ANNEXE 2

APPEL A IDEES

LETTRE D'ENVOI

Toulouse, le 24 juillet 1990
RE/MV/D 90 - 129

Madame, Monsieur

Le Comité des Programmes Scientifiques du CNES a approuvé la proposition d'organiser au printemps 1991 un séminaire de prospective dans le domaine de la recherche en conditions de microgravité et de ses possibilités d'applications (sciences physiques et sciences de la vie), à l'image de ceux tenus en 1981 aux Arcs et en 1985 à Deauville.
Ce séminaire aura pour but d'identifier les grands thèmes sur lesquels l'effort français de recherche spatiale devra se concentrer dans les 10 ans à venir, à partir des résultats obtenus et des événements survenus depuis 5 ans, des évolutions observées et des perspectives qui se dessinent.
La réflexion portera également sur les moyens spatiaux et au sol associés, ainsi que sur l'organisation de la communauté scientifique et les relations entre les différents partenaires.
Les orientations dégagées au cours du séminaire permettront au CNES d'établir la programmation dans le domaine, en tenant compte (ou en intervenant sur) des décisions stratégiques extérieures (position française sur l'homme dans l'espace, sur Columbus, hypothèses budgétaires,...).
L'identification des axes thématiques prioritaires est prévue grâce à une large consultation de la communauté scientifique, dont le résultat sera examiné par des groupes de travail par discipline comprenant des experts scientifiques et les spécialistes thématiques du CNES. Les rapports préparatoires contenant les analyses des propositions reçues et les synthèses préliminaires seront soumis à débat lors du séminaire.
C'est pourquoi nous serions très heureux si vous acceptiez de répondre au présent appel à idées, en proposant des thématiques de recherche, qu'elles soient entièrement nouvelles ou qu'elles aient déjà fait l'objet d'études, ainsi qu'en recommandant des types de missions spatiales, des instruments et les supports techniques qui paraissent les mieux adaptés à la réalisation des programmes proposés. Il s'agit de faire des propositions permettant de bâtir une prospective à moyen et long terme, et non de proposer des sujets d'expérimentation, qui font l'objet de l'appel annuel habituel.
Pour vous aider dans vos réflexions, vous trouverez en annexe 1 une fiche de synthèse sur le séminaire lui-même, en annexe 2 une liste indicative non limitative des thèmes de recherche actuellement abordés, en annexe 3, des informations sur les instruments et les moyens d'emport existant ou à venir et, en annexe 4, un modèle standard de présentation des réponses au présent appel à idées.
Vous pouvez adresser vos réponses au CNES (Sous-Direction Microgravité et Sciences de la Vie, 2 place Maurice Quentin - 75001 PARIS), en 20 exemplaires, avant le 30 septembre 1990.
En vous remerciant par avance de votre coopération, je vous prie d'agréer, Madame, Monsieur, l'assurance de ma considération distinguée.

Le Sous-Directeur
Microgravité et Sciences de la Vie
Gérard RIVIERE

DIFFUSION DE L'APPEL A IDEES

Pour action

Laboratoires scientifiques

Pour information

Ministère de la Recherche et de la Technologie -
F. PRADERIE, D. VIDAL-MADJAR
Délégation Générale à l'Espace (Ministère des PTE) -
M. PETIT, M. GLASS

Membres du CPS :
Professeur DAUTRAY - Président du CEA/LIMEIL
F. BECKER - GSTS
J-L. BERTAUX - Service d'Aéronomie
M. BLANC - Observatoire Midi Pyrénées
S. BLANQUET - Laboratoire de Biochimie
A. CHEDIN - LMD
V. COURTILLOT - IPGP
J. HEYVAERTS - Observatoire de Paris/Meudon
JF. MINSTER - La Mouette/GRGS
G. SERRA - CESR
J. SEYLAZ - UER Physiologie
JC. TOLEDANO - CNET
CNES:
P - J.L. LIONS
DG - J-M. LUTON
S/DGA - D. SACOTTE
RA/DGA - J-J. SUSSEL
BCT - A. SIMON, J-J. CAHEN, P. PESENTI
DG/CN - J. BLAMONT
DG/CS - R. PELLAT
S/EI/D - P. GUERIT
S/SP/D - J. MOUYSSET
S/EI/PI - A. GAUBERT, A. PERARD
S/PE - J. MUTIN
S/SP/P - B. NUTTEN, D. VASSAUX
S/SP/M - J-C. PENNANECH, D. FAIVRE
RE/D - J. BRETON
RE/SU/D - G. DEBOUZY
RE/MV/D - G. RIVIERE
RE/FT - I. SADOURNY
RE/MV/FM - R. BONNEVILLE, S. LEON, F. JAMIN-CHANGEART, B. ZAPPOLI
RE/MV/IO - A. ESTERLE, P. DUTTO, A. PERRET
RE/MV/SV - G. GARGIR, C. ANDRE-DESHAYS, H. BOZOUKLIAN, M. VISO

