

MISSIONS SPATIALES EN PHYSIQUE FONDAMENTALE *SPACE MISSIONS FOR FUNDAMENTAL PHYSICS*

Avant-propos

Les expériences spatiales à venir, décrites dans cette revue, sont cruciales pour la physique moderne, dont elles constituent de véritables clefs de voûte, à l'image de l'expérience de Michelson et Morley. Le fait que l'expérimentation spatiale permette de gagner plusieurs ordres de grandeur dans leur précision ou leur sensibilité est en soi une motivation profonde pour tout physicien. Ces expériences permettent aussi de pousser dans ses retranchements une instrumentation de pointe, qui ne peut fonctionner qu'en microgravité et qui apporte ses propres questions de physique de base ainsi que de nombreuses retombées en métrologie fine. C'est le cas en particulier des accéléromètres électrostatiques, des horloges atomiques et des capteurs inertiels interférométriques à atomes froids, de la datation optique et de l'interférométrie optique à très grande longueur de bras.

L'édifice actuel de la physique fondamentale est soutenu par deux piliers distincts, correspondant aux deux théories qui ont révolutionné la physique du XX^{ème} siècle : la Mécanique Quantique (qui a conduit à la théorie quantique des champs) et la Relativité Générale. La théorie quantique des champs est bâtie sur le principe de superposition de la mécanique quantique et sur le principe d'invariance de jauge. Elle permet d'englober trois des quatre interactions fondamentales – électromagnétique, faible et forte – dans une théorie dite Modèle Standard de la physique des particules, qui rend compte de la majorité des expériences en physique des particules. D'un autre côté, la Relativité Générale est une théorie fondée sur le principe d'équivalence (locale) entre champs gravitationnels et inertiels, et explique de façon satisfaisante tous les phénomènes connus ayant trait à la quatrième interaction fondamentale – la gravitation. Ces deux piliers théoriques reposent eux-mêmes sur un principe « cinématique », celui de la relativité einsteinienne, fondé sur les transformations de Lorentz et Poincaré. Ils supportent, en principe, toutes les autres théories de la physique, classées conventionnellement comme moins fondamentales dans le point de vue adopté ici (mais qui bien sûr suscitent des problèmes tout aussi importants).

Pourquoi ne pas se satisfaire de deux théories fondamentales qui sont en accord avec toute la physique connue, chacune dans leurs domaines respectifs ? La raison essentielle est que la Relativité Générale est une théorie purement classique, et donc que ces deux corpus théoriques restent distincts, bien qu'il existe des liens très profonds entre leurs principes sous-jacents, notamment entre le principe d'invariance de jauge et le principe d'équivalence (qui implique, dans sa formulation mathématique, la « covariance » générale de la théorie, se ramenant à une invariance de jauge au niveau linéarisé). D'autre part, le Modèle Standard de la physique des particules a des défauts et des limitations suggérant des extensions possibles qui, toutes, invoquent l'existence de nouvelles particules (comme l'axion qui permettrait de résoudre le problème de la non-violation de CP dans l'interaction forte).

Les théories d'unification visant à concilier la Théorie Quantique et la Relativité Générale cherchent à faire passer les principes de la mécanique quantique au niveau le plus profond (à égalité avec le principe de relativité), et donc consistent à quantifier le champ gravitationnel. L'approche suivie communément par les physiciens des particules est celle de la théorie des supercordes, qui remplace le concept de particule élémentaire par une notion de corde à une dimension, et incorpore en particulier la « supersymétrie » entre les fermions et les bosons (y compris le boson associé au champ de gravitation ou graviton). Cette théorie prédit l'existence de nouvelles particules (comme le gravitino) et de nouvelles interactions (dilatoniques par exemple). Les physiciens relativistes, quant à eux, poursuivent la quantification non-perturbative de la Relativité Générale.

