignent ainsi que les États-Unis et la Chine pourraient envisager un recours à l'IAS même si celui-ci devait également leur causer des dommages physiques (Möller et Young, 2026 ; Corry et al., 2024 ; Chalecki, 2026). **Une coopération autour d'un éventuel déploiement n'est donc pas à exclure, « mais pourrait davantage intervenir après une phase de confrontation ou de non-coordination »** (Young, 2026).

Ces perspectives montrent que **les arènes technologiques et environnementales dans lesquelles s'inscrit l'IAS peuvent elles-mêmes être envisagées comme des espaces de compétition.** Cette approche est explicitement formulée dans une stratégie publiée en 2023 par le Pentagone qui présente ces espaces comme des leviers permettant d'éviter « la confrontation militaire directe » (Möller et Young, 2026, p. 5). Par ailleurs, la compétition autour de l'IAS doit également être replacée dans le contexte du développement de l'IA. **Cette technologie peut être appréhendée comme l'une des dimensions de la rivalité sino-américaine autour de la supériorité technologique dans ce domaine** (Lazard, 2026a ; Lazard, 2026b).

2. L'IAS : une technologie au potentiel d'arsenalisation et d'instrumentalisation

Une conception commune au sein du secteur de la MRS met en avant la faible probabilité d'un recours à l'IAS pour infliger des dommages physiques à une cible précise en raison de son manque de précision et de l'imprévisibilité de ses effets (Horton, 2024). **En ce sens, l'IAS ne répondrait pas aux objectifs de précision spatiale et temporelle recherchés dans le cadre d'opérations militaires.** De plus, une telle utilisation contreviendrait à la Convention ENMOD (1977), qui interdit le recours à la modification de l'environnement à des fins hostiles ou militaires.⁴⁹ **Cette perspective selon laquelle l'imprécision et le manque de contrôle des effets de l'IAS empêcheraient son arsenalisation omet toutefois le fait que cette technologie partage ces caractéristiques avec les armes biologiques, chimiques et nucléaires.** Bien qu'imprécises en termes d'effets temporels et spatiaux, celles-ci sont néanmoins utilisées et/ou font l'objet de degrés d'interdiction très variés (Möller et Young, 2026).

Ainsi, au regard de ses effets sur le climat global et donc sur l'ensemble des territoires, l'IAS dispose d'un potentiel d'utilisation comme levier géopolitique. Cette appropriation est

⁴⁹ Plusieurs États, dont la France, ne sont pas partie à la Convention. De plus, son application est limitée et resterait tributaire de la capacité à prouver l'intentionnalité hostile du recours à l'IAS.

d'autant plus envisageable dans un contexte où l'arsenalisation est désormais appréhendée de manière plus large que la seule capacité à infliger des dommages physiques (Möller et Young, 2026), et où l'on observe le recours à des leviers environnementaux au sein des dynamiques conflictuelles contemporaines (Jourde et al., 2025). **La menace de recourir ou de ne pas recourir à l'IAS afin d'influencer ou de contraindre le comportement d'adversaires ou de partenaires pourrait ainsi constituer une forme d'arsenalisation de l'IAS** (Möller et Young, 2026 ; de Guglielmo et al., 2023). **La seule capacité de déploiement pourrait ainsi constituer un levier de coercition** indépendamment de la décision d'en faire effectivement usage.

En lien avec le potentiel d'arsenalisation de l'IAS se pose l'enjeu de la perception du caractère hostile associé à son développement et/ou à son potentiel déploiement (Möller et Young, 2026 ; Sikorsky, 2025). De tels phénomènes sont déjà observés pour les méthodes de modification de la météo (de Guglielmo et al., 2023), et émergent dans le cadre du développement de l'IAS. Le *Palestinian Initiative for Climate Strategy* a ainsi accusé la start-up israélo-américaine *Stardust* d'avoir mené des expérimentations de terrain, soulevant des inquiétudes quant au fait que ces tests aient pu être conduits au-dessus de Gaza (2025). Bien qu'aucune preuve n'indique que ces expérimentations aient effectivement eu lieu, **cet exemple montre que l'IAS peut être intégrée dans les discours et stratégies de parties prenantes à des conflits préexistants** (Kabbej, 2026a).

Ces enjeux de perception d'hostilité sont particulièrement susceptibles d'être alimentés par la difficulté, voire l'impossibilité, d'attribuer l'occurrence d'un événement climatique extrême isolé à l'IAS, aux changements climatiques à l'œuvre ou à la variabilité naturelle du climat (Smith et al., 2026). **Cette ambiguïté autour de l'attribution constitue un terrain fertile à l'essor de pratiques d'instrumentalisation de l'IAS et de ses effets.** Ces pratiques peuvent dès lors **servir différents objectifs politico-stratégiques**. Elles pourraient d'abord s'inscrire **dans le cadre domestique**, en permettant aux autorités de se déresponsabiliser de leur gestion des effets des changements climatiques. Elles pourraient également répondre à **des objectifs de politique étrangère** en créant l'opportunité d'accuser un tiers afin de justifier des réponses d'ordre politique ou militaire (de Guglielmo et al., 2023).

Enfin, cette ambiguïté pourrait être exploitée par des acteurs tiers, afin de servir des objectifs stratégiques, notamment à travers des campagnes de désinformation ou de manipulation de l'information visant à éroder la confiance, alimenter des griefs ou une méfiance envers les pouvoirs publics. L'utilisation de pratiques de guerre informationnelle à des fins de déstabilisation a déjà été documentée aux États-Unis et au sein de l'UE. Dans certains cas, ces pratiques ont directement été associées à des méthodes de modification des

conditions météorologiques (Jourde et al., 2026 ; Sikorsky, 2025). **Le rôle du levier informationnel dans les risques associés à l'IAS doit ainsi être considéré dans un contexte plus large, marqué à la fois par l'essor de la guerre cognitive (NATO STO, 2025) et par l'intégration croissante des changements climatiques aux pratiques de guerre hybride (Duffau et al., 2025).**

L'IAS en Arctique : appréhender les interactions entre objectifs climatiques et considérations géostratégiques

Les changements climatiques en Arctique⁵⁰ s'inscrivent dans un environnement géopolitique lui-même en transformation. Il se caractérise d'abord par la multiplication de discours qualifiant les changements climatiques de menace pour la sécurité nationale et régionale (Energy News, 2025 ; Greaves et Gricius, 2026), y compris par certains acteurs du secteur de la MRS (Gunnarsson, 2026 ; Smith et al., 2024). Néanmoins, cette sécurisation des changements climatiques ne fait pas consensus : la Russie et, dans une moindre mesure, la Chine se montrent plus timides à inscrire les transformations climatiques de l'Arctique dans une rhétorique de sécurité nationale ou régionale (Zhou, 2017). L'administration Trump II, quant à elle, nie l'existence des changements climatiques tout en reconnaissant les transformations environnementales à l'œuvre dans la région, et leurs implications économiques et stratégiques. D'autre part, l'Arctique est marqué par la rivalité stratégique entre la Russie et les États membres de l'OTAN, qui s'illustre par une militarisation croissante (Foreign Policy, 2020) et une érosion progressive de l'« exceptionnalisme arctique » (Lozier, 2022).