OBJECTIFS DU SEMINAIRE

Le séminaire a pour but d'identifier les grands thèmes sur lesquels l'effort spatial français devra se consacrer dans les 10 ans à venir, dans le domaine de la recherche en microgravité et de ses possibilités d'applications (sciences physiques et sciences de la vie).
La réflexion portera également sur les moyens spatiaux et au sol associés, ainsi que sur l'organisation de la communauté scientifique et ses relations avec les différents partenaires.
Les orientations dégagées au cours du séminaire permettront au CNES d'établir la programmation dans le domaine, en tenant compte (ou en intervenant sur) des décisions stratégiques extérieures (position française sur l'homme dans l'espace, sur Columbus, hypothèses budgétaires,...).
Les principaux points à aborder au cours du séminaire sont:

Etat de l'art dans les différentes disciplines

- Bilan des résultats scientifiques et appliqués obtenus par les équipes françaises au cours des 5 dernières années. Comparaison avec les objectifs fixés à Deauville (1985).
- Situation dans le contexte international
- Situation par rapport à la recherche "non spatiale"
- Domaines non couverts
- Bilan des instruments actuellement disponibles pour les études (ESA et CNES), tendances actuelles.

Axes thématiques prioritaires

- Identification des axes "dans l'absolu" (recherche et applications)
- Sélection des axes prioritaires pour les équipes françaises, cadrage dans le contexte international, spécificité/concurrence
- Identification de l'instrumentation adaptée.

Moyens spatiaux nécessaires

- Caractéristiques des différentes classes de moyens nécessaires (durée, qualité de la microgravité,...)
- Moyens existants et prévus
- Adéquation des moyens - Besoins complémentaires
- Gestion des moyens (y compris segments sols).

Stratégie de développement d'une meilleure synergie recherche/application en microgravité

Organisation de la communauté en microgravité

- Méthodes et relations de travail dans le cadre européen
- Relations/organisation CNES - Communauté scientifique
- Besoins des organismes et laboratoires (équipements, infrastructures, ingénierie).

CALENDRIER

Juin 90 : Présentation au Comité des Programmes Scientifiques du CNES des objectifs et méthodes.

Juillet 90 : Lancement appel à idées.

Septembre 90 : Mise en place de groupes de travail.

Octobre 90 : Réponses à l'appel à idées - Début des réunions des groupes de travail - Première synthèse des réponses par les groupes ad hoc du CPS.

Janvier 91 : Fin des réunions des groupes de travail. Lancement des invitations pour le séminaire.

Février 91 : Synthèse définitive - Validation par les groupes ad hoc du CPS - Elaboration dossiers séminaire.

Mars 91 : Envois dossiers pour le séminaire.

Avril 91 : 3-4-5 Aix-en-Provence - Séminaire (Arrivée le 2 au soir).

Avril - Juin 91 : Analyse des résultats, élaboration d'une stratégie programmatique (CNES).

Juin 91 : Présentation des conclusions au CPS.

THEMES DE RECHERCHE "SCIENCES PHYSIQUES EN MICROGRAVITE" (Liste non limitative)

1. Physique fondamentale

- Interactions fondamentales, par exemple : équivalence masse pesante/masse inerte
- Atomes froids.

2. Physique des fluides et sciences des matériaux

Ecoulements monophasiques
- Propriétés de transport, instabilités hydrodynamiques
- Effets de taille finie, mouillage, convection capillaire.

Transitions de phase
- Germination et croissance des phases
- Stabilité de l'interface
- Couplage hydrodynamique/croissance
- Phases métastables.

Réactions chimiques
- Combustion
- Réactions hors équilibre, instabilités chimiques
- Chimie de précipitation.