A grande échelle (ou à basse énergie), la description classique de la force gravitationnelle donnée par la Relativité Générale est en très bon accord avec de nombreuses observations d'effets relativistes en laboratoire, dans le système solaire et dans le pulsar binaire PSR 1913+16. Pour certaines applications comme les éphémérides des corps dans le système solaire, la Relativité Générale est un simple « outil »

permettant d'atteindre la précision voulue. Un autre exemple est le système GPS qui doit prendre en compte de manière cruciale l'effet de décalage gravitationnel des fréquences vers le rouge (effet Einstein). Comme la théorie est fondamentale et ne possède aucun paramètre libre, toute mesure expérimentale d'un effet connu (comme l'effet Einstein) avec une meilleure précision, ou dans un domaine d'application nouveau (comme les ondes gravitationnelles), constitue un test discriminant de la théorie. L'expérimentation spatiale dans le système solaire a un rôle important qui consiste à vérifier avec la meilleure précision possible l'outil théorique que représente la Relativité Générale. Dans le cas du rayonnement gravitationnel, avec le projet spatial LISA, la théorie sera à la fois utilisée comme cadre pour les observations en Astronomie et vérifiée avec précision ou éventuellement infirmée.

La frontière entre les domaines traditionnellement réservés à la Théorie Quantique et à la Relativité Générale est l'objet de recherches fascinantes. Dans les années 80, avec les expériences dites de cinquième force, a émergé un nouveau champ d'exploration consistant en la recherche expérimentale de forces nouvelles, prédites par des extensions du Modèle Standard, qui agiraient à basse énergie sur des échelles macroscopiques avec une signature observable. La clé de cette recherche réside dans l'étude très précise de la loi de la gravitation, car les forces nouvelles devraient modifier la loi de Newton macroscopiquement, en superposant au potentiel newtonien un potentiel d'interaction de portée finie (avec une intensité très faible), ou par une violation du principe d'équivalence sous sa forme d'une non-universalité du mouvement de chute libre des corps.

L'environnement spatial, en l'absence des perturbations liées au bruit sismique terrestre, constitue le domaine de prédilection des expériences très précises sur la gravitation, et convient idéalement pour la recherche d'interactions nouvelles pouvant se manifester à basse énergie. L'enjeu est important car il est donc lié à la résolution de problèmes non triviaux de physique des particules et aux tests de certaines prédictions de modèles d'unification ambitieux comme la théorie des supercordes.

Nous pouvons ainsi distinguer deux grandes thématiques pour l'expérimentation spatiale en physique fondamentale : une thématique « traditionnelle » ou classique (par opposition à quantique), dans laquelle le spatial a déjà joué un rôle important, et qui comprend en particulier les mesures d'effets relativistes dans le système solaire et le rayonnement gravitationnel ; et une thématique d'origine quantique, plus récente et plus spéculative qui n'a encore donné lieu à aucune expérience spatiale et qui regroupe les recherches d'interactions nouvelles à l'échelle macroscopique.

Dans cette revue, nous avons regroupé les projets spatiaux actuels en trois domaines :

- celui relatif au test du principe d'équivalence pour lequel deux articles de présentation théorique par Thibault Damour et Pierre Fayet accompagnent la présentation des projets expérimentaux,
- celui relatif aux tests de la Relativité Générale et au développement d'horloges ultra-stables dans l'espace,
- celui de la détection directe des ondes gravitationnelles pour lequel un éclairage théorique est donné par Luc Blanchet.

Test du principe d'équivalence

Les expériences portant sur le principe d'équivalence, comme celle du projet MICROSCOPE présenté dans cette revue, appartiennent en fait aux deux thématiques classique et quantique, car elles testent notre idée classique de l'existence d'un continuum d'espace-temps (conséquence directe du principe d'équivalence) ou pourraient permettre de détecter par exemple l'effet de particules ou forces nouvelles au delà du modèle standard. T. Damour s'appuie sur la théorie des cordes pour montrer comment s'introduisent naturellement des particules « dilatoniques » de spin 0 tandis que Pierre Fayet est parti de la supersymétrie pour introduire des bosons de spin 1. Les nouvelles forces associées à ces particules pourraient en se superposant à la gravitation se manifester par une violation apparente du principe d'équivalence.

Une telle violation se traduit non seulement par une non-universalité de la chute libre des corps, mais pourrait aussi donner lieu à une variation au cours du temps, à cause de l'évolution cosmologique, des

constantes de couplage de la physique non-gravitationnelle telles que la constante de structure fine α . L'éventuelle variation temporelle de α sera précisée grâce aux mesures effectuées à l'aide d'horloges atomiques ultra-stables dans l'espace (par exemple dans le cadre de l'expérience ACES sur la station spatiale décrite dans cette revue).

