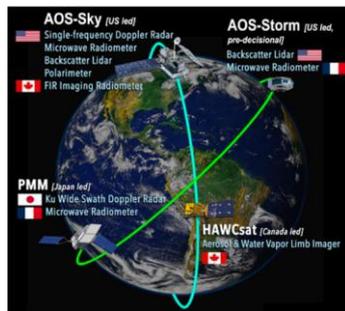


Rapport au Secrétaire général pour l'investissement

**Contre-expertise
de l'évaluation socio-économique
de la contribution française à la mission AOS**



Source : CNES, 2024.

AID René
LEBLANC François

14 mai 2024

Préambule

La loi du 31 décembre 2012 instaure l'obligation d'évaluation socio-économique préalable des projets d'investissements financés par l'Etat et ses établissements publics et une contre-expertise indépendante de cette évaluation lorsque le niveau de financement dépasse un seuil que le décret d'application de la loi a fixé à 100 M€.

C'est donc en respectant toutes les règles prévues dans le décret d'application (exigences du contenu du dossier, indépendance des contre experts, délais) que le SGPI a fait réaliser cette contre-expertise indépendante de l'évaluation de ce projet.

Ce rapport a été établi à partir des documents fournis par le CNES et des réponses apportées aux questions des contre-experts aux acteurs auditionnés tout au long de la procédure.

Il ne saurait être reproché à ce rapport de ne pas tenir compte d'éléments qui n'auraient pas été communiqués à ses auteurs.

Sommaire

PREAMBULE	2
SOMMAIRE	3
1. INTRODUCTION	4
2. LA CONTRE-EXPERTISE DU RAPPORT DU CNES	5
2.1. LA MISSION AOS	5
2.2. LA CONTRIBUTION FRANÇAISE.....	6
2.3. LES COUTS	7
2.4. LES EFFETS SOCIO-ECONOMIQUES IDENTIFIES.....	7
2.5. ANALYSE DES RISQUES ET INCERTITUDES.....	8
3. POUR ALLER PLUS LOIN DANS L'ANALYSE ECONOMIQUE	10
3.1. BENEFICES POUR LA PREVISION NUMERIQUE DU TEMPS ET MODELISATION DU CLIMAT	10
3.2. BENEFICES INDUSTRIELS	11
3.3. BENEFICES SCIENTIFIQUES	12
4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	13

1. Introduction

Dans une première partie, le rapport reprend le plan de l'étude d'évaluation socio-économique réalisée par le CNES et les éléments complémentaires apportés au cours des auditions réalisées durant la contre-expertise. Au cours de ces auditions, nous avons pu discuter de ce projet avec :

- Hélène Brogniez (LSCE/UVSQ) : responsable scientifique de la contribution française à la mission AOS,
- Rémy Roca (LEGOS/CNRS) : responsable scientifique de la contribution française à la mission AOS,
- Philippe Chambon (CNRM/CNRS, Météo-France) : scientifique impliqué sur la mission AOS, en particulier sur la composante applicative de la mission AOS,
- Cyril Crevoisier (LMD/CNRS), président du TOSCA de 2019 à 2024 et membre du CPS depuis 2024.

Dans une seconde partie sont présentées des pistes pour compléter l'étude socio-économique. Les conclusions et recommandations de la contre-expertise sont présentées dans une troisième partie.

2. La contre-expertise du rapport du CNES

2.1. La Mission AOS

La mission spatiale Atmosphere Observing System (AOS) a pour objectif de « fournir des observations pour trois grands volets d'application : la météorologie, le climat et la qualité de l'air » (La Météorologie, 123, Novembre 2023, Brogniez et al.).

Ce projet international composé de 4 satellites implique la NASA (USA) en tant que responsable principal de ce projet et de la fourniture d'un satellite et potentiellement d'un second si celui-ci est financé, la CSA (Canada) en tant que responsable d'un satellite et de la fourniture d'un instrument Infra-Rouge (IR) et d'un imageur aérosols et eau, le CNES (France) comme responsable de la fourniture de deux radiomètres et la JAXA (Japon) en tant que responsable d'un satellite et de la fourniture d'un radar doppler. Cet ensemble de 4 satellites pourrait se voir rejoint par un cinquième satellite réalisé par l'ASI (Italie, CALIGOLA, <https://www.asi.it/en/earth-science/caligola-mission/>). Ce satellite serait équipé d'un lidar dédié également à la mesure des aérosols atmosphériques. Le DLR (Allemagne) doit également participer au projet AOS à travers sa participation au volet suborbital de la mission.