La région se caractérise ainsi par l'interaction de plusieurs acteurs, de conceptions concurrentes de la sécurité et par l'identification de menaces de nature différente. **Cette pluralité de perceptions est susceptible d'influencer les conditions dans lesquelles les décisions entourant le développement de l'IAS pourraient être prises et, par conséquent, de susciter des contestations.** À titre d'exemple, pour l'Islande, qui a déclaré l'effondrement de l'AMOC comme un enjeu de sécurité existentielle (Energy News, 2025), le développement de l'IAS pourrait être justifié comme une mesure de sécurité nationale. Mais cette décision « ne serait pas nécessairement acceptée par les États-Unis, qui perçoivent l'Arctique comme un espace hautement important sur le plan stratégique. Cela pourrait inciter une administration républicaine et conservatrice aux États-Unis à investir dans le développement de l'IAS afin de préserver un avantage stratégique et de maintenir un sentiment de primauté dans la région.⁵¹ Une administration démocrate future pourrait aussi parvenir à justifier le développement de l'IAS, afin de rétablir un leadership climatique. (...) Pour la Russie, le développement de l'IAS pourrait relever d'un enjeu de présence, de reconnaissance, dans une région constituant son environnement immédiat » (Young, 2026).

⁵⁰ L'Arctique se réchauffe presque trois fois plus rapidement que la moyenne mondiale, entraînant une fonte des glaciers et de la banquise, un dégel du pergélisol ainsi qu'une augmentation des précipitations et des feux de forêt (AMAP, 2024). Ces transformations ont également des conséquences à l'échelle globale, notamment sur l'albédo, le niveau des mers et la circulation océanique. Pour ces raisons, l'Arctique est fréquemment présenté dans les travaux consacrés à la MRS, y compris l'IAS, comme un « grand bouclier blanc » (Kornbech et al., 2024), dont la préservation devrait permettre de limiter les risques associés au franchissement de plusieurs points de bascule climatiques.

⁵¹ Ce positionnement serait cohérent avec l'importance nouvelle accordée, dans la *National Security Strategy* de 2025 à l'hémisphère occidental en tant que zone d'influence prioritaire des États-Unis (The White House, 2025).

Dans un tel environnement, les activités liées à l'IAS pourraient ainsi acquérir une portée stratégique, susceptible de susciter des soupçons et de la méfiance, et d'alimenter des pratiques de désinformation (Young, 2026). Selon les acteurs concernés, une même activité pourrait être interprétée comme une réponse aux changements climatiques, mais aussi comme un acte susceptible de modifier l'équilibre stratégique régional en raison des usages duels de la logistique afférente, dont l'usage d'outils de surveillance (Corry, 2024 ; Young, 2026).⁵² Ces enseignements présentent des implications pour la France et ses armées, y compris en l'absence de participation française au développement de l'IAS. L'émergence de capacités d'IAS dans la région pourrait en effet nécessiter de renforcer les capacités de détection et de surveillance permettant d'identifier les activités conduites, leurs auteurs et leurs effets. Elle pourrait également affecter l'environnement stratégique dans lequel les forces françaises et alliées seraient amenées à opérer dans cette région considérée comme une zone d'intérêt prioritaire.

⁵² Un travail de recherche récent montre d'ailleurs que, lors de simulations de négociations internationales relatives à la MRS, les questions relatives aux enjeux de compétition géostratégique prennent très largement et très rapidement le pas sur les considérations climatiques (Young et al., 2026).

CONCLUSION

Les dynamiques de structuration du secteur de la MRS sont porteuses d'enjeux géopolitiques pour la France et l'UE. D'abord, la montée en puissance d'acteurs privés portant un agenda politico-idéologique et la concentration des pôles d'activités et de financements de la MRS dans un nombre limité de pays soulèvent des enjeux de souveraineté, d'autonomie stratégique et d'influence. Ensuite, les débats que suscitent les asymétries de financement entre les pays en développement et les pays développés alimentent des risques d'instrumentalisation des vulnérabilités climatiques de ces pays, susceptibles d'affecter la crédibilité et le leadership climatique de la France et de l'UE. **Dans ce contexte, la capacité de la France et de l'UE à développer une expertise propre sur la MRS constitue un enjeu stratégique,** tant pour appréhender l'ampleur des effets géophysiques et socio-politiques de ces technologies que pour être en capacité d'influencer les débats relatifs à leur gouvernance.

L'IAS est la méthode de MRS qui suscite le plus d'intérêt, attire le plus de financements et présente les plus faibles barrières techniques. Or, ses attributs sont susceptibles de favoriser son intégration dans des logiques de sécurité. D'une part, la répartition inégale des capacités nécessaires à son développement est porteuse d'enjeux géopolitiques qui demeurent trop peu explorés. D'autre part, la sécurisation des changements climatiques et la priorisation de la gestion de leurs effets plutôt que de leurs causes peuvent créer des conditions propices à l'appropriation de l'IAS comme réponse politique, voire comme mesure de sécurité. Enfin, ses effets environnementaux théoriques en font un instrument de puissance potentiel. **L'IAS doit ainsi être appréhendée comme un objet de compétition géostratégique, alors qu'elle dispose d'un potentiel d'arsenalisation et d'instrumentalisation.**

Les enseignements de cette note renforcent la nécessité d'une mobilisation politique française et européenne. L'absence de barrières techniques majeures à la réalisation d'expériences à petite échelle dans le très court terme, conjuguée à l'essor des récits contribuant à légitimer la MRS, contraste avec les lacunes françaises et européennes en matière de recherche et d'activités d'influence, ainsi qu'avec les limites des capacités de détection et de surveillance à l'échelle globale. **Le renforcement de ces dernières apparaît dès lors prioritaire⁵³ afin de pouvoir identifier les activités conduites, leurs auteurs et leurs effets, notamment dans les cadres européens et otaniens.** Pour l'UE, cet effort peut également constituer une opportunité de leadership et d'influence en proposant de fournir des données fiables sur la détection et la surveillance de l'IAS, et plus largement de la MRS.