Ecoulements diphasiques gaz-liquide, liquide-liquide

Ecoulements solide-liquide

Phénomènes critiques dans les fluides
- Séparation des phases, stabilité de l'interface
- Anomalies de transport
- Fluides hypercompressibles.

Milieux aléatoires
- Transition sol-gel, agrégats, fractals.

Solidification
- Instabilités morphologiques des interfaces
- Composites in situ (eutectiques, monotectiques)
- Amorphes (verres)
- Macro et micro ségrégations (alliages métalliques, semi-conducteurs alliés ou dopés).

Croissance cristalline
- Croissance à partir du bain fondu (procédé Bridgman, zone flottante, élaboration sans contact, ex. : semi-conducteurs, supra-conducteurs, verres)
- Croissance en solution (ex. organiques)
- Croissance en phase vapeur.

3. Macromolécules

- Séparation/purification
- Cristallisation.

THEMES DE RECHERCHE EN SCIENCES DE LA VIE (Liste non limitative)

- Neurosciences
- Physiologie musculaire
- Physiologie et métabolisme du tissu osseux
- Physiologie cardiovasculaire et respiratoire Régulation et contrôle hormonal
- Adaptation à l'environnement: stress, confinement, contraintes multiples, facteurs humains, rythmes biologiques
- Immunologie
- Pharmacologie - thérapeutique - radioprotection
- Physiologie et biologie du développement animal
- Biologie gravitationnelle (microbienne, animale et végétale)
- Macro-molécules biologiques
- Radiobiologie spatiale et radiodosimétrie
- Systèmes écologiques artificiels
- Cosmochimie organique et prébiotique (Sciences de la Vie dans l'Univers)

Votre réflexion peut s'enrichir d'informations synthétiques sur les caractéristiques de performance et d'utilisation des instruments scientifiques et des moyens d'emports actuellement disponibles ou en cours de développement.
Pour les instruments français et les moyens d'emport auxquels le CNES peut vous donner accès, une série de fiches pourra vous être envoyée à votre demande.
D'autres informations peuvent être obtenues en vous procurant les documents suivants:

Material and Fluid Sciences - Experiment Hardware and Facilities :

Sounding Rockets	ESA SP - 1116
Eureca	ESA SP - 1118
Spacelab	ESA SP - 1120

(ESA, 8-10 rue Mario Nikis, 75738 Paris Cedex 15 - Tél. 42 73 76 54).

Microgravité - Moyens d'Accès et Appareils d'Expérimentation.
Novespace - Octobre 1989
(Novespace, 15, rue des Halles - 75001 Paris - Tél. 42 33 41 41).

Experiment Facilities for Science and Applications under Microgravity - NASDA.
(Space Experiment Group, NASDA, 2.4.1 Hamamatsu-cho, Minato-ku, Tokyo 105, Japan - Tél. 03 769 8182).

Microgravity Science and Applications - Apparatus and Facilities - NASA.
(Microgravity Science and Application - Code SN, NASA Headquarters, Washington D.C. 20 546 - Tél. (202) 453 14 90).

Spacelab and Attached Missions - OSSA Flight Systems Division - NASA.
(Office of Space Science and Application - Code S, NASA Headquarters, Washington D.C 20 546 - Tél. (202) 453 14 09).

MODELE DE PRESENTATION DES REPONSES A L'APPEL A IDEES

Lors de la rédaction de votre idée, pouvez-vous, dans la mesure où vous en avez la possibilité, répondre aux questions citées ci-dessous:

1. Objectifs scientifiques, contexte thématique à moyen et long terme.
2. Situation actuelle du thème de recherche.
3. Concept et programme expérimental (nombre de vols, fréquence de vols,...).
4. Situation par rapport à des expérimentations (sol ou spatiales) existantes ou prévues en France ou à l'étranger.
5. Exigences de missions, par exemple:
   - Durée de la mission, exigences particulières (accès tardif, récupération rapide,...)
   - Masse et encombrement, puissance, contrôle thermique, données à transmettre.
6. Moyens d'emports envisagés.
7. Cadre de réalisation:
   - Moyens techniques et humains nécessaires
   - Collaboration inter-laboratoires envisagée (national ou international).
8. Echéance et coût (estimation approximative).