Les objectifs scientifiques de la mission AOS sont résumés dans le rapport du CNES (Deschamps et al. 2023), à travers 3 séries de questions :

- Pourquoi les orages convectifs et les fortes précipitations surviennent-ils ? Quand et où apparaissent-ils ?
- Quels processus régissent la structure spatio-temporelle des polluants atmosphériques et quels sont leurs impacts sur la santé humaine, l'agriculture et les écosystèmes ?
- Comment réduire les incertitudes dans les projections de réchauffement climatique de la Terre en fonction des émissions de particules ? Comment améliorer notre capacité à prédire les réponses climatiques locales et régionales au forçage naturel et anthropique et ainsi réduire les incertitudes sur la sensibilité du climat qui sous-tend les études économiques et les stratégies d'adaptation ?

Ces questions reprennent les trois volets d'application évoqués précédemment soit :

- la compréhension et la modélisation des systèmes convectifs profonds (orage) qui sont centraux dans le cycle de l'eau et de l'énergie entre les basses et hautes couches de l'atmosphère. Il s'agit d'« accéder au sein des cellules orageuses au transport des gouttelettes d'eau » (H. Brogniez),
- la compréhension des interactions aérosols/nuages, et la quantification des évolutions des aérosols et nuages sur des échelles de temps de la seconde à la minute et sur des échelles kilométriques,
- l'amélioration de la prévision numérique du temps, de la qualité de l'air et de la modélisation du climat, tous essentiels pour la simulation du réchauffement climatique.

La mission AOS s'inscrit dans la continuité des programmes d'observation de la Terre internationaux. Deux programmes, notamment, ont été systématiquement évoqués lors des auditions :

- l'A-Train composé de six satellites franco-américains opérant sur des orbites proches, lancés entre 2002 et 2014 et dédiés à l'observation de l'atmosphère. Cette constellation arrive aujourd'hui en fin de vie avec 3 satellites sur les 6 initiaux ayant été officiellement arrêtés. La France a notamment eu la responsabilité des satellites CALIPSO et PARASOL.

- le GPM (Global Precipitation Measurement) composé d'une dizaine de satellites est le fruit d'une collaboration entre la NASA, la JAXA, le CNES, l'ISRO, Eumetsat et la NOAA. En collaboration avec l'ISRO, le CNES a eu la responsabilité du satellite Mégha-Tropiques qui a été arrêté en 2022, un des derniers satellites de cette constellation à avoir une orbite inclinée adaptée à l'observation des régions tropicales et équatoriales.

Se plaçant résolument dans la continuité de ces deux programmes, AOS se distingue cependant à travers plusieurs approches innovantes dont la communauté scientifique espère tirer profit :

- une résolution temporelle inédite avec deux paires de deux satellites passant au-dessus du même système convectif avec moins de 2 minutes de séparation. L'utilisation de radiomètres (le tandem C²OMODO français) dont les longueurs d'ondes permettent de sonder l'intérieur des nuages permettra pour la première fois de suivre l'évolution de la convection sur des petites échelles temporelles et à des échelles kilométriques, c'est-à-dire de fournir des mesures de la convection dans les systèmes orageux,
- une combinaison de plusieurs types d'instruments travaillant en synergie (radars, lidars, polarimètre, radiomètre micro-ondes et infrarouges) et sur deux orbites différents (polaires et inclinée),
- une combinaison du volet spatial avec un volet suborbital qui fournira des mesures sols et aéroportées (avion/ballon) permettant d'améliorer le suivi d'événements particuliers comme une tempête ou la dispersion d'un panache de particules.

Le projet de mission AOS a débuté en 2009 et devrait voir les premiers satellites être lancés en 2029. La phase A (phase préparatoire de la mission) s'est terminée en 2023 et a été suivie d'une phase B0 (phase de définition de la mission) jusqu'en 2024. Les phases de développements instrumentaux et des plateformes sont prévus entre 2024 et 2029. Il serait aujourd'hui prévu de lancer les deux premiers satellites en 2029 (satellite de la JAXA et de la NASA emportant les deux radiomètres français) mais avec quelques incertitudes programmatiques qui pourraient retarder ce lancement (voir la section 2.5). Le satellite CALIGOLA (ASI) pourrait être lancé en même temps et enfin en 2030 le satellite de la CAS. Il est envisagé de compléter cette constellation de satellites par un dernier satellite de la NASA mais dont le financement n'est pas encore décidé.

