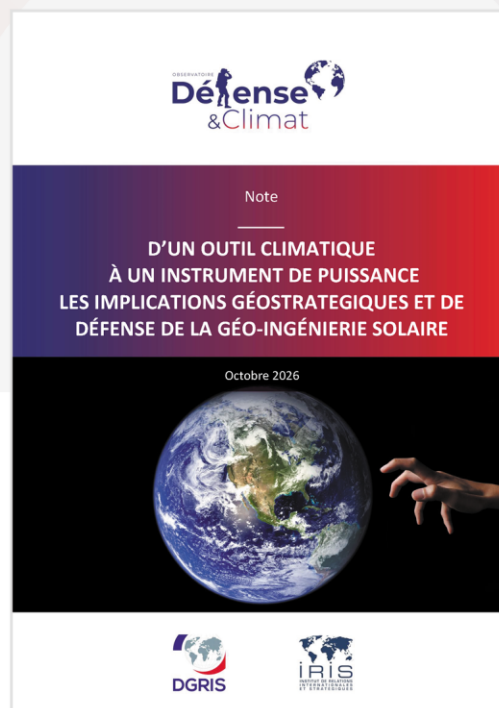


SYNTHÈSE

D'UN OUTIL CLIMATIQUE À UN INSTRUMENT DE PUISSANCE

LES IMPLICATIONS GÉOSTRATÉGIQUES ET DE DÉFENSE DE LA GÉO-INGÉNIERIE SOLAIRE



L'Observatoire Défense et 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'AUTEUR 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 techniques 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.

Dans le contexte de l'accélération des changements climatiques, les discours 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.

Cette note s'inscrit dans la continuité du rapport de **l'Observatoire Défense et Climat de 2023 sur les enjeux géostratégiques et de défense de la 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**.

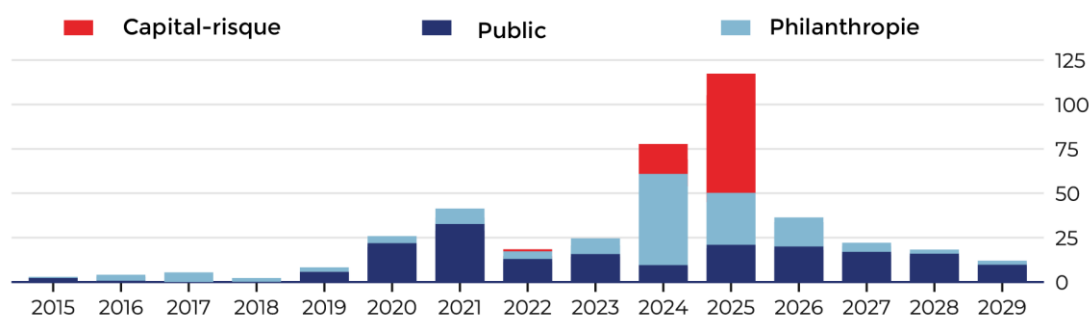
I. LA STRUCTURATION DU SECTEUR DE LA MRS ET SES IMPLICATIONS GÉOPOLITIQUES

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 ont été investis dans des activités de recherche, de plaidoyer et de sensibilisation, ainsi que de commercialisation de la MRS.¹ La majeure partie de ces financements, dont certains sont pluriannuels, a été octroyée depuis 2020. Cela témoigne d'un intérêt croissant pour ces méthodes visant à abaisser la température moyenne globale. **Cette croissance s'accompagne de deux transformations importantes dans la structuration du secteur, qui sont étroitement liées : la recomposition des sources de financement et l'émergence de start-ups**. La présence d'acteurs privés dans le secteur de la MRS marque une rupture dans sa structuration, et doit être comprise à la lumière de motivations économiques associées aux profits potentiels liés à la commercialisation de ces technologies.

¹ Les chiffres issus présentés dans cette note sont issus d'une collecte de données réalisée par l'IRIS.