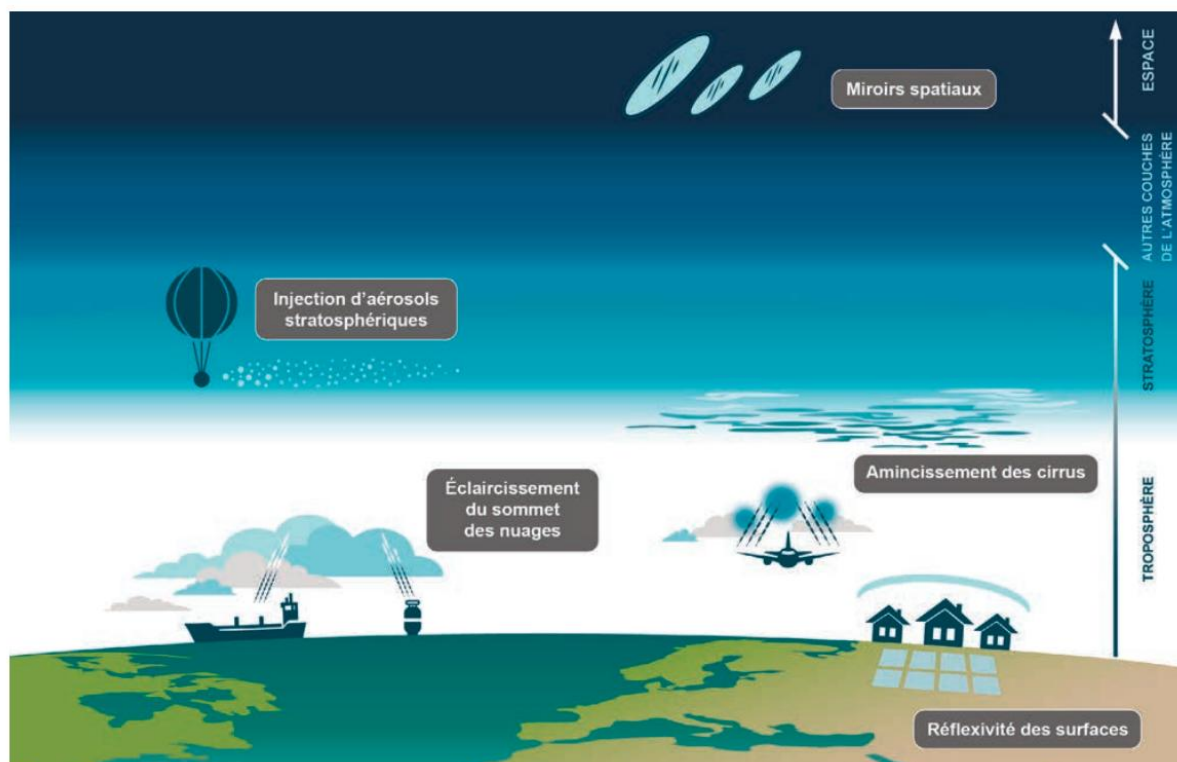
Pour la France et l'UE, l'enjeu est de préserver leur capacité à évaluer, de manière indépendante, les implications de la MRS et les évolutions de ce secteur controversé. Pour

⁵³ La Commission européenne a récemment annoncé le financement, à hauteur de 10 millions d'euros dans le cadre d'Horizon Europe, de recherches portant sur les capacités de détection, de surveillance, de modélisation et d'attribution liées à la MRS (European Commission, 2026).

les armées françaises, cette exigence revêt une importance particulière : un éventuel développement ou déploiement de la MRS pourrait modifier leur environnement stratégique et opérationnel, y compris en l'absence de participation française à ces activités. **La préservation d'une liberté d'évaluation suppose dès lors de pouvoir mobiliser une expertise indépendante et des moyens propres.** Cela constitue une condition de l'autonomie de décision française et européenne dans un environnement où les dimensions climatiques et géopolitiques de ces technologies pourraient devenir de plus en plus étroitement imbriquées.

ANNEXES

Annexe 1. Les principales méthodes de modification du rayonnement solaire (MRS).



Source : Académie des Sciences. (2025). *Géo-ingénierie climatique : état des lieux scientifique, enjeux et perspectives.*

La géo-ingénierie solaire, ou modification du rayonnement solaire (MRS), regroupe une diversité de méthodes ayant pour objectif commun d'abaisser la température moyenne globale en ayant recours à des dispositifs techniques et/ou chimiques destinés à réfléchir ou à bloquer une partie du rayonnement solaire. Certaines interventions visent à augmenter le pouvoir réfléchissant (albédo) des surfaces terrestres et océaniques, notamment par l'utilisation de **peintures blanches sur les surfaces urbaines** (toits, sols) ou par **l'épaississement de la glace de mer (Sea-Ice Thickening)**. D'autres cherchent à modifier les propriétés réfléchissantes des nuages : **l'amincissement des cirrus** vise à réduire leur opacité, tandis que **l'éclaircissement des nuages** marins vise à augmenter leur pouvoir réfléchissant par l'injection de particules à basse altitude. **L'injection d'aérosols dans la stratosphère (Stratospheric Aerosol Injection — IAS)** consiste à introduire des aérosols réfléchissants à haute altitude afin d'accroître la réflexion d'une partie du rayonnement solaire. Enfin, certaines propositions envisagent d'agir directement dans l'espace, notamment au moyen de **dispositifs réfléchissants placés en orbite entre la Terre et le Soleil**.

Annexe 2. Risques naturels et humains des principales méthodes de modification du rayonnement solaire.