Clairement, la mission AOS est considérée par la communauté scientifique française comme la mission en observation de la terre de la prochaine décennie. Elle se positionne à la fois dans la continuité et comme héritière des grands programmes actuels et passés.

2.2. La contribution française

La contribution française à la mission AOS est essentielle à la réussite de cette mission. La fourniture de deux radiomètres micro-ondes, intitulé C²OMODO est en effet une des forces de cette mission, comme le démontre le nouveau design de la mission AOS où la NASA fournira un satellite dédié à l'emport d'un des deux radiomètres. Ces deux radiomètres observeront à deux minutes d'intervalle le même système convectif profond (la gamme micro-onde permettant d'observer l'intérieur des nuages). Grâce à cette configuration complètement originale, C²OMODO permettra de mesurer la vitesse verticale des masses d'air dans ces systèmes (Brogniez et al. 2022).

Avec une fauchée de 700 km et une résolution au km, cette paire d'instruments permettra d'accéder à des échelles temporelles et kilométriques sans précédent. La mesure par radiométrie micro-onde est une technique instrumentale largement utilisée désormais pour l'observation de l'atmosphère terrestre. Elle donne un accès à la température et l'humidité avec une bonne linéarité et une capacité de pénétration par rapport à d'autres capteurs. La technologie envisagée pour C²OMODO est un héritage de l'instrument SAPHIR/Mégha-Tropiques développé par le CNES. L'instrument SAPHIR est largement reconnu pour ses performances et l'excellence des produits dérivés construits par les équipes scientifiques françaises. Contrairement au cas de SAPHIR, essentiellement développé par le CNES, il est prévu que les instruments C²OMODO soient réalisés par l'industrie.

Fort de son expérience sur l'instrument SAPHIR, la communauté scientifique française est particulièrement bien positionnée pour assurer le traitement algorithmique des données issues de

ces radiomètres. Il est donc prévu que celle-ci assurera la production, la distribution et l'archivage des données de niveau 2 (données calibrées en grandeurs physiques) de ces radiomètres. Ces données seront archivées par le pôle de données AERIS de l'Infrastructure de Recherche Data Terra.

La communauté scientifique française a également une expérience reconnue dans le traitement des données des Lidars spatiaux (grâce à son rôle dans la mission CALIPSO qui embarquait un Lidar). C'est pourquoi il est prévu qu'elle participe aux traitements des données des lidars de la mission AOS afin de produire des données de niveaux 2 et plus.

Toute mission d'observation de la Terre s'appuie également sur un volet suborbital. Ce volet composé d'observations réalisées depuis le sol ou aéroportées (par ballon ou avion) permet de réaliser une calibration précise des instruments spatiaux et la validation de leur opération (la « Cal/Val »). Elle permet aussi de compléter des observations à distance avec une série de mesure in-situ. Essentielle pour l'exploitation optimale des observations depuis l'espace, ces observations sont réalisées en particulier lors de campagnes dédiées. Elles permettent aux équipes scientifiques de rester au plus près de la mesure. Dans le cadre d'AOS, un volet suborbital est donc prévu auquel la communauté française doit participer et contribuer.

Enfin, grâce au rôle central de la France à la mission AOS, les accords entre le CNES et la NASA assure une gouvernance commune de la mission, ce qui permettra à la communauté française de défendre ses intérêts et ses objectifs scientifiques, tout comme de lui assurer un accès privilégié à l'ensemble des données de cette mission.

2.3. Les coûts

Les coûts de développement des instruments C²OMODO estimés par le CNES sont les suivants :

- Phase A (de 2019 à 2023, phase préparatoire) : coût investissement 4.2 M€ dont 2.3 M€ en dépenses externes (vers les laboratoires et les industriels),
- Phase B0 (de 2023 à 2024, phase de définition) : 5 M€ dont 2.9 M€ en coûts externes,
- Phase B1- E1 (de 2024 à 2029, développement jusqu'à la recette en vol) : 160 M€ dont 133 M€ en coûts externes (surtout vers l'industrie). D'après le CNES, environ 83% du coût complet à achèvement ira vers l'industrie.
- Phase E2 (2029 - 2032 + 2 ans d'extension possible, phase scientifique) : 2.5 M€ par an. Ce financement ira surtout vers les laboratoires.