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

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 et octroyés pour des activités relatives à la MRS sont très fortement concentrés dans les pays développés, respectivement 95% et 83%. Les États-Unis et le Royaume-Uni dominent les deux classements, tandis que l'Union européenne (UE), et notamment la France, demeure absente des premiers rangs. Cette dynamique de domination apparaît particulièrement dans l'écart entre les pays développés et les pays en développement.

Deuxièmement, les acteurs non étatiques sont particulièrement présents dans les structures de financement des activités relatives à la MRS. Bien que ces financements proviennent de sources diverses (organisations non gouvernementales et philanthropiques, individus fortunés, sociétés de capital-risque, fonds d'investissement), ils masquent une concentration des sources initiales de financement. De plus, la présence d'acteurs privés complique l'accès aux données relatives aux financements, certains d'entre eux refusant de communiquer ces informations.

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

Les dynamiques de structuration et de domination qui caractérisent le secteur de la MRS ont des implications géopolitiques qui concernent directement les intérêts stratégiques et diplomatiques de la France et de l'UE.

Premièrement, la présence de certains acteurs privés souhaitant commercialiser la MRS soulève des enjeux géopolitiques en raison des agendas techno-idéologiques qui sous-tendent leurs

investissements. Principalement situés aux États-Unis, ces acteurs considèrent la MRS comme un instrument au service de l'accélération technologique dans les domaines du numérique et de l'intelligence artificielle (IA). Dans ce contexte, le développement de la MRS pourrait s'inscrire dans des écosystèmes techno-industriels et idéologiques auxquels la France et l'UE restent extérieures, tout en étant affectées par leurs évolutions. **Lorsqu'elle est appréhendée comme un instrument au service de l'accélération technologique, la MRS 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 entraîne une concentration des capacités de production de connaissances et de récits sur ces technologies émergentes. 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. 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 et à surveiller d'éventuels déploiements et leurs effets. **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. Ces déficits pourraient également affecter la capacité diplomatique de la France et de l'UE, en réduisant leur capacité 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 suscite de vifs débats. Les pays les plus vulnérables aux changements climatiques doivent ainsi composer avec des logiques d'autonomisation et de souveraineté scientifique, tout en étant exposés à un risque 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.**

Figure 2 – 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. 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. **Les initiatives récentes visant à combler ces lacunes en termes de gouvernance se heurtent à des approches divergentes. Une approche prudente**, notamment défendue par l'UE, **et une approche plus permissive**, soutenue notamment par les États-Unis et l'Arabie saoudite. Ces divergences s'inscrivent dans les rapports de force plus larges qui structurent les négociations climatiques internationales. **Depuis 2019, on observe également une implication croissante des pays en développement et de la communauté scientifique dans les débats sur la gouvernance de la MRS.** Enfin, des initiatives d'encadrement de la MRS émergent à l'échelle nationale, néanmoins portées par des logiques très différentes.

Dans ce contexte marqué par des controverses et par l'échec des initiatives multilatérales, de nombreuses initiatives volontaires et informelles cherchent à définir les conditions d'une recherche sur la MRS qui pourrait être considérée comme étant conduite de manière responsable. 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. Alors que de nouvelles activités de recherche en extérieur sont prévues, **une question centrale pour la gouvernance de la MRS émerge : celle des critères retenus pour distinguer les activités de recherche de celles pouvant relever du déploiement**, qu'il s'agisse de l'intention des acteurs, des effets géophysiques et des conséquences sociales et politiques de ces activités.

II. 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.

Les connaissances actuelles indiquent, d'une part, qu'un déploiement affectant le fonctionnement du système climatique² aurait des effets géophysiques transfrontaliers et, d'autre part, que ceux-ci affecteraient les régimes météorologiques de manière différenciée selon les territoires. 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.

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 terminaison³ : 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.

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. 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.