Technique	Risques sur le système Terre	Risques sur la sécurité humaine
Éclaircissement des nuages marins	- Dérèglement des précipitations et des températures (sécheresses en Amérique du Sud, multiplications des pluies tropicales) (Grisé et al., 2021). - Persistance des impacts associés à l'augmentation du niveau de CO₂. - Baisse de la photosynthèse impactant le taux d'humidité, les précipitations et les concentrations en dioxygène locales (Sacha, 2022). - « Choc terminal » en cas d'arrêt (cf. I, 2, b.) : hausse brutale des températures à laquelle les écosystèmes ne pourront s'adapter.	- Réduction des rendements agricoles⁹(Sacha, 2022) - Réduction de la productivité primaire en Amazonie, et faible augmentation en Afrique (dérèglement des précipitations) (Jones et al., 2009 ; 2011). - Perte de services écosystémiques (baisse de la photosynthèse). - Risques sanitaires liés aux changements de température¹⁰ (Swiss Re, 2023). - Baisse de la qualité de l'air. - « Choc terminal » en cas d'arrêt (cf. I, 2, b.) : hausse brutale des températures à laquelle les sociétés humaines ne pourront s'adapter.
Amincissement des cirrus	- Dérèglement des précipitations (intensification des précipitations dans le Sahel et de la mousson en Inde) (Gasparini et al., 2020). - Amplification du réchauffement climatique si les techniques sont menées dans des zones avec une faible couverture nuageuse ainsi qu'une humidité relativement élevée (Peters et al., 2011) ou en cas d'injection trop importante de particules (Gasparini et al., 2020). - Persistance des impacts associés à l'augmentation du niveau de CO₂. - Baisse de la photosynthèse impactant le taux d'humidité, les précipitations et les concentrations en dioxygène locales (Sacha, 2022). - « Choc terminal » en cas d'arrêt (cf. I, 2, b.) : hausse brutale des températures à laquelle les écosystèmes ne pourront s'adapter.	- Risques sanitaires liés aux changements de température (Swiss Re, 2023). - Perte de services écosystémiques (baisse de la photosynthèse). - « Choc terminal » en cas d'arrêt (cf. I, 2, b.) : hausse brutale des températures à laquelle les sociétés humaines ne pourront s'adapter.
Injection d'aérosols stratosphériques	- Dégradation de la couche d'ozone (Lawrence et al., 2018). - Dérèglement des précipitations (notamment, sécheresses en Afrique sub-saharienne, en Méditerranée et en Inde, pluies torrentielles et inondations au Brésil ou en Europe du Nord)	- Réduction des rendements agricoles (Proctor et al. 2018)¹². - Risques sanitaires liés aux substances diffusées¹³ - Risques sanitaires liés aux changements de température.

⁹ En lien avec une baisse de la photosynthèse des cultures, mais aussi des températures et des précipitations.

¹⁰ La modification des températures et des régimes de précipitations pourrait entraîner le déplacement des zones géographiques de certaines maladies telles que la malaria, proliférant dans de nouvelles zones (Carlson et al., 2022).

¹² Certaines études mettent en lumière des risques de réduction des rendements agricoles suite à une opération d'injection d'aérosols stratosphériques, ce dans les régions où la productivité est fortement déterminée par le système des moussons d'été, notamment en Asie de l'Est (Robock et al., 2008 ; Tilmes et al., 2013).

¹³ L'acide sulfurique, notamment, est extrêmement toxique (Lawrence et al., 2018). Le soufre pourrait par ailleurs retomber sous forme de précipitations acides (Chalecki & Ferrari, 2018).

	(Baughman et al., 2012 ; Jones et al., 2022 ; Grisé et al., 2021). - Multiplication des ouragans dans l'Atlantique Nord (Grisé et al., 2021). - Variabilité des effets selon le lieu d'injection¹¹. - Interférence avec El Nino, l'Oscillation Nord Atlantique, l'Oscillation Quasi Béniale, le vortex polaire ainsi que la circulation Brewer-Dubson (Aquila et al., 2014 ; Jadwiga et al., 2018 ; Jones et al., 2022). - Persistance des impacts associés à l'augmentation du niveau de CO₂ et risque d'annulation des bénéfices induits par le SRM par la dégradation de la couverture nuageuse sous l'effet des GES (Schneider et al., 2020). - Baisse de la photosynthèse impactant le taux d'humidité, les précipitations et les concentrations en dioxygène locales (Sacha, 2022). - « Choc terminal » en cas d'arrêt (cf. 1, 2, b.) : hausse brutale des températures à laquelle les écosystèmes ne pourront s'adapter.	- « Choc terminal » en cas d'arrêt (cf. 1, 2, b.) : hausse brutale des températures à laquelle les sociétés humaines ne pourront s'adapter.
Miroirs spatiaux	- Variations régionales des effets selon le positionnement des miroirs et les régions ombragées ou non (Sánchez & McInnes, 2015). - Modifications extrêmes du climat dans les zones terrestres aux températures et à l'écosystème fortement impactés par les radiations solaires (tropiques et pôles), qui impliquent en cascade les effets suivants : ➔ Dérèglement des précipitations (Nations Unies, 2023) ➔ Réduction de l'amplitude du cycle saisonnier (Nations Unies, 2023) ➔ Baisse de la photosynthèse impactant le taux d'humidité, les précipitations et les concentrations en dioxygène locales (Sacha, 2022) - Les objets placés à L1 sont relativement stables, mais risquent de sortir de leur axe¹⁰. Sans intervention (remplacement ou remplacement) les miroirs sortiront de leur axe après un certain temps (Siegel, 2020 ; European Space Agency, 2023). - « Choc terminal » en cas d'arrêt (cf. 1, 2, b.) : hausse brutale des températures à laquelle les écosystèmes ne pourront s'adapter.	- Réduction des rendements agricoles, mais pas d'interférence chimique avec la biosphère terrestre (Sacha, 2022). - Risques sanitaires liés aux changements de température. - « Choc terminal » en cas d'arrêt (cf. 1, 2, b.) : hausse brutale des températures à laquelle les sociétés humaines ne pourront s'adapter.

¹¹ Des aérosols injectés dans l'hémisphère nord pourraient créer de fortes sécheresses en Afrique sub-Saharienne ainsi qu'en Inde. Une injection dans l'hémisphère sud pourrait engendrer un effondrement du système pluvial au Brésil ainsi qu'une augmentation des ouragans dans l'Atlantique nord (Grisé et al., 2021).

Source : De Guglielmo et al. (2023). *Géo-ingénierie solaire : enjeux géostratégiques et de défense.*
Observatoire Défense et Climat.

BIBLIOGRAPHIE

Articles scientifiques et autres analyses

Bonditti, P. et Kabbej, S. (2020). Climat, défense et sécurité : la pensée de l'équilibre face à l'urgence « climato-environnementale » Les Champs de Mars, 35(2), 151-177. <https://doi.org/10.3917/lcdm.035.0151>.