Le coût total de la contribution française à la mission AOS est équivalent à l'investissement sur des missions équivalentes comme les missions CFOSAT ou TRISHNA (de l'ordre de 200 M€). Il est à comparer au coût complet de la mission AOS estimé comme étant de l'ordre de 3 Milliards d'€. On peut aussi comparer ce coût à celui ayant été nécessaire pour le développement de l'instrument SAPHIR sur Mégha-Tropiques et qui avait été d'environ 30 M€, mais réalisé essentiellement en interne par le CNES.

2.4. Les effets socio-économiques identifiés

Le rapport d'évaluation socio-économique du CNES identifie quatre sources de bénéfice socio-économique.

1. *Bénéfice scientifique*

La participation de la France à cette mission permettra de maintenir, consolider et développer le rayonnement international de la communauté scientifique d'observation spatiale de

l'atmosphère. Ce rayonnement se traduit par la présence de la France dans les instances internationales qui définissent et décident des programmes spatiaux d'observations.

2. Bénéfice sociétaux et applicatifs

L'approche novatrice formée par le tandem de radiomètres C2OMODO devrait permettre des progrès significatifs dans la compréhension et la modélisation des dynamiques de formation des systèmes convectifs. Ces systèmes sont à l'origine des événements météorologiques extrêmes (tempêtes, orages). La mission AOS devrait permettre une refonte des modèles de formation de ces événements extrêmes. Elle a également pour objectif de développer des applications au niveau de la prévision numérique du temps.

3. Bénéfices techniques et industriels

La contribution française à la mission AOS consiste en la fourniture des deux radiomètres permettant la mesure de la vitesse de formation des systèmes convectifs profonds. Conçus au sein des laboratoires de recherche français, ils pourraient être réalisés par des entreprises du territoire compte tenu de leur implication sur la phase A de la mission. A ce titre, la mission contribue au maintien et au développement de l'expertise française dans le domaine des radiomètres, technologie de pointe faisant l'objet d'appels d'offre internationaux.

4. Bénéfice politique

Politiquement, la mission AOS permet de faire perdurer une collaboration fructueuse entre la France et les États Unis dans le domaine de l'observation de la Terre (suite de CALIPSO/A-Train). Elle permet également de reprendre une collaboration avec la JAXA (Japon).

Les bénéfices socio-économiques de ces quatre sources identifiées ne font pas l'objet d'une appréciation quantitative mais seulement qualitative.

2.5. Analyse des risques et incertitudes

On peut regretter que le rapport fourni par le CNES n'ait pas développé une analyse de risque. Pourtant plusieurs risques ont été identifiés au cours des auditions menées pour cette contre-expertise.

Le premier et le plus significatif est les changements en cours du profil de la mission. Plusieurs décisions récentes ont été prises qui redéfinissent la mission, suite aux difficultés budgétaires côté NASA. La contribution NASA a été revue et réduite, avec l'abandon de la fourniture d'un instrument lidar et le remplacement d'un des satellites par un petit satellite qui emporterait uniquement un des deux radiomètres C²OMODO. La date de lancement, initialement prévue en 2029 pourrait ainsi être repoussée. On peut donc légitimement s'interroger des conséquences programmatiques et financières sur la contribution française à cette mission. Par contre, la contribution française devient encore plus centrale à la mission AOS comme le montre la décision de la NASA de financer un satellite spécifiquement pour ce radiomètre.

Le deuxième risque est lié aux développements instrumentaux mais aussi numériques (traitement des données...) qui ne semblent pas faire l'objet d'un plan de protection de la propriété intellectuelle alors que comme expliqué dans le paragraphe 2.3, la radiométrie micro-onde pour l'observation de la Terre est une technique incontournable pour l'observation de la Terre. Elle est et sera utilisée sur la plupart des missions d'observation de la Terre, par exemple sur la mission

EumetSat/Sterna pour lesquels la fourniture de 6 radiomètres a été remporté par une société suédoise. Maintenir une expertise et une excellence technologique en France a donc une importance à la fois scientifique mais aussi économique.

Par ailleurs, une part significative des bénéfices industriels et techniques provient du fait que la fabrication des radiomètres sera sous-traitée à un ou des industriels. Le dossier d'évaluation ne permet pas de conclure que ces développements se feront aux bénéfices de l'industrie du territoire français.

En dernier lieu, il est bon de rappeler que la mission précédente intitulée MeghaTropique consistait en le lancement de trois appareils de mesure (Madras, Saphir et Scarab). Roca et. al. (2019) indique que l'appareil de mesure Madras n'a pas pu fonctionner après le lancement et que l'ensemble des mesures ont dû se reposer sur les deux autres appareils. Comme il est indiqué dans la section 2.2, la mission AOS est très dépendante des appareils de mesure radiométrique issue de la contribution française.