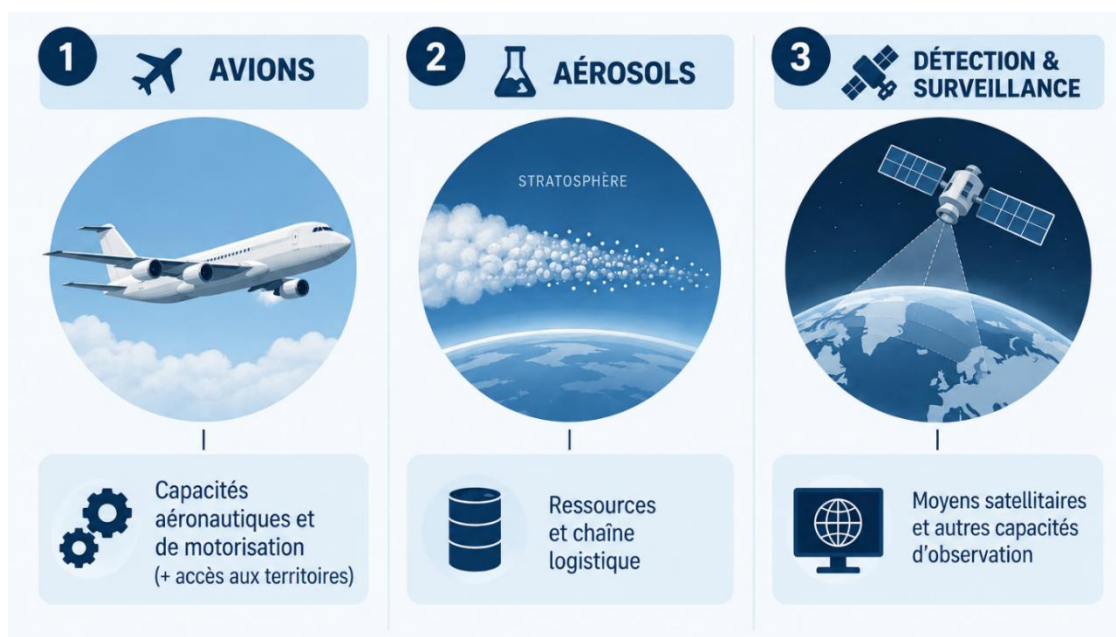
² Les effets d'un déploiement de l'IAS, y compris ceux transfrontaliers, dépendent de l'ampleur de la perturbation du système climatique, qui dépend notamment de la quantité d'aérosols libérée.

³ Cette terminologie est traduite de l'anglais « *termination shock* ». Il est aussi appelé risque de choc terminal.

L'IAS est aujourd'hui la méthode MRS qui suscite le plus d'intérêt et attire le plus de financements. 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 répartis de manière très inégale entre les États, et qui soulèvent des enjeux géopolitiques (cf. figure 3).

A. Les enjeux capacitaires d'une technologie aux effets transfrontaliers

Figure 3 – IAS : trois enjeux capacitaires aux répercussions géopolitiques



Le premier enjeu capacitaire concerne la disponibilité et l'adéquation des avions, faisant des industries aéronautiques et de motorisation des maillons indispensables à la réalisation d'activités de déploiement. Ces activités 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.

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

Le troisième enjeu capacitaire concerne l'accès et l'adéquation des dispositifs de détection et de surveillance d'un éventuel déploiement de l'IAS. Alors qu'un déploiement d'une ampleur suffisante

pour affecter le climat global serait théoriquement détectable par satellite, aucun pays ne dispose de capacités satellitaires permettant de détecter une injection non déclarée de petite échelle. La surveillance des effets d'un éventuel déploiement présente également d'importantes lacunes capacitaires et une répartition très inégale entre les États.