REMARQUE
Si vous souhaitez des informations complémentaires, vous pouvez contacter les personnes suivantes :

- M. H. BOZOUKLIAN (Biologie) - Tél. 45 08 77 84
- Mme C. DESHAYS (Physiologie et médecine spatiale) - Tél. 45 08 78 27
- Mme S. LEON (Matériaux en microgravité) - Tél. 45 08 78 02
- M. B. ZAPPOLI (Fluides en microgravité) - Tél. 61 27 44 68
- M. F. JAMIN-CHANGEART (Macromolécules et projets industriels) - Tél. 61 27 39 48

ANNEXE 3

PROGRAMME DE TRAVAIL

PROGRAMME GENERAL

Le séminaire se déroulera en trois parties :

1ère partie : 3 avril au Palais des Congrès
En séance plénière, trois grands exposés scientifiques suivis de présentations générales sur l'état de l'art et le bilan dans chacune des trois grandes disciplines : Fluides et Matériaux, Biologie et, Physiologie et Médécine Spatiale.

2ème partie : 4 avril à l'Hôtel du Roi René
Réunions des groupes de travail : rapports des groupes de travail préparatoires et des experts invités. Débat et propositions de thèmes prioritaires. Recommandations sur les moyens nécessaires, l'organisation de la communauté et ses relations avec le CNES. Préparation et rédaction des synthèses.

3ème partie : 5 avril au Palais des Congrès
Présentations en séance plénière des synthèses et recommandations des groupes de travail.

CONCLUSIONS GENERALES

MERCREDI 3 AVRIL 1991
au Palais des Congrès

8H30	Ouverture du Séminaire par Jacques Louis LIONS, Président du CNES et Jacques BRETON, Directeur de la Recherche.

9H00 - 11H00 CONFERENCES SCIENTIFIQUES
Président de séance : Professeur J.L. LIONS

9H00- 9H40	"Problèmes physiques à pertinence spatiale" par J-C. TOLEDANO
9H40-10H20	"Cytosquelette et dynamique cellulaire" par M. BORNENS
10H20-11H00	"Les systèmes sensori-moteurs: mécanismes et propriétés adaptatives" par A. BERTHOZ
11H00-11H20	P A U S E

11H20 - 12H45 LE CONTEXTE
Président de séance : J. BRETON

11H20-11H35	Fluides et Matériaux par R. BONNEVILLE
11H35-11H50	Sciences de la Vie par G. GARGIR
11H50-12H45	Les moyens de la microgravité par A. ESTERLE - Moyens d'emport - Moyens sol et organisation de la communauté - Synergie Recherches / Applications
13H00-14H30	D E J E U N E R à l'Hôtel du Roi René

MERCREDI 3 AVRIL 1991
(suite) au Palais des Congrès

14H45-19H00 BILANS ET ETAT DE L'ART
Président de séance : G. RIVIERE, Sous-Directeur "Microgravité"

14H45-16H15 FLUIDES ET MATERIAUX
- Solidification et cristallogénèse en bain fondu par J-J. FAVIER
- Phénomènes critiques dans les fluides par D. BEYSENS
- Croissance cristalline en solution par M.C. ROBERT
- Cristallogénèse des protéines par A. DUCRUIX

16H15-17H15 BIOLOGIE
- Biologie cellulaire gravitationnelle par L. SCHAFFAR
- Radiobiologie spatiale par H. PLANEL
- Ecosystèmes artificiels et support de vie dans l'Espace par G. PELTIER

17H15-17H40 P A U S E

17H40-19H00 PHYSIOLOGIE ET MEDECINE SPATIALE
- Physiologie cardio-vasculaire par C. GHARIB et L. POURCELOT
- Physiologie osseuse par C. ALEXANDRE
- Physiologie musculaire par Y. MOUNIER
- Médecine spatiale par A. GUELL

19H45 ... COCKTAIL suivi du DINER à l'Hôtel du Roi René

JEUDI 4 AVRIL 1991
à l'Hôtel du Roi René

REUNION DES GROUPES DE TRAVAIL SOUS LA PRESIDENCE DE :
- S. BLANQUET pour la Biologie
- J. SEYLAZ pour la Physiologie
- J-C. TOLEDANO pour les Fluides et Matériaux

8H30-12H30 AVEC PAUSE de 10H30 à 11H00

(8H30-9H00 Réunion commune des groupes Physiologie et Biologie, avec deux exposés de 15min :
Animaux et recherche spatiale par C. MILHAUD, et
Immunologie spatiale par J. DAVOUST.)