Le concept du test en orbite du principe d'équivalence consiste à disposer à bord d'un satellite à traînée compensée et en pointage inertiel (ou quasi-inertiel), des accéléromètres dont les masses d'épreuve regroupées par paires sont de compositions différentes. Ces masses, de géométrie précise, sont soumises au même champ de force gravitationnel et électrostatique. Elles sont contraintes à chuter sur la même orbite avec une précision sub-picométrique et les forces électrostatiques dissymétriques développées pour cela (si elles sont nécessaires) sont mesurées précisément le long du champ gravitationnel de la Terre. L'article de P. Touboul précise ce concept tel qu'il est développé dans le cadre de la mission MICROSCOPE du CNES et confirme le gain attendu de plusieurs ordres de grandeur dans la précision du test.

Dans leur article Serge Reynaud et ses collaborateurs analysent la contribution des fluctuations du vide aux limitations ultimes des instruments, en particulier des accéléromètres de la mission MICROSCOPE. Ils évaluent l'effet Casimir induit par ces fluctuations et posent le problème de la contribution de l'énergie du vide aux phénomènes gravitationnels et inertiels en relation avec la constante cosmologique.

Tests de la Relativité Générale et horloges ultra-stables

Dans le système solaire où le champ de gravitation est faible (potentiel newtonien $U/c^2 \leq 10^{-6}$) et les vitesses des corps sont lentes ($v/c \leq 10^{-3}$), on peut utiliser la limite post-newtonienne pour départager les différentes théories de la gravitation. Si on se restreint à des théories satisfaisant au principe d'équivalence, on peut montrer qu'essentiellement deux paramètres post-newtoniens sont à prendre en compte, qui sont le paramètre γ , qui mesure le taux de courbure spatiale prévu par la théorie, et le paramètre β , qui mesure son degré de non-linéarité. Par choix conventionnel, β et γ prennent la valeur 1 en Relativité Générale. Par exemple, dans la théorie de Jordan–Fierz–Brans–Dicke, qui consiste à superposer au champ gravitationnel décrit par la Relativité Générale un champ scalaire, on a $\beta = 1$ mais $\gamma = (\omega + 1)/(\omega + 2)$, où ω désigne une constante de couplage associée au champ scalaire, qui doit être numériquement de l'ordre de 1 pour que la théorie ait un sens (à la limite où ω devient infini, on retrouve la Relativité Générale).

Les principaux effets relativistes mesurés dans le système solaire sont : la précession relativiste du grand axe de la planète Mercure (égale à 43 secondes d'arc par siècle, qui se rajoutent aux quelques 5500'' d'arc dues aux perturbations newtoniennes des autres planètes) ; la déviation de la lumière par le champ gravitationnel du Soleil (angle de déviation égal à 1,75'' d'arc pour un photon rasant le lobe solaire – soit deux fois la prédiction de la théorie newtonienne) ; et l'effet dit Shapiro de retard relativiste de l'instant d'arrivée d'un photon après son passage dans le champ du Soleil (soit environ 250 μ s de retard dans le cas d'un photon rasant le Soleil entre Mercure et la Terre). La meilleure détermination expérimentale de γ a été réalisée grâce à la mesure VLBI de l'angle de déviation de la lumière radio des quasars : $\gamma = 1,000 \pm 0,002$. Plus généralement, l'ensemble des expériences réalisées montre que les prédictions de la Relativité Générale dans le système solaire sont vérifiées au millième près. Cela ne signifie pas que la Relativité Générale soit certainement « correcte », car les tests dans le système solaire ne donnent accès qu'au régime quasi-newtonien de la théorie (et ne disent rien par exemple sur le régime radiatif ou le comportement de la théorie en champ gravitationnel fort), mais cela permet de « falsifier » de façon certaine des théories alternatives, comme la théorie de Jordan–Fierz–Brans–Dicke qui se trouve sérieusement en difficulté car la constante ω devrait prendre une valeur beaucoup trop grande (> 500).