B. La sécurisation⁴ des changements climatiques favorise l'appropriation de l'IAS comme une mesure politique, voire une mesure de sécurité

L'articulation de 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 en effet présenter les attributs d'une solution politique concrète, visible et valorisable politiquement. Dans cette perspective, la rhétorique sécuritaire autour des changements climatiques pourrait contribuer à inscrire l'IAS dans une logique de sécurité préventive. Cette hypothèse doit également être appréhendée au regard de la primauté accordée à la souveraineté dans les logiques sécuritaires. Cette primauté pourrait favoriser des approches non coopératives autour de l'IAS.

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 renforcée par les transformations de l'environnement politique international, mais aussi par le potentiel de militarisation de l'IAS. Dans ce contexte, des désaccords pourraient émerger sur les objectifs et les modalités d'un déploiement, pouvant faire l'objet d'un recours à la contre-géoingénierie ou de réponses diplomatiques, coercitives et offensives, y compris sur les terrains militaires.

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

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.

L'IAS pourrait être développée et utilisée au service d'objectifs stratégiques et politiques dépassant largement les considérations climatiques pour lesquelles cette technologie a initialement été envisagée. 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 les caractéristiques d'un instrument de puissance.

Figure 4 – L'IAS comme instrument de puissance



Dans le contexte de compétition accrue entre États, le développement de l'IAS tend à s'inscrire dans une dynamique de compétition autour de la maîtrise d'une technologie de rupture. Dans cette perspective compétitive, l'intérêt d'un État pour cette technologie pourrait également être motivé par des ambitions de supériorité technologique et de prestige associé, et non seulement par la capacité potentielle de l'IAS à atténuer l'ampleur du réchauffement climatique.

Certaines dynamiques entourant le développement et le déploiement potentiel de l'IAS sont marquées par la rivalité sino-américaine. Ces dynamiques répondent d'abord à des logiques partisans, mais sont également ancrées dans des considérations capacitaires. Dans ce contexte, plusieurs scénarios peuvent être envisagés, parmi lesquels un déploiement unilatéral mené ou soutenu par les États-Unis ou la Chine, mais également un déploiement coopératif intervenant à l'issue d'une phase de non-coordination, voire de confrontation. Ces dynamiques montrent que les arènes technologiques et environnementales dans lesquelles s'inscrit l'IAS peuvent elles-mêmes être envisagées comme des espaces de compétition.

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 constituer une forme d'arsenalisation de l'IAS. Bien que cette technologie ne réponde pas aux objectifs de précision spatiale et temporelle recherchés dans le cadre d'opérations militaires, elle partage ces caractéristiques avec les armes biologiques, chimiques et nucléaires. **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.**