Brent, K., Simon, M., & McDonald, J. (2025). From informal to formal governance of solar radiation management. *Climate Policy*, 25(6), 947–964. <https://doi.org/10.1080/14693062.2024.2430688>

Collomb, J-D. (2020). Fifteen Years of Controversy on Solar Geoengineering in the United States, Canada, the United Kingdom and Australia. *Cahiers François Viète. III-9*. 199-230. <https://doi.org/10.4000/cahierscfv.538>

Corry, O., McLaren, D. & Kornbech, N. (2024). Scientific models verses power politics: How security expertise reframes solar geoengineering. *Review of International Studies*. 1-20. <https://doi:10.1017/S0260210524000482>

Corry, O. et McLaren, D. (2025). Solar geoengineering research faces geopolitical deadlock. *Science*. 387. 28-30. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adr9237>

Cheng, W. (2025). Patenting the Sun. Possible exclusion of SRM technologies from patenting and risk regulation. *European Journal of Risk Regulation*. 16(4):1306-1325. <https://doi:10.1017/err.2025.10066>

Duffey, A., Henry, M., Smith, W., Tsamados, M., & Irvine, P. J. (2025). Low-altitude high-latitude stratospheric aerosol injection is feasible with existing aircraft. *Earth's Future*. 13. <https://doi.org/10.1029/2024EF005567>

Greaves, W. et Gricius, G. (2026). The fragmented Arctic: Comparing Arctic security public opinion in Russia and the A7. <https://www.cambridge.org/core/journals/polar-record/article/fragmented-arctic-comparing-arctic-security-public-opinion-in-russia-and-the-a7/49CEA8AAB26DF36C932BD2D661EF394C>

Hack, M., McNeill, V.F., Steingart, D. *et al.* (2025). Engineering and logistical concerns add practical limitations to stratospheric aerosol injection strategies. *Sci Rep* 15. 34635 <https://doi.org/10.1038/s41598-025-20447-2>

Horton, J.B., Smith, W. and Keith, D.W. (2025). Who Could Deploy Stratospheric Aerosol Injection? The United States, China, and Large-Scale, Rapid Planetary Cooling. *Global Policy*, 16: 514-524. <https://doi.org/10.1111/1758-5899.70015>

Horton, J.B. (2026). Joshua B. Horton; Solar Geoengineering as a Status Symbol in International Politics. *Global Environmental Politics*. <https://doi.org/10.1162/GLEP.a.777>

Kabbej, S. (2025). Climate change and security in France. PhD Thesis, School of Political Science and International Studies, The University of Queensland. <https://doi.org/10.14264/62e843d>

Kornbech, N., Corry, O. et McLaren, D. (2024). Securing the 'great white shield' ? Climate change, Arctic security and the geopolitics of solar geoengineering. *Cooperation and Conflict*. 60 (2). 286-307. <https://doi.org/10.1177/00108367241269629>

Määttänen, A., Ravetta, F., Bureau, J., Lurton, T., Boucher, O. (2026). Idealized modeling of stratospheric aerosol injection deployment scenarios with two non-cooperative actors. *Environ. Sci. Atmos.* 6 (3): 324–337. <https://doi.org/10.1039/d5ea00022j>

McDonald, M. (2013). Discourses of Climate Security. *Political Geography*. 33. 42-51. <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2013.01.002>

McDonald, M. (2024). Climate change, security and the institutional prospects for ecological security. *Geoforum*. 155. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2024.104096>

McLaren, Duncan. (2024). "It's not the climate, stupid!": exploring nonideal scenarios for solar geoengineering development. *Ethics & International Affairs*. 38 (3). 255-274. <https://doi:10.1017/S089267942400025X>

Michaelowa, A. (2021). Solar Radiation Modification – A « Silver Bullet » climate policy for populist and authoritarian regimes ?. *Global Policy*. 12 (1). <https://doi.org/10.1111/1758-5899.12872>

Möller, I. et Young, D.N. (2026). Why we need to explore conflict and competition around solar geoengineering. *PLOS Clim*. 5 (4). <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000869>

Ruddigkeit, D., Buggink, H., & Gupta, A. (2025). Solar Geoengineering Governance : a Fragmented Institutional Landscape Covering Multi-Dimensional Impacts. *European Journal of Risk Regulation*. 16. 1294-1035. <https://doi.org/10.1017/err.2025.10048>

Salawitch, R. J., Smith, J. B., Selkirk, H., Wargan, K., Chipperfield, M. P., Hossaini, R., Levelt, P. F., Livesey, N. J., McBride, L. A., Millán, L. F., Moyer, E., Santee, M. L., Schoeberl, M. R., Solomon, S., Stone, K., & Worden, H. M. (2025). The Imminent Data Desert: The Future of Stratospheric Monitoring in a Rapidly Changing World. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 106(3). E540-E563. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0281.1>

Siegerts et al. (2025). Safeguarding the polar regions from dangerous geoengineering: a critical assessment of proposed concepts and future prospects. *Frontiers*. (3). <https://doi.org/10.3389/fsci.2025.1527393>

Smith, W. & Wagner, G. (2018). Stratospheric Aerosol Injection Tactics and Costs in the First 15 Years of Deployment. *Environmental Research Letters* 13: 124001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae98d>

Smith, W., Bartels, M. F., Boers, J. G., & Rice, C. V. (2024). On thin ice: Solar geoengineering to manage tipping element risks in the cryosphere by 2040. *Earth's Future*. 12. e2024EF004797. <https://doi.org/10.1029/2024EF004797>

Smith, W., Alberola, M., Boers, J.G., Rosenlof, K.H et Visioni, D. (2026). On the detectability by uninvolved parties of covert stratospheric aerosol injection programs producing transboundary impacts. *Environmental Research*. 5. <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ae7148>

Sovacool, B.J. Baum, C et Low, S. (2023). The next climate war? Statecraft, security, and weaponization in the geopolitics of a low-carbon future. *Energy strategy reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101031>

Surprise, K. (2020). Geopolitical ecology of solar geoengineering: from a 'logic of multilateralism' to logics of militarization. *Journal of Political Ecology*. 27 (1). 213-235. <https://doi.org/10.2458/v27i1.23583>

Surprise, K., McLaren, D., Möller, I., Sapinski, J.B., Stabinski, D. et Stephens, J.C. (2025). Profit-seeking solar geoengineering exemplifies broader risks of market-based climate governance. *Earth System Governance*. 23. <https://doi.org/10.1016/j.esg.2025.100242>

Vogler, A. (2023). Barking up the tree wrongly? How national security strategies frame climate and other environmental change as security issues. *Political Geography*. 105. 1-11 <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2023.102893>

Von Lucke, F. (2015). The Securitisation of Climate Change in the United States: The Integration of Climate Threats Into the Security Sector. *Working Papers Series*. 1-42. 298 https://climateandsecurity.org/wpcontent/uploads/2019/08/the_securitisation_of_climate_change_in.pdf

Von Lucke, F. (2023). Climate Security Discourses in Germany: The Transformation of Climate Change Towards a Development and Foreign Policy Priority. In *Climate Security in the Anthropocene*. 131–161. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26014-8_7