Dans l'avenir, les techniques spatiales vont jouer un rôle déterminant dans l'amélioration de ces mesures. L'angle de déviation de la lumière par le champ du Soleil est utilisé de façon routinière dans les données HIPPARCOS, non seulement pour des photons ayant rasé le bord solaire mais en fait en provenance de la sphère complète. L'expérience GAIA d'interféromètre astrométrique dans l'espace (qui permettra d'atteindre des mesures angulaires avec une précision de 10 μ arcsec) devrait, entre autres, faire gagner à

la précision sur γ quatre ordres de grandeur, pour la porter à quelques 10^{-7} . Les caractéristiques de la mission GAIA et ses retombées attendues dans le domaine de la gravitation sont précisées dans l'article de F. Mignard.

D'autre part, disposant d'une horloge atomique en orbite solaire et d'un système de transfert de temps, on peut effectuer immédiatement un test de l'effet Einstein au niveau de 10^{-10} , alors qu'il n'est connu actuellement qu'avec une exactitude de l'ordre de 10^{-4} . Même en orbite terrestre, où le champ de gravitation est bien plus faible, une horloge ultra-précise et un transfert de temps par lien micro-ondes ou par laser devraient permettre d'améliorer, d'un facteur 30 à 100, l'exactitude sur l'effet Einstein ; de plus la dérive temporelle de la constante de structure fine α peut être observée au niveau de 10^{-16} par année, à savoir une amélioration d'un facteur 400 par rapport aux meilleures mesures de laboratoire actuelles. C'est ce que précise C. Salomon dans l'article de cette revue consacré en particulier au projet ACES de l'ESA. La charge utile d'ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) comporte en fait deux horloges, l'horloge PHARAO, Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite, développée en France au cours de ces dernières années, et le Maser à Hydrogène développé par l'Observatoire de Neuchâtel. Deux méthodes de transfert de temps et de fréquence ont été étudiées, un lien optique, T2L2 (Transfert de Temps par Lien Laser), et un lien micro-onde. A la différence du lien laser, ce lien micro-onde, moins précis, possède l'avantage de pouvoir fonctionner continûment par toutes conditions atmosphériques. T2L2 constitue une nouvelle génération de transfert de temps par lien laser avec une exactitude escomptée de l'ordre de 30 picosecondes qui, si elle n'est pas définitivement implantée à bord de la station spatiale internationale dans le cadre du projet ACES, permet déjà d'envisager d'autres missions spatiales dans le domaine de la physique fondamentale.

Détection des ondes gravitationnelles

L'autre grand domaine abordé aujourd'hui par les techniques spatiales concerne les ondes gravitationnelles qui sont des perturbations de la métrique d'espace-temps se propageant à la vitesse de la lumière. Ce sont des ondes transverses, avec 2 degrés de liberté de polarisation, correspondant à une particule sans masse de spin 2. Le rayonnement gravitationnel n'a jamais été observé directement. Il a été détecté de manière indirecte en Astronomie, par l'effet de réaction qu'il induit sur le mouvement orbital des pulsars binaires PSR 1913+16 et 1534+12, provoquant la décroissance de la période orbitale et aussi grâce à une certaine classe de systèmes binaires (binaires X cataclysmiques à courte période orbitale) dont l'existence même ne peut s'expliquer qu'en invoquant une perte de moment cinétique par rayonnement gravitationnel. Si pour des objets ordinaires l'amplitude de l'onde gravitationnelle est en général très faible, dans le cas extrême d'une source astrophysique ultra-relativiste et auto-gravitante la puissance émise pourrait atteindre l'énorme valeur $P = c^5/G = 3,6 \cdot 10^{52}$ W (indépendamment de la nature de la source).

La plupart des objets connus par leur émission électromagnétique en astronomie sont de faibles émetteurs de rayonnement gravitationnel. A contrario, les sources prometteuses d'ondes gravitationnelles devraient être invisibles électromagnétiquement (à la notable exception près que la coalescence des systèmes binaires d'étoiles à neutrons pourrait donner lieu à l'émission d'un sursaut électromagnétique gamma en plus de l'onde gravitationnelle). On peut donc s'attendre à observer, grâce au rayonnement gravitationnel, des objets nouveaux inconnus en astronomie traditionnelle. De plus, il y a une complémentarité très intéressante entre rayonnements électromagnétique et gravitationnel. Par exemple, les ondes électromagnétiques permettent de constituer une image détaillée de la source car la longueur d'onde est petite en comparaison de la taille de la source. Au contraire, l'onde gravitationnelle a une longueur d'onde typiquement de la même dimension que la source (en effet, c'est le mouvement de la source dans son ensemble qui génère l'onde), et donc s'apparente beaucoup plus à une onde sonore qu'à une onde lumineuse. Le rayonnement gravitationnel est le seul vecteur d'information connu en astronomie qui pourrait rivaliser, et même dans certains cas surpasser, le vecteur électromagnétique (les neutrinos et les rayons cosmiques sont aussi très intéressants mais ne portent pas à d'aussi grandes distances). La future Astronomie gravitationnelle sera

capable d'observer à des distances cosmologiques, pratiquement jusqu'à un rayon de Hubble. Elles devrait se faire en grande partie dans l'espace.