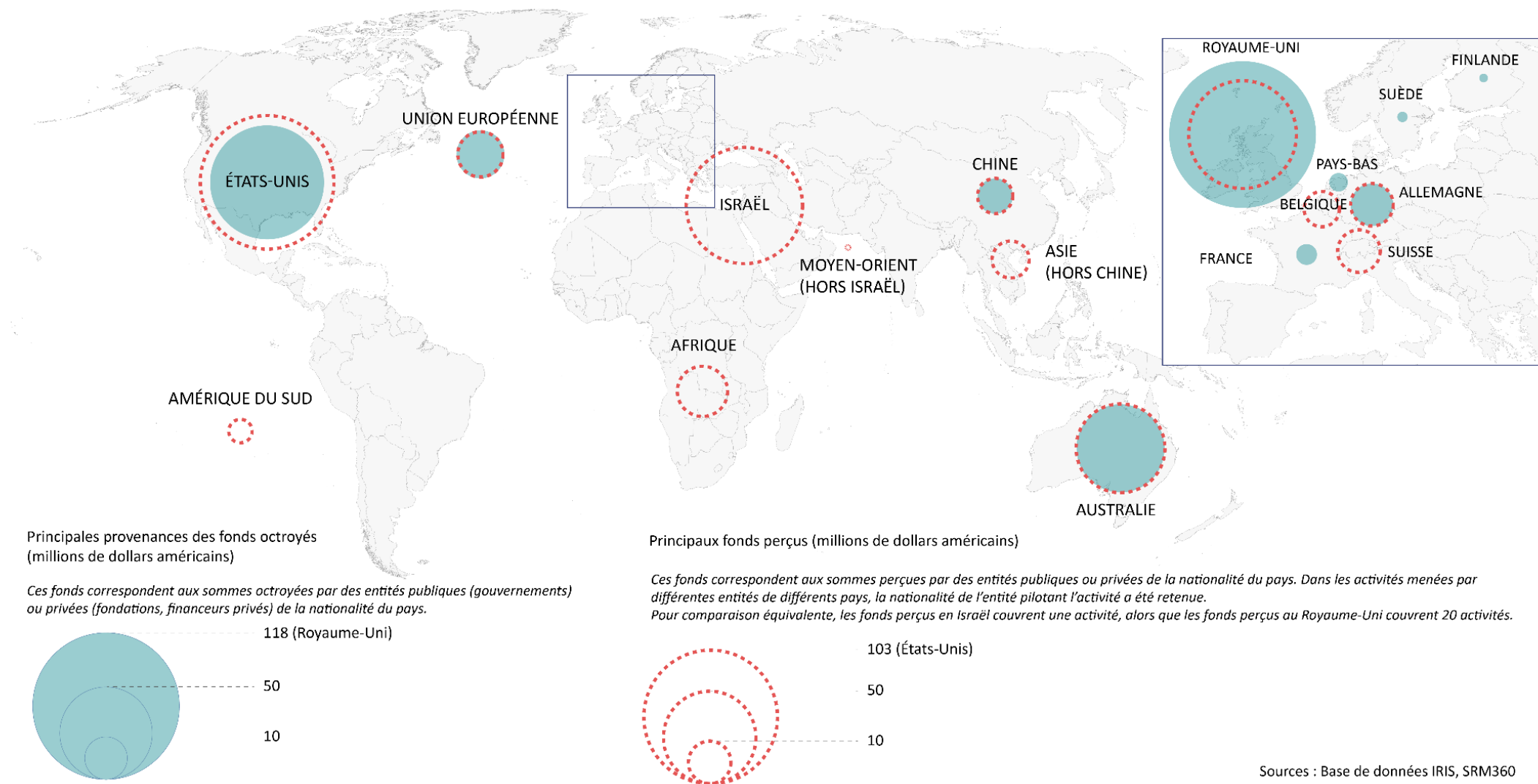
En lien avec le potentiel d'arsenalisation de l'IAS se pose l'enjeu de la perception du caractère hostile associé à son développement et/ou à son potentiel déploiement. Ces enjeux sont particulièrement susceptibles d'être alimentés par la difficulté, voire l'impossibilité, d'attribuer l'occurrence d'un événement climatique extrême isolé à l'IAS, aux changements climatiques à l'œuvre ou à la variabilité naturelle du climat. **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 pourraient servir différents objectifs politico-stratégiques et exploiter le levier informationnel, dans un contexte marqué par l'essor de la guerre cognitive et l'intégration des changements climatiques aux pratiques de guerre hybride.

Les enseignements de cette note renforcent la nécessité d'une mobilisation politique française et européenne sur la MRS. 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 prioritaire 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 renforcer sa capacité à produire et 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 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.