(8H30-9H15 Groupe "Fluides et Matériaux", avec deux exposés de 20 mn :
"Le projet STEP" par T. DAMOUR et
"Atomes ultra-refroidis" par C. SALOMON.)

12H45-14H00 DEJEUNER au Restaurant "LA ROTONDE"

14H15-19H00 AVEC PAUSE entre 16H30 et 17H00

19H30-20H30 Table ronde sur la téléscience
Salle de réunion des CITADINES

21H00 DINER à l'Hôtel du Roi René

VENDREDI 5 AVRIL 1991
au Palais des Congrès

SYNTHESE ET RECOMMANDATIONS :
Président de séance : J-J. SUSSEL, Directeur Général Adjoint chargé de la Recherche et des Applications

9H00-10H30 Fluides et Matériaux
Table ronde avec : J-C. TOLEDANO, J-J. FAVIER, Y. POMEAU et R. BONNEVILLE

10H30 P A U S E

11H00-12H00 Biologie
Table ronde animée par S. BLANQUET, avec : MM. D. AVERBECK, M. BORNENS, A. BRACK, J-M. LEGAY

12H15-13H45 DEJEUNER à l'Hôtel du Roi René

14H00-15H30 Physiologie et médecine spatiale
Table ronde animée par J. SEYLAZ, avec : MM. A. SANS, M. FARDEAU, D.KUNTZ, B. LEVY, I. ASSENMACHER, J. TIMBAL

15H30-16H00 CONCLUSIONS GENERALES
par Gérard RIVIERE, Sous-Directeur "Microgravité et Sciences de la Vie"

Clôture du séminaire par Jean-Daniel LEVI, Directeur Général du C.N.E.S.

ORDRE DU JOUR
GROUPE PHYSIOLOGIE ET MEDECINE SPATIALE

JOURNEE DU 4 AVRIL
REUNION DU GROUPE "PHYSIOLOGIE ET MEDECINE SPATIALE"

Groupes thématiques : 09H15 à 19H00
(sous la Présidence de J. Seylaz et le secrétariat de C. André-Deshays)

09H15 : Introduction (J. Seylaz)
09H30 : **Physiologie neurosensorielle** (animateurs : P. Buser, R. Naquet, A. Sans)
- Présentation du rapport du groupe : A. Sans (10 min)
- Discussion

10H30 à 10H45 : Pause

10H45 : **Physiologie cardio-vasculaire** (animateurs : H. Bricaud et B. Levy)
-Présentation du rapport du groupe : B. Levy (10 min)
-Discussion

11H45 : **Physiologie des tissus de soutien** (animateurs : M. Fardeau, D. Kuntz, G. Vassort)
-Présentation du rapport du groupe Muscle : G. Vassort (10')
-Présentation du rapport du groupe Os : D. Kuntz (10')
-Discussion

12H45 à 14H00 : Déjeuner

14H15 : **Médecine spatiale** (animateur : J. Timbal)
-Présentation du rapport du groupe : J. Timbal (10')
-Discussion

15H15 : **Adaptation à l'environnement** (animateurs : Y. Assenmacher, J. Boissin)
-Présentation du rapport du groupe : J. Boissin (10')
-Discussion

16H15 à 16H30 : Pause

16H30 : Discussion générale
17H30 : Préparation du rapport du Groupe
19H00 : Fin de la réunion

ORDRE DU JOUR
GROUPE BIOLOGIE SPATIALE

JOURNEE DU 4 AVRIL
REUNION DU GROUPE "BIOLOGIE SPATIALE"

09H15 : Introduction (S. Blanquet)
09H30 : Présentation "Exobiologie" (A. Brack)
09H50 : Discussion
10H10 : Rapport "Radiobiologie Spatiale" (D. Averbeck)

10H25 : Pause

10H45 : Compléments/Discussion
11H40 : Rapport "Radiobiologie Gravitationnelle" (M. Bornens)
11H55 : Compléments/Discussion

12H30 : Déjeuner

14H20 : Reprise de la discussion
14H40 : Rapport "Ecosystèmes Artificiels" (J-M. Legay)
14H55 : Compléments/Discussion
15H50 : Discussion générale sur :
- instrumentation/moyens sol et moyens spatiaux
- organisation de la communauté scientifique et coopérations internationales