L'observatoire spatial en ondes gravitationnelles LISA détectera dans la bande de fréquence entre 10^{-1} et 10^{-4} Hz inaccessible depuis le sol. Des antennes gravitationnelles terrestres sont actuellement en phase d'intégration sur plusieurs sites, comme par exemple le projet franco-italien VIRGO, près de Pise. Ces détecteurs sont adaptés à des ondes de fréquences allant de quelques Hz à plusieurs kHz. Il leur est très difficile, par principe, d'étendre vers le bas leur sensibilité, en raison des perturbations sismiques, des gradients dynamiques de gravité donnant un bruit prohibitif à basse fréquence (< 1 Hz), et pratiquement, en raison de la limite de dimensions imposée par la taille des terrains disponibles et donc des interféromètres.

Le principe de la mission LISA consiste à établir entre trois satellites distants de $5 \cdot 10^6$ km, des liens laser tels que la phase reçue soit en permanence mesurée par comparaison avec un oscillateur local. La comparaison de deux trajets optiques distincts entre les trois satellites volant en formation triangulaire sur une orbite héliocentrique est effectuée avec une résolution meilleure que $20 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ et donne l'information sur l'effet de l'onde gravitationnelle susceptible de se propager entre les deux bras de l'interféromètre de Michelson ainsi réalisé. Bien entendu, il est nécessaire que les satellites enferment en leur sein des masses inertielles, en chute libre sous l'effet des seuls champs gravitationnels, et soustraites à l'effet perturbateur de l'atmosphère résiduelle ou des pressions de radiation, chaque masse définissant l'une des extrémités des trajets optiques. La géométrie du système à trois côtés permet de disposer de deux interféromètres indépendants, et donc de pouvoir déterminer la direction et la polarisation de l'onde gravitationnelle incidente. Avec une bande fréquentielle de détection comprise entre 10^{-4} Hz et 0,1 Hz, l'amplitude minimum de l'onde de gravitation, détectable avec un temps d'intégration d'un an, est de l'ordre de 10^{-23} (10^{-3} Hz/f) autour de 10^{-3} Hz, autorisant ainsi la détection du rayonnement de binaires compactes, de la coalescence des trous noirs, du rayonnement gravitationnel du fond cosmologique. Un certain nombre de sources connues (naines blanches galactiques) permettront de vérifier directement des prédictions dynamiques de la Relativité Générale.

L'article de A. Rüdiger et de ses collègues européens dans cette revue décrit la mission LISA et précise les attentes complémentaires et les techniques spécifiques aux projets terrestres et spatiaux.

Luc Blanchet dans son article fait le point sur la théorie du mouvement des systèmes binaires d'objets compacts au moyen d'une formulation lagrangienne. Ce type de travail est essentiel pour l'analyse du signal des futures mesures interférométriques. Dans le même ordre d'idée, l'observation de la coalescence de deux trous noirs (notamment de Kerr) devrait permettre de confronter la théorie à un test qualitatif et quantitatif sans précédent. La condition préalable est d'avoir réussi à calculer (numériquement) la dynamique de la fusion des deux horizons ainsi que la forme d'onde gravitationnelle émise, ce qui constitue actuellement un problème très difficile et non résolu.