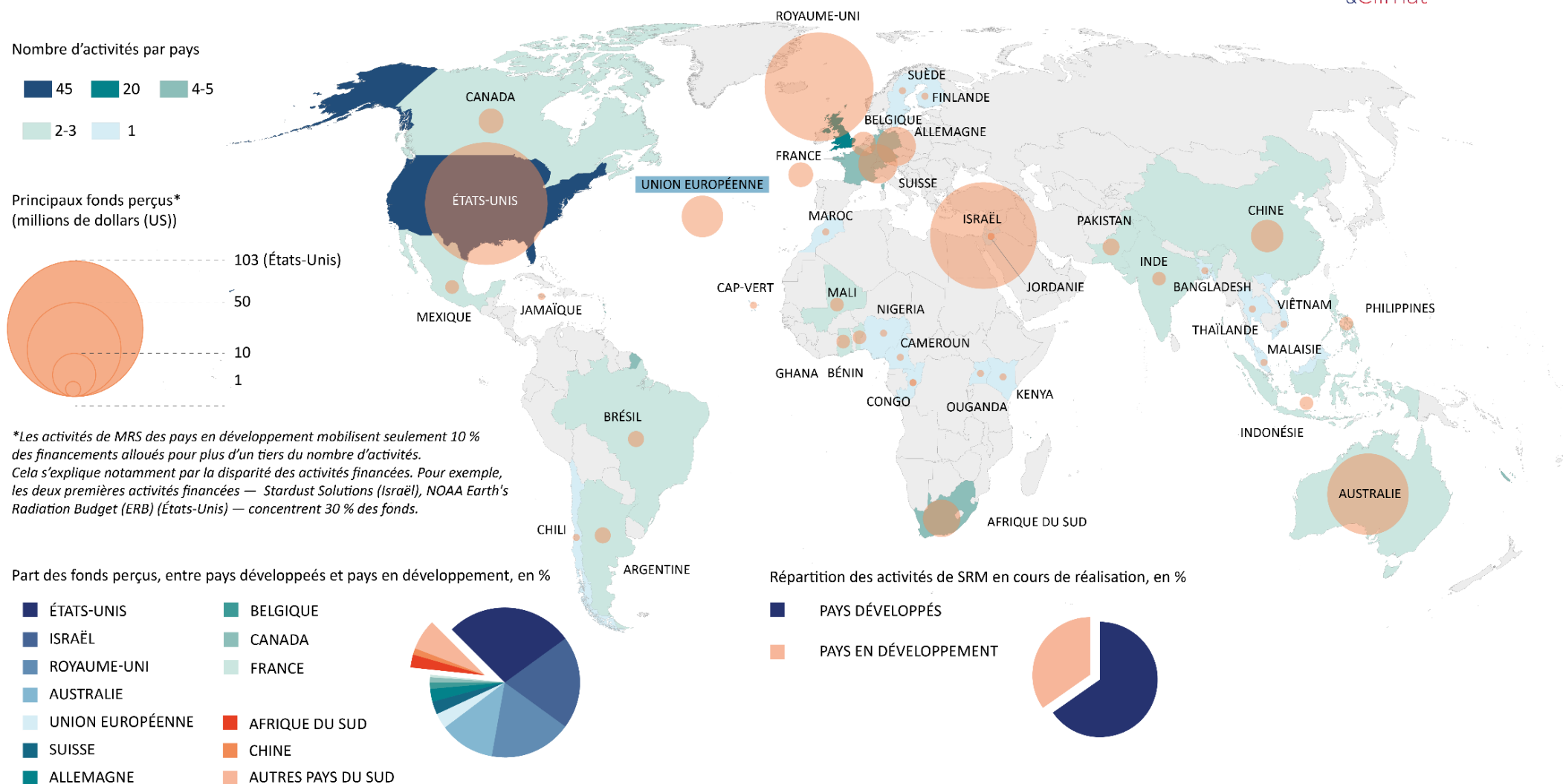
Annexe 1 : Principales régions de bailleurs et de récipiendaires de fonds liés à des activités en cours de Modification du Rayonnement Solaire (MRS), en montants octroyés et perçus

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



Annexe 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

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

PUBLICATIONS | PODCAST « SUR LE FRONT CLIMATIQUE » | ÉVÈNEMENTS



www.defenseclimat.fr