Le rapport du CNES ne mentionne pas de risque lié à la perte de fonctionnement d'un appareil. Cette perte rendrait pourtant impossible la mesure de la vitesse de formation des systèmes convectifs profonds et réduirait significativement l'apport scientifique espéré de la mission.

3. Pour aller plus loin dans l'analyse économique

Le rapport d'analyse du CNES identifie les vecteurs de créations de valeurs socio-économique pour l'économie française. Toutefois, ces effets ne sont pas quantifiés.

Les auditions ont pourtant permis d'identifier des études qui présentent des analyses économiques approfondies des bénéfices socio-économiques des missions spatiales d'observation de l'atmosphère.

Nous donnons dans les sections ci-dessous des pistes pour leur quantification en nous fondant sur les informations fournies au cours des auditions. Nous utilisons en particulier l'étude d'EuMetSat (2023). Nous nous appuyons également sur l'analyse (Citizen 2022) et le contre-expertise (Aïd et Frey 2022) réalisée dans le cadre du renouvellement des supercalculateurs de Météo-France.

3.1. Bénéfices pour la prévision numérique du temps et modélisation du climat

Le tandem de radiomètres C2OMODO devrait permettre une approche novatrice pour l'étude de la dynamique des systèmes convectifs. AOS avec ces deux satellites équipés des radiomètres de C²OMODO est la seule constellation de satellites de la prochaine décennie qui sera capable de réaliser de telles mesures. Or, ces systèmes convectifs sont à l'origine des événements de précipitation intense et font partie des composantes de notre atmosphère les plus mal modélisées (Brogniez et al. 2022).

Du fait de l'importance du climat sur les activités humaines et des effets négatifs attendus du réchauffement climatique en cours, une littérature économique s'est développée au cours des deux dernières décennies pour chiffrer la valeur de la prévision numérique du temps. Dans ses évaluations, le CNES pourrait s'appuyer sur des études de la Banque Mondiale (Hagellate, 2019) et de EuMetSat (2019) donnant des ordres de grandeur de la valeur de la prévision météo pour différents aspects de la vie économique : évitement des dommages par protection des actifs mobiles, années de vie sauvée et valeur économique dans certains secteurs d'activité (agriculture, énergie, tourisme...).

EuMetSat (2019) estime les bénéfices socio-économiques fournies par la prévision numérique du temps à environ 53 000 Md€ par an. Elle estime également la valeur socio-économique engendrée par une mission spécifique consistant en l'envoi d'une cohorte de six satellites d'observations de type radio métriques (EPS-Sterna). Cette plus value est estimée à un montant de l'ordre de 33 Md€, soit un ratio coût-bénéfice de 1 pour 51.

Des chiffres adaptés à l'économie française se trouvent également dans l'étude économique réalisée pour le renouvellement des supercalculateurs de MétéoFrance (Aïd et Frey 2019).

On trouve également des valeurs dans Roca et. al. (2019) sur l'amélioration de la prévision de la trajectoire cyclones grâce aux observations satellitaires. Le gain de quelques pourcents d'erreur sur la trajectoire prévue à 72 heures correspond à une distance de 100 km sur le terrain.

Enfin, l'étude de la Banque Mondiale (Hallegatte, 2012) indique clairement que l'efficacité d'un système d'alerte anticipée (Early Warning System) dépend de sa fiabilité : les faux positifs induisent une inattention de la population pour ces signaux.

De son côté, la mission AOS permettra l'amélioration des modèles de convections profondes, modèles qui permettent la description des nuages et des événements extrêmes et de leur dynamique. Les observations d'AOS devraient permettre, sur le court terme de contraindre les modèles de prévision du temps. Sur le long terme, la modélisation régionale bénéficiera grandement des observations kilométriques d'AOS qui permettront de réaliser une meilleure description de la convection paramètre clef reliant différentes échelles spatiales. De cette

amélioration découlera une meilleure description des nuages (taille, formation, évolution...) et par conséquent du bilan énergétique de l'atmosphère, élément clef pour bien anticiper le changement climatique.

Lors de son audition, P. Chambon (CNRM/Météo-France) a souligné l'importance d'une mission comme AOS et des mesures du couple C²OMODO. D'après ce spécialiste de la prévision météorologique, pour réaliser une telle prévision, il faut plusieurs éléments, un bon modèle numérique et une bonne connaissance des conditions initiales, ce que fournira C²OMODO mais aussi l'ensemble des observations d'AOS.