Young, D. N. (2023). Considering stratospheric aerosol injections beyond an environmental frame: The intelligible 'emergency' techno-fix and preemptive security. *European Journal of International Security*. 8(2). 262–280. [10.1017/eis.2023.4](https://doi.org/10.1017/eis.2023.4)

Zhao, M., Cao, L., Vioni D. et McMartin, DG. (2025). Response of Tipping Elements to Different Strategies of Stratospheric Aerosol Injection. *Earth's Future*. 13 (12). <https://doi.org/10.1029/2025EF006736>

Zhang Y, MacMartin DG, Vioni D, et al. (2024). Hemispherically symmetric strategies for stratospheric aerosol injection. *Earth System Dynamics*. 15(2):191-213. <https://doi.org/10.5194/esd-15-191-2024>

Rapports et notes

Académie des Sciences. (2025). Géo-ingénierie climatique : état des lieux scientifique, enjeux et perspectives. https://www.academie-sciences.fr/sites/default/files/2025-10/rapport%20G%C3%A9oing%C3%A9ni%C3%A9rie_LD.pdf

ACCF. (2026). The national security case for U.S leadership in SRM technology. https://accf.org/wp-content/uploads/2026/05/ACCF_SRM_TechnologyV5.pdf

AMAP. (2025). Arctique climate change update 2024 : key trends and impacts. Summary for polic-makers. <https://www.amap.no/documents/download/7310/inline>

Bisset, M. et Dyke, J. (à paraître en 2026). The Dei Ex Machina for climate change: Geoengineering, AI and Big Tech. Carnegie Europe.

Bowen, R. (2026). PRC intends to boost role in solar radiation modification. *American Council on Capital Formation*. https://accf.org/wp-content/uploads/2026/09/ACCF_SRM_China-FINAL-2.pdf

Chalecki, E. (2026). Potential security implications of climate intervention technologies for NATO. 10 (5). Balsillie Papers. <https://balsilliepapers.ca/wp-content/uploads/2026/07/Balsillie-Paper-Chalecki.pdf>

de Guglielmo, M., Kabbej, S et Hebbel-Boutang, L. (2023). Géo-ingénierie solaire : enjeux géostratégiques et de défense. Observatoire Défense et Climat. https://defenseclimat.fr/wp-content/uploads/2023/11/Note_5_Obs-DC_Geo-ingenierie_VF.pdf

de Guglielmo, M. et Jash, A. (2025). Chinese cloud seeding practices on the tibetan plateau. Towards new forms of hydrohegemony and security dilemma. IRSEM. https://www.irsem.fr/storage/file_manager_files/2025/03/nr-irsem-146-guglielmo-cloud.pdf

Duffau, E., Jourde, M. et Guillaume, S. (2026). Désinformation climatique et guerre informationnelle : ingérences étatiques et enjeux sécuritaires. Observatoire Défense et Climat. https://defenseclimat.fr/wp-content/uploads/2026/06/ObsDefClim_2026_04_Desinformation_Note.pdf

Gemenne, F., Tasse, J., Kabbej, S. et Monange, R. (2021). Intégration des enjeux climato-environnementaux par les forces armées. Observatoire Défense et Climat. <https://www.iris-france.org/wp-content/uploads/2021/03/RE15-202101-Integration climat forces armees defense climat-rapport-15.pdf>

GIEC. (2019). Extremes, Abrupt Changes and Managing Risk. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 589–655. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.008>

Jourde, M., Duffau, E., Kabbej, S. et Buchot, D. (2025). L'utilisation stratégique des vulnérabilités climatiques dans les conflits contemporains : modalités et rétroactions. Observatoire Défense et Climat. <https://www.iris-france.org/lutilisation-strategique-des-vulnerabilites-climatiques-dans-les-conflits-contemporains-modalites-et-retroactions/>

Jourde, M., Buchot, D., et Collet, M. (2026). Point de bascule amazonien : enjeux sécuritaires des changements climatiques et de la déforestation de la forêt amazonienne. Observatoire Défense et Climat. https://defenseclimat.fr/wp-content/uploads/2026/01/ObsDefClim_2025_06_01_Amazonie_Note_VF.pdf

Haywood J., Tilmes S., (Lead Authors), F. Keutsch, et al. (2022). Stratospheric Aerosol Injection and its Potential Effect on the Stratospheric Ozone Layer, Chapter 6 in Scientific Assessment of Ozone Depletion GAW Report No. 278, 509 pp., WMO, Geneva. https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2022/downloads/Chapter6_2022OzoneAssessment.pdf

Lazard, O. (2026a – à paraître en 2026). Compilation on Geopolitics of Geoengineering. Carnegie Europe. À paraître.

Parlement Européen. (2026). Options for the responsible governance of research on solar radiation modification. Briefing. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2026/789310/EPRS_BRI\(2026\)789310_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2026/789310/EPRS_BRI(2026)789310_EN.pdf)

Lozier, J. (2022). Arctique : vers la fin de l'exception ? Enjeux stratégiques, nucléaires et maritimes. IFRI. https://www.ifri.org/sites/default/files/migrated_files/documents/atoms/files/lozier_arctique_2022.pdf

Rainey Center et Silverlining. (2026). Protecting American Weather Sovereignty. Strategies for a Safe and Secure Atmosphere. <https://static1.squarespace.com/static/63583aa27052940c5faeec7d/t/69b0cca6607c331dc2e29196/1773194406974/Protecting+American+Weather+Sovereignty.pdf>

Robock, A. (2020). Benefits and Risks of Stratospheric Solar Radiation Management for Climate Intervention (Geoengineering). *The Bridge*. <https://climate.envsci.rutgers.edu/pdf/RobockBridge.pdf>

Royal Society. (2025). Solar radiation modification. Policy Briefing. <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/solar-radiation-modification/solar-radiation-modification-policy-briefing.pdf>

Spector, A., Kislev, T., Segev, Y., Yedvab, Y. et Waxman, E. (2026). Composite sub-micron solid particles engineered to enable safe, controllable, efficient, and practical SAI. <https://arxiv.org/abs/2606.15955>

Tasse, J et Collet, M. (2025). Implications sécuritaires et de défense des points de bascule climatique AMOC. Observatoire Défense et Climat. https://defenseclimat.fr/wp-content/uploads/2025/06/ObsDefClim_2025_05_9_AMOC_Note_VF.pdf

TCCRI. (2026). Clearing the Air: An Analysis of Weather Modification, Old and New. <https://www.txccri.org/single-post/clearing-the-air-an-analysis-of-weather-modification-old-and-new>

The White House. (2025). National Security Strategy of the United States of America. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2025/12/2025-National-Security-Strategy.pdf>

Young, D.N., Yao, J., Considine, L., et Golja, C. (2026 – à paraître en 2026). Comprehensive Report Negotiating Solar Radiation Modification Governance: Evidence from Non-Ideal Simulations.