Gravimétrie spatiale et interférométrie atomique

Afin de compléter ce tour d'horizon des projets spatiaux concernant la physique fondamentale, nous avons voulu également intégrer dans cette revue les progrès en cours dans le domaine de la connaissance du champ de gravité de la Terre et de son géoïde qui devrait voir se réaliser dans la décennie à venir une véritable révolution grâce aux trois projets en cours CHAMP, GRACE et GOCE. Ces projets, dont l'article de G. Balmino présente la synthèse, exploitent des techniques instrumentales différentes et proposées voici trente ans pour certaines d'entre elles, mais dont la réalisation a nécessité la maturité des technologies spatiales similaires à celles des projets décrits précédemment. Citons entre autres, la mesure précise d'accélération très faibles, la réalisation de satellites à traînée compensée, la réalisation de liens optiques ou micro-ondes entre satellites ou de satellite à la Terre. La connaissance précise du champ de gravité terrestre est d'autre part un élément essentiel pour la précision des expériences de physique fondamentale proposées. Notons par exemple, la nécessité dans la mission MICROSCOPE d'évaluer les perturbations résiduelles induites par le gradient de gravité sur les deux masses en orbite. Bien évidemment, la trajectographie

précise du segment spatial et du champ gravitationnel perçu en orbite est également une nécessité pour la mission ACES où les comparaisons entre horloges au sol et spatiales sont essentielles.

Enfin, nous voudrions conclure cet avant propos en disant quelques mots sur les perspectives nouvelles offertes par l'interférométrie atomique. La masse des atomes confère aux interféromètres à ondes atomiques une sensibilité potentielle aux champs inertiels très supérieure à celle des interféromètres lumineux. La démonstration de gyromètres, gravimètres, gradiomètres, au moyen d'interféromètres atomiques a déjà été faite au sol avec un niveau de performances au moins égal à celui des meilleurs instruments utilisant la lumière ou la mécanique de précision. D'autre part, ces mêmes interféromètres permettent de réaliser des horloges optiques aux performances de stabilité et d'exactitude remarquables, bénéficiant aussi des nouvelles méthodes compactes et directes de mesure de fréquences optiques par lasers femtosecondes. Pour alimenter ces interféromètres, le condensat de Bose–Einstein apparaît déjà comme l'archétype des lasers à atomes ou atomasers, futures sources cohérentes d'ondes atomiques neutres.

A cause de la chute des atomes sur Terre, ces appareils trouveront une place naturelle dans l'environnement spatial en micro-gravité. L'augmentation conséquente des temps de vol atomiques entre séparatrices se traduira directement par un accroissement considérable de la sensibilité de ces appareils. La technologie de piégeage et de manipulation d'atomes froids dans l'espace développée pour PHARAO va donc très vite être étendue aux capteurs inertiels dans des combinaisons astucieuses de centrale à inertie et d'horloge ultra-performantes pour la navigation des satellites. Les applications à la Physique Fondamentale dans l'espace constituent l'essence du projet HYPER (assessment study report ESA-SCI (2000), 10 July 2000) : mesure très précise de la constante de structure fine (gain potentiel de un à deux ordres de grandeur sur l'exactitude), tests du principe d'équivalence au niveau atomique en utilisant deux espèces atomiques distinctes, détection de la signature périodique de l'effet Lense–Thirring en orbite polaire, études de décohérence... En fait, ces interféromètres sont tellement sensibles aux champs gravito-inertiels et à leurs gradients, qu'il faudra, au cours de ces prochaines années, développer de nombreuses astuces et techniques nouvelles d'optique atomique (par exemple la conjugaison de phase des ondes atomiques...) pour isoler la signature spécifique des phénomènes recherchés ou mesurés.

Christian J. Bordé

Pierre Touboul

N.B. Cet avant-propos reprend de larges extraits d'un rapport de prospective établi pour le CNES par le groupe ad hoc de physique fondamentale : Claude Audoin, Alain Bernard, Luc Blanchet, Christian J. Bordé (Président), Alain Brillet, André Clairon, Pierre Fayet, Michel Granveaud, Serge Jullian, Sylvie Léon (responsable thématique CNES), François Mignard, Serge Reynaud, Christophe Salomon, Pierre Touboul, Philippe Tourrenc et Jean-Yves Vinet. La communauté scientifique française de ce domaine est en grande partie regroupée au sein du GDR 1035 du CNRS : Gravitation et Expérience (GREX). Ce numéro s'appuie sur deux journées scientifiques organisées à l'ONERA, les 18 et 19 janvier 2001, par les deux rédacteurs en chef invités, avec l'aide très appréciée de Manuel Rodrigues et sous l'égide de l'ONERA, du CNES et de l'Académie des Sciences.