Commenté [FL1]: Dit dans le dernier paragraphe ci-dessous

On peut aussi estimer l'impact d'AOS au regard des avancées permises par les missions précédentes. Au vu de ce qu'a permis la mission Mégha-Tropiques, on peut s'attendre à « un gain net de qualité de la prédiction des modèles à partir de l'assimilation des données d'AOS », (H. Brogniez). L'A-Train a permis une avancée majeure scientifique avec des milliers de publications associées, dont la moitié avec des co-auteurs français et environ un tiers avec un premier auteur français (C. Crevoisier). 17 ans de données ne permettent pourtant pas de caractériser suffisamment l'impact du réchauffement sur les formations nuageuses. AOS se positionne dans la continuité de l'A-Train et permettra d'étendre cette série temporelle jusqu'à 25 ans ce qui devrait permettre de définir les tendances climatiques.

Commenté [FL2]: Plutôt en conclusion?

Par ailleurs, les bénéfices socio-économiques de la mission AOS sur le climat ne se limite pas à l'amélioration de la PNT à court terme par la fourniture de données nouvelles (vitesse de formation de systèmes convectifs profonds). En effet, ces observations vont permettre à moyen terme de développer des modèles de formation des nuages orageux plus cohérents avec les mesures observées. Ainsi, les observations radiométriques vont amener les météorologues à réviser leurs modèles de prévisions météorologiques, ce qui va induire une nouvelle amélioration des prévisions et ce, à données constantes.

Enfin, une troisième source de création de valeur de la mission AOS provient des effets attendus dans la modélisation des masses nuageuses dans les modèles climatiques utilisés dans les études du GIEC pour ses prévisions des dommages engendrés par le réchauffement climatique. Une part importante de ces dommages passe par une augmentation des volumes de précipitations. Actuellement, il existe une variance importante entre les sorties des différents modèles climatiques du fait de la représentation de la dynamique de formation des systèmes convectifs profonds. Une amélioration de leur modélisation conduirait à une réduction espérée de la variance des prévisions à long terme. Dans ce cadre, l'approche développée pour le compte de Météo France sur la réduction de l'incertitude sur la réponse transitoire du climat pourrait s'appliquer et permettre une estimation de la plus-value apportée par la mission AOS.

Compte tenu de l'importance d'AOS pour la PNT et la modélisation du climat, on peut regretter un positionnement plus affirmé de la contribution française :

- sur le développement d'outils de prévision du temps s'appuyant sur les observations des instruments d'AOS,

-la gestion des données. Il y a peu de détails sur le rôle du pôle de données AERIS dans la construction d'AOS. Enfin, l'évolution récente d'AOS fragilise la contribution des équipes françaises sur l'analyse des données de l'instrument Lidar désormais fourni par l'Italie.

3.2. Bénéfices industriels

Les auditions mettent clairement en avant l'expertise de la communauté scientifique et industrielle dans l'élaboration des appareils de radiométrie spatiale. La mission de recherche

franco-indienne Megha-Tropiques (1992-2019) a permis de montrer toute la pertinence du choix des radiomètres spatiaux. EuMetSat met en oeuvre cette solution technologique dans l'envoi prévue en 2025 de six radiomètres dans la mission EPS-Astra. Pour des raisons de fiabilité de la mission, l'envoi de six radiomètres a conduit à l'achat par EuMetSat d'une quinzaine d'appareils au travers d'un appel d'offres.

Il existe donc un marché réel pour le développement de ce type d'appareils nécessitant une haute expertise scientifique et un tissu industriel capable de produire ces appareils avec des niveaux de fiabilité requis par les différentes missions spatiales.

En permettant le développement de nouveaux appareils par un mécanisme de sous-traitance de leur fabrication, la mission AOS permet de maintenir et développer un tandem scientifique et industriel créateur de valeur pour l'économie française. L'enjeu stratégique de la mission AOS est de maintenir en France une compétence industrielle et scientifique sur ce type d'instrumentation. Une estimation des emplois créés ou maintenu par cet aspect de la mission AOS permettrait de quantifier la valeur de cette expertise pour le tissu industriel français.

Par ailleurs, le développement de brevets pour l'ensemble des appareils de mesure spatiales (radiomètres mais également LIDAR) est également un gisement de valeur socio-économique. Non seulement ils présentent l'intérêt de capitaliser une valeur économique mais ils permettent aussi de développer une expertise scientifique et industrielle. Le CNES pourrait s'inspirer par exemple des évaluations conduites par le LETI dans le cadre du projet Next-GEN (Aïd et Eloy, 2022).