Zhou, J. (2017). National climate-related security policies of the permanent members of the United Nations Security Council. Working Paper. SIPRI. https://www.sipri.org/sites/default/files/2018-03/p5_climate_security_wp.pdf?utm_source=chatgpt.com

Actualités, Presse et Revues

Benoit, F. (2024, 3 mars). Asma Mhalla : « Les Big Tech ont un projet de contrôle total du monde et du futur ». Usbek & Rica. <https://usbeketrica.com/fr/article/asma-mhalla-les-big-tech-ont-un-projet-de-controle-total-du-monde-et-du-futur>

De Freitas, W. (2025, 5 juin). UK funds controversial climate-cooling research. *The Conversation*. <https://theconversation.com/uk-funds-controversial-climate-cooling-research-258210>

Duffau, É., Jourde, M. et Kabbaj, S. (2025). L'intégration des changements climatiques dans les pratiques de guerre hybride. *Revue internationale et stratégique*. 140(4). 103-112. <https://doi.org/10.3917/ris.140.0103>.

Energy News. (2025, 12 novembre). Iceland's view of the Atlantic Ocean current collapse as a security and existential risk. <https://energynews.oedigital.com/climate-change/2025/11/12/icelands-view-of-the-atlantic-ocean-current-collapse-as-a-security-and-existential-risk>

Gruener, D. et Visioni, D. (2026, 6 janvier). We can safely experiment with reflecting sunlight away from Earth. Here's how. <https://www.theguardian.com/commentisfree/2026/jan/06/reflecting-sunlight-climate-crisis-heating>

Hebebrand, C., Glauber, J., Vos, R. et Rice, B. (2026, 1 avril). The Iran war's impacts on global fertilizer markets and food production. IFPRI. <https://www.ifpri.org/blog/the-iran-wars-impacts-on-global-fertilizer-markets-and-food-production/>

Hiar, C. (2025, 26 décembre). Betting on climate failure, these investors could earn billions. *Politico*. <https://www.politico.com/news/2025/12/26/betting-on-climate-failure-investors-could-earn-billions-00677281>

King, S. (2025, 7 mai). UK experiments to reflect sunlight one step closer. *BBC*. <https://www.bbc.com/weather/articles/c5ygydeqq08o>

Lelièvre, A. (2026, 5 mars). « A revenus équivalents, il y a quasiment un facteur dix en termes de valorisation » : l'informatique quantique, la nouvelle bataille entre l'Europe et les Etats-Unis. *Les Échos*. <https://www.lesechos.fr/start-up/ecosysteme/a-revenus-equivalents-il-y-a-quasiment-un-facteur-dix-dans-linformatique-quantique-la-nouvelle-bataille-entre-leurope-et-les-etats-unis-2219369>

Mathiesen, K et Hiar, C. (2025, 19 novembre). The behind-the-scenes, strange and totally real plot to blot out the sun and halt global warming. *Politico*. <https://www.politico.com/news/magazine/2025/11/21/stardust-geoengineering-janos-pasztor-regulations-00646414>

Noyon, R. (2026, 22 avril). « Un déploiement apaisé de la géo-ingénierie est le moins probable de scénarios ». 420ppm. <https://420ppm.substack.com/p/un-deploiement-apaise-de-la-geo-ingenierie>

Pasztor, J. et Talati, S. (2025, 19 décembre). Private geoengineering comes at a cost, and that cost is public. *Le Monde*. https://www.lemonde.fr/en/opinion/article/2025/12/19/private-geoengineering-comes-at-a-cost-and-that-cost-is-public_6748677_23.html?srsltid=AfmBOopqN0pYdmzcS8edimcL9R-Y7lwTpLBwMNjTZ6AzQh_6Zd0PfjyQ

Pages Web

ACIRH. (2026, 14 août). Ghana hosts Africa's first technical workshop on Solar Radiation Modification. <https://www.climate-research-africa.org/2026/08/14/ghana-hosts-africas-first-technical-workshop-on-solar-radiation-modification/>

ARIA. (2026, 5 août). Oversight and Governance. Exploring Climate Cooling. <https://aria.org.uk/opportunity-spaces/future-proofing-our-climate-and-weather/exploring-climate-cooling/oversight-and-governance>

Buck, H.J. (2025, 25 juin). Understanding and addressing « chemtrails ». Harvard Climate Brief. <https://salatainstitute.harvard.edu/understanding-and-addressing-chemtrails/>

Buck, H.J. (2026, 21 juillet). Selling Stability: The Problem with Pitching "Climate Stabilization" as a New Category of Climate Response. African Tech Future Lab. <https://africantechfutures.org/insights/selling-stability>

Chalmin, A. (2024, 16 juin). Global Southwashing: How The Degrees Initiative is imposing its solar geoengineering agenda onto climate research in the Global South. *Geoengineering Monitor*. <https://www.geoengineeringmonitor.org/the-degrees-initiative>

Climate Diplomacy. (2026, 4 mars). Climate security at the UN Security Council – a short history. <https://climate-diplomacy.org/magazine/conflict/climate-security-un-security-council-short-history>

Climate Intervention Research Letter. (2023, 27 février). An open letter regarding research on reflecting sunlight to reduce the risks of climate change. <https://climate-intervention-research-letter.org/>

Daly, T., Mastroleo, I. et Carabajal, M.I. (2025, 17 décembre). "Make Sunsets" in Mexico: Lessons for SRM Governance. <https://srm360.org/perspective/make-sunsets-in-mexico-lessons-for-srm-governance/>

Degrees Initiative. (2026, 5 août). Putting the global south at the centre of solar geoengineering research. <https://degrees.ngo/>

European Commission. (2026, 5 septembre). Detection, monitoring, modelling, and attribution capabilities for Solar Radiation Modification (SRM) activities and assessing their impacts on Earth's climate and ecosystems HORIZON-BRIDGING-2027-04-11. EU Funding & Tenders Portal. <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/HORIZON-BRIDGING-2027-04-11>

Foreign Policy. (2020, 14 décembre). Arctic competition. Part two : military buildup and great power competition. <https://foreignpolicy.com/2020/12/15/arctic-competition-defense-militarization-security-russia-nato-war-games-china-power-map/>

Gambill, P. (2026, 29 juillet). What We Mean by Stabilization. The Overshoot Era. <https://www.overshootera.com/p/what-we-mean-by-stabilization>