16H30 : Pause

16H50 : Reprise de la discussion
17H30 : Préparation du Rapport du Groupe
19H00 : Fin de la réunion

ORDRE DU JOUR
GROUPE SCIENCES PHYSIQUES EN MICROGRAVITE

JOURNEE DU 4 AVRIL
REUNION DU GROUPE "BIOLOGIE SPATIALE"

08H30 - 09H30 : séance plénière Sciences physiques en microgravité
2 exposés de 20 min:
- le projet STEP (Satellite Test of the Equivalence Principle), par F. Barlier (CERGA)
- atomes refroidis par laser, par C. Salomon (ENS)
Présentation de la journée.

9H30 - 12H30 : séparation en 4 groupes thématiques; discussions par thème :
- fluides (prés. P. Clavin, secr. B. Zappoli)
- solidification / cristallogénèse en bain fondu (prés. J-J. Favier, secr. S. Léon)
- croissance cristalline, y compris protéines (prés. M-C. Robert, secr. F. Jamin-Changeart)
- milieux aléatoires (prés. R. Blanc, secr. R. Bonneville) .

12H30 - 14H : repas

14H - 16H : séparation en 4 groupes thématiques; préparation des synthèses par thème; désignation des rapporteurs.

16H - 18H : séance plénière Sciences physiques en microgravité: présentation des synthèses partielles (20 min par thème); discussion.

18H30 - 20H30 : comité restreint : présidents, secrétaires et rapporteurs des groupes thématiques, prés. J-C. Tolédano: préparation de la synthèse finale.

21H00 - 22H30 : dîner

22H30 - aube : comité restreint : préparation des interventions du lendemain matin et rédaction des transparents.

ANIMAUX ET RECHERCHE SPATIALE

Claude MILHAUD
Services de Santé - 90492 Armées

PRESIDENT **M. Claude MILHAUD**

MEMBRES

M. Hervé BOZOUKLIAN
CNES/RE/MV/SV
75039 PARIS CEDEX 01
M. Pierre CHARLES-DOMINIQUE
CNRS/URA 1183
Ecologie MNHN
91800 BRUNOY
M. Bernard CHARLEY
INRA - Immunologie/Virologie
78350 JOUY EN JOSAS
M. François CLARAC
CNRS-LNF2
13402 MARSEILLE CEDEX 9
Mme Christine de VERNEJOUL
INSERM U18
75010 PARIS
Mme Claudie DESHAYS
CNES/RE/MV/SV
75039 PARIS CEDEX 01
Mme Simone GRINFELD
Centre de Biologie du Développement
Université Paul Sabatier
31062 TOULOUSE CEDEX
Mme Françoise JOUFFROY
CNRS/URA 1137
75005 PARIS
M. Roland MASSE
CEA/DSV/DPS
92265 FONTENAY AUX ROSES
M. Jacques SEYLAZ
CNRS/URA 641
75010 PARIS
M. Pierre-Louis TOUTAIN
ENVT/Service de Physiologie
31076 TOULOUSE CEDEX
M. Michel VISO
CNES/RE/MV/SV
31055 TOULOUSE CEDEX

REDACTEUR **M. Michel VISO**
CNES/RE/MV/SV
31055 TOULOUSE CEDEX

INTRODUCTION

Le groupe de réflexion "Animaux et Recherche spatiale" avait pour objectif, de faire l'inventaire des espèces animales impliquées actuellement dans la recherche spatiale, d'évaluer l'intérêt de l'utilisation de ces modèles dans la recherche en microgravité, de définir les conditions d'expérimentation au cours des vols spatiaux et enfin de proposer les premiers éléments de programmes de recherche fondés sur ces modèles.

HISTORIQUE ET SITUATION ACTUELLE

Les animaux ont précédé les êtres humains lors des premiers vols spatiaux. De nombreux animaux ont été utilisés, tant aux Etats-Unis (chimpanzés et autres primates) qu'en Union Soviétique (chiens) avant les vols des premiers astronautes Y. Gagarine et A. Sheppard. Après ces essais et avec le développement des vols spatiaux, les animaux ont été utilisés non plus à des fins de démonstration, mais pour la recherche biomédicale dans l'espace.