3.3. Bénéfices scientifiques

Le rapport du CNES donne des éléments factuels démontrant la place française au sein de la communauté internationale d'observation spatiale. Ce leadership se traduit par un haut niveau de publication reportées par exemple dans le retour d'expérience de la mission Megha-Tropique, par la fixation sur le sol français d'une communauté scientifique importante et par l'obtention de subventions par des organismes internationaux.

Par ailleurs, les données bibliométriques des missions précédentes Calipso et Megha-Tropique donne une mesure de l'excellence du niveau de publication de la communauté de l'observation spatiale de l'atmosphère. Selon les données rassemblées, on compte environ 300 publications (2008-2023) pour Calipso, dont 70% sont attribuables à la communauté française. En ce qui concerne la mission Megha-Tropique, on dénombre 170 publications dont une cinquantaine dans des revues les plus prestigieuses.

Dans l'esprit d'études socio-économiques précédentes, il est possible de donner un ordre de grandeur de la valeur économique de ces éléments en utilisant la valeur d'une publication tirée du rapport « L'évaluation socioéconomique des projets immobiliers de l'enseignement supérieur et de la recherche » (2019). Si l'on retient une hypothèse d'une valeur de 70 k€ par publication et un niveau de publication identique pour la mission AOS (environ 300 publications cumulée sur la période de 15 ans de la mission), il n'est pas déraisonnable d'estimer que la valeur créée au titre des publications scientifiques est de l'ordre de 21 M€.

Même si cet élément est entaché d'incertitude, il permet une estimation de l'importance de la communauté qui produit ces recherches.

4. Conclusions et recommandations

Le dossier d'évaluation socio-économique de la contribution française à la mission spatiale AOS ne fournit que des éléments qualitatifs d'évaluation économique de cet investissement public. Il existe pourtant des études officielles évaluant les différents bénéfices sociaux engendrés par l'observation spatiale de l'atmosphère.

Un des objectifs majeurs de la mission AOS consiste en une observation innovante de la formation des systèmes nuageux responsables d'événements météorologiques extrêmes. A ce titre, la mission permettra une meilleure prévision de leur formation ainsi qu'une meilleure modélisation. Ces progrès scientifiques auront des effets directs sur la qualité de la prévision numérique du temps et sur la modélisation climatique à long terme.

Par ailleurs, la contribution française porte sur la fourniture des deux radiomètres sur lesquels les nouvelles mesures de formation des nuages vont reposer. Cette contribution est le fruit d'une communauté scientifique disposant d'une haute expertise reconnue internationalement dans ce domaine et d'opérateurs industriels capable de mettre en production des appareils avec le niveau de fiabilité requis.

De plus, les auditions ont mis en évidence l'existence d'une expertise française au plus niveau sur l'ensemble de la chaîne de valeur de la compréhension et de la modélisation du climat. La mission devrait permettre de développer des synergies entre les communautés d'observation spatiale, de prévisions numériques du temps et de modélisation du climat, en l'étendant à d'autres communautés, par exemple comme celle en hydrologie pour tirer le meilleur parti de l'ensemble des données produites.

De ce fait, et malgré l'absence d'éléments quantitatifs fournis par le CNES, nous sommes confiants dans la création de valeur nette de la contribution française à cette mission. Par ailleurs, les auditions et les différentes études socio-économiques du secteur de l'observation spatiale de l'atmosphère qui nous ont été présentées démontrent qu'il s'agit d'un secteur présentant un haut rendement coût-bénéfice.

Toutefois, dans une perspective à plus long terme d'évaluation des gains socio-économiques de ce type de mission, nous formulons les remarques et les recommandations suivantes.

1. La France dispose d'un niveau d'expertise internationale sur l'ensemble des champs de l'observation, de compréhension et de modélisation des phénomènes météorologiques et climatiques. Toutefois, on note un déficit en termes de coordination et de cohérence des démarches d'évaluation.
2. Le CNES devrait s'appuyer sur les études déjà existantes et citées les rapports fournissant des estimations socio-économiques des gains de l'amélioration de la PNT et de la réduction des incertitudes dans les modèles climatiques.
3. Une part de la valeur socio-économique induite par la contribution française provient du tissu industriel français mettant en œuvre les solutions de radiométrie et de LIDAR. Le CNES devrait s'intéresser à l'économie de ce tissu industriel en termes d'emplois créés et de valeur engendrée aussi bien par les marchés emportés que par la valeur des portefeuilles de brevets constitués.
4. Le leadership français dans l'observation spatiale se traduit par une communauté française influente dans les organismes internationaux. Elle se traduit également par un haut niveau de publications pour lequel des valeurs tutélaires existent et par l'obtention de subventions par des organismes internationaux.