Gunnarsson, P. (2026, 13 mars). Iceland and the AMOC: When Existence Is at Stake. <https://srm360.org/perspective/iceland-amoc-existence-at-stake/> <https://srm360.org/perspective/iceland-amoc-existence-at-stake/>

Hassan, A. (2024). A Controversial SRM Resolution Was Withdrawn at UNEA-6: Here's Our Takeaway. <https://www.sgdeliberation.org/dsg-writing/a-controversial-srm-resolution-was-withdrawn-at-unea-6-heres-our-takeaway>

Henry, M. (2025, 15 juillet). What do climate models say about the impact of Stratospheric Aerosol Injection on the monsoons? <https://matthewjhenry.github.io/posts/2026/07/monsoons/>

Horton, J. et Irvine, P. (2024, 26 novembre). The Technical Feasibility and Costs of SAI. <https://srm360.org/article/technical-feasibility-and-costs-of-sai/#endnotes>

Horton, J. (2024, 26 novembre). Could SRM be weaponized ?. SRM 360. <https://srm360.org/article/could-srm-be-weaponised/>

Kabbej, S. (2026a, 20 février). How SRM intersects with geopolitics and security. DSG. https://www.sgdeliberation.org/dsg-writing/how-srm-intersects-with-geopolitics-and-security?utm_source=substack&utm_medium=email

Kabbej, S. (2026b, 24 juin). SRM as a tool for climate security : competitive framing and its (geo)political implications. DSG. <https://www.sgdeliberation.org/dsg-writing/srm-as-a-tool-for-climate-security-competitive-framing-and-its-geo-political-implications>

Keith, D et Visioni, D. (2025, 4 novembre). Why the For-Profit Race into Solar Geoengineering is Bad for Science and Public Trust. <https://climate.uchicago.edu/insights/why-the-for-profit-race-into-solar-geoengineering-is-bad-for-science-and-public-trust/>

Levitan, D. (2026a, 3 avril). Do new reports signal a shift in US conservatives' approach to SRM. <https://srm360.org/news-article/do-new-reports-signal-shift-in-us-conservatives/>

Levitan, D. (2026b, 12 juin). Planes for SAI May Be Closer and Cheaper Than Previously Thought. SRM360. <https://srm360.org/news-article/planes-for-sai-closer-cheaper-than-thought/>

Make Sunsets. (2025, 3 décembre). Le premier brevet de bébé. https://makesunsets.com/blogs/news/our-first-patent?utm_source=substack&utm_medium=email

Nwuneli, A. (2026, 26 mai). The Cultural Architecture of SAI: Systems, Resource Extraction, and Climate Justice. SRM360. <https://srm360.org/perspective/the-cultural-architecture-of-sai/>

Palestinian Initiative for Climate Strategy. (2025, 25 février). Palestinian Institute for Climate Strategy launches investigation into US-Israeli startup following concerns over potential violation of de facto geoengineering moratorium. <https://palclimateinitiative.org/publications/geoengineering-press-release>

Reflective. (2026, 11 août). Methodology. A framework for assessing and prioritizing uncertainties in SAI research. <https://uncertainties.reflective.org/methodology>

Science Media Center. (2025, 7 mai). Expert reaction to ARIA's announcement on research projects in the Exploring Climate Cooling programme. <https://www.sciencemediacentre.org/expert-reaction-to-arias-announcement-on-research-projects-in-the-exploring-climate-cooling-programme/>

Sikorsky, E. (2025, 22 septembre). A dose of realism : geopolitical and security dimensions of solar radiation modification. Center for Climate & Security. <https://climateandsecurity.org/2025/09/a-dose-of-realism-geopolitical-and-security-dimensions-of-solar-radiation-modification/>

SRM360. (2025a, 1 avril). A Growing Number of US States Consider Bills to Ban Geoengineering. <https://srm360.org/news-reaction/us-states-consider-bills-to-ban-geoengineering/>

SRM360. (2025b, 14 mai). SRM funding overview. <https://srm360.org/article/srm-funding-overview/#endnotes>

SRM360. (2025c, 13 mai). Funding Tracker. <https://srm360.org/funding-tracker/>

SRM360. (2025d, 18 juin). Outdoor Experiment Tracker. <https://srm360.org/outdoor-experiments/>

SRM360. (2026, 19 mai). Stardust Reveals Its Particles for Climate Cooling. <https://srm360.org/news-reaction/stardust-reveals-particles-for-climate-cooling/>

Temple, J. (2026, 17 juin). Hacking the atmosphere: Geoengineering gets a reality check. MIT Technology Review. https://www.technologyreview.com/2026/06/17/1138743/hacking-atmosphere-geoengineering-reality-check/?utm_source=tr_staff_outreach&utm_medium=tr_staff_social&utm_campaign=social&utm_content=gu_estbp

Vattioni, S. (2025, 17 mars). Alternative Particles Could Reduce the Side Effects of SAI. SRM 360. <https://srm360.org/perspective/alternative-particles-could-reduce-side-effects-sai/>

Ouvrages et chapitres d'ouvrages

Buzan, B., O. Waeber, and J. de Wilde. (1998). *Security: A New Framework for Analysis*. Boulder: Lynne Rienner

Oomen, J. (2025). Chapter 16 Solar Geoengineering as a Case-Study of Use, Non-use, and (Research) Governance. In *Non-use Measures for Global Goods and Commons in International Law*. Leiden, The Netherlands: Brill | Nijhoff. https://doi.org/10.1163/9789004730571_017

Sources multimédias

Bloomberg Live. (2024). OpenAI's Altman and Makanju on global implications of AI. <https://www.youtube.com/watch?v=GRioxTshI2E>

Communications personnelles

Baur, S. (2026, 19 août). Entretien en visioconférence avec Susanne Baur. Reflective.

Henry, M. (2026, 18 août). Entretien en visioconférence avec Matthew Henry. University of Exeter.

Lazard, O. (2026b, 5 août). Entretien en visioconférence avec Olivia Lazard. Fellow Carnegie Europe.

Visioni, D. (2026, 19 août). Entretien en visioconférence avec Daniele Visioni. Cornell University.

Wagner, H. (2026, 28 août). Entretien avec Hugo Wagner. Reflective (ancien directeur ingénierie).

Young, D.N. (2026, 18 août). Entretien en visioconférence avec Danielle Young. University of Leeds.

L'ANALYSE DES ENJEUX SÉCURITAIRES ET DE DÉFENSE LIÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

PUBLICATIONS | PODCAST « SUR LE FRONT CLIMATIQUE » | ÉVÈNEMENTS



www.defenseclimat.fr