5. Les risques de la mission devraient être rendus plus explicites ainsi que leurs conséquences sur les attendus de la mission.

Sigles et abréviations

AERIS	Pôle de données et de services pour l'atmosphère
AOS	Atmosphere Observing System
ASI	Agenzia Spaziale Italiana
CSA	Canadian Space Agency
CALIGOLA System	Cloud Aerosol LIDAR for Global Scale Observations of the Ocean-Land Atmosphere
CALIPSO	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation
Cal/Val	Calibration/Validation
CFO SAT	Chinese-French Oceanic SATellite
C ² OMODO	Convective Core Observations through MicrOwave Derivatives in the trOpics
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ESA	European Space Agency
EumetSat	The European operational satellite agency for monitoring weather, climate and the environment from space on behalf of our member states.
GPM	Global Precipitation Measurement
INSU	Institut National des Sciences de l'Univers
IR	Infra-Rouge
ISRO	Indian Space Research Organization
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
JUICE	Jupiter Icy Moons Explorer
LEGOS	Laboratoire d'Etudes en Géophysiques et Océanographie Spatiale
LERMA	Laboratoire d'Etudes du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique et Atmosphères
LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
LMD	Laboratoire de Météorologie Dynamique
NASA	The National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OA	Océan-Atmosphère
PARASOL	Polarisation et Anisotropie des Réflectances au sommet de l'Atmosphère, couplées avec un Satellite d'Observation emportant un Lidar
SPS	Séminaire de Prospective Scientifique
TOSCA	Comité Terre, Océan, Surfaces Continentales, Atmosphère
TRISHNA	Thermal infraRed Imaging Satellite for High-resolution Natural resource Assessment
WCRP	World Climate Research Programme

Références

- R. Aïd, P. Frey, *Contre-expertise de l'évaluation socio-économique du renouvellement des supercalculateurs de Météo France en 2025*, Rapport au SGPI, avril 2022.
- R. Aïd, J-P. Eloy, *Contre-expertise de l'évaluation socio-économique du projet Next Gen mené par le CEA-Leti*, Rapport au SGPI, novembre 2022.
- Brogniez H, Roca R, Auguste F, Chaboureau J-P, Haddad Z, Munchak SJ, Li X, Bouniol D, Dépée A, Fiolleau T and Kollias P (2022) Time-Delayed Tandem Microwave Observations of Tropical Deep Convection: Overview of the C²OMODO Mission, *Front. Remote Sens.* 3:854735. doi: 10.3389/frsen.2022.854735
- Brogniez H, Cuesta J, Noël V. et A. Deschamps, La mission Spatiale Atmosphere Observing System (AOS), *La Météorologie*, 123, Novembre 2023.
- CITIZING pour Météo-France, *Évaluation socioéconomique du renouvellement des supercalculateurs de Météo-France en 2025*, septembre 2021.
- Deschamps A., Amiot T, Piquereau L. et P. Guay, Evaluation Socio-Economique de la contribution française à la mission AOS, DS/DAP/SMP 2003.0014891, CNES, 3 novembre 2023.
- S. Hallegatte. *A cost effective solution to reduce disaster losses in developing countries: hydro-meteorological services, early warning, and evacuation*. World Bank policy research working paper 6058, 2012.
- Prospective Océan-Atmosphère 2023-2028, INSU» <https://hal.science/hal-04334125/document>
- R. Roca, P. Chambon, M. Gosset, D. Bouniol, H. Brogniez, S. Cloché, T. Fiolleau, P. Raberanto, M. Dejus. *Le bilan scientifique de la mission Megha-Tropiques après 8 ans dans l'espace*. *La Météorologie* 2019.107:36-44, 2019.
- Séminaire de Prospective scientifique du CNES, le Havre, 2019, www.sps2019.com
- Thriving on Our Changing Planet: A decadal Strategy for Earth Observation from Space, Consensus Study Report, Highlights, 2018,
- R. A. Varley. *The social and economic benefits of EPS-Aeolus and EPS-Sterna*. Eumetsat, November 2023.