En France

Depuis les premières expériences en fusée sonde (1962 à 1967), plusieurs équipes scientifiques françaises utilisent des animaux lors d'expérimentation de biologie et de physiologie spatiale. La France (CNES) et l'Europe (Agence Spatiale Européenne) ne disposant pas de satellite récupérable, toutes les expérimentations sont donc réalisées en

coopération avec l'Union Soviétique ou les Etats-Unis. Les scientifiques français participent aux vols de la série des Biocosmos (rats ou singes rhésus). En coopération avec les Etats-Unis, ils participeront au prochain vol SLS-1 (rats). Ils sont engagés d'autre part, dans une coopération à long terme avec la NASA, dans le cadre du projet RHESUS (singes rhésus).

A l'étranger

L'Union Soviétique poursuit depuis 1973 un programme Biocosmos qui a permis d'expérimenter dans l'espace de nombreuses espèces animales: drosophiles, souris, rats et singes rhésus. Dernièrement, lors d'un vol sur la station Mir en coopération avec le Japon, des grenouilles ont été utilisées. L'Union Soviétique développe les derniers vols BIOCOSMOS en collaboration croissante avec les Etats-Unis (29 expériences avec le BIOCOSMOS en 1989) et quatre projets scientifiques scientifiques américains ont été retenus pour participer au prochain vol qui emportera 2 jeunes singes rhésus. En contrepartie, des expériences soviétiques seront embarquées sur les rats qui participeront au prochain vol de SPACELAB (SLS-1). Théoriquement, le programme BIOCOSMOS doit s'arrêter lors du prochain vol en 1992.
Les Etats-Unis ont interrompu en 1969, après l'échec scientifique de BIOSATELLITE III, le programme de vol en satellite automatique de modèles animaux. Les recherches sur des animaux en microgravité ont repris seulement au début des années 1980 avec le programme "Navette". Il a culminé en 1985 avec l'embarquement de 24 rats et de 2 singes écureuils sur Spacelab 3 (SL3). D'autres expériences ponctuelles intéressant des abeilles ou des poissons ont été réalisées. Un module d'expérimentation de taille réduite (Animal Enclosure Module) utilisable dans le "Middeck" de la navette a permis de faire d'intéressantes observations sur la régénération osseuse avec des rats. Actuellement 24 rats doivent voler sur SLS-1 (mai 1991) et au moins 48 autres devraient participer au vol de SLS-2 (1993). D'autre part, trois vols du projet "Rhésus" sont prévus, le premier en 1995 sur SLS-3.
Il semble que l'agence chinoise et l'agence japonaise aient des projets de satellites biologiques, mais nous ignorons le contenu concret de leurs programmes.

JUSTIFICATION DES MODELES ANIMAUX

L'expérimentation animale est utilisée pour des recherches à visée cognitive ou des recherches finalisées, en relation avec l'adaptation de l'homme à l'espace. Dans le cas, en particulier, des recherches finalisées l'utilisation de l'homme comme sujet d'expérience est limitée pour des raisons scientifiques, éthiques et opérationnelles.

Justification scientifique

RECHERCHE COGNITIVE

L'expérimentation spatiale devrait mettre en évidence le rôle joué par la gravité sur de nombreuses fonctions physiologiques. La disparition du référentiel gravitaire devrait, en particulier, éclairer les mécanismes fondamentaux de l'organisation du développement embryonnaire ou permettre de hiérarchiser les facteurs d'environnement intervenant dans le développement ontogénique des systèmes sensori-moteurs. La nécessité d'expérimenter sur des embryons ou des nouveaux nés implique, pour ces domaines, de recourir à des espèces animales, à gestation courte et à développement rapide.
D'autre part, le caractère spécifique de l'agression que constitue le vol spatial, en particulier par l'association de la microgravité et du rayonnement cosmique, devrait induire des observations originales tant sur le plan physiologique que physio-pathologique. De telles observations ainsi que des recherches à visée cognitive, par exemple sur la locomotion ou en neurophysiologie, exigent d'intervenir, in vivo, soit au niveau des cellules soit au niveau des organes et donc de recourir à des modèles animaux.

RECHERCHE FINALISEE

De nombreuses disciplines scientifiques ont identifié des modèles animaux caractéristiques des processus physiologiques ou pathologiques observés chez l'homme ou chez d'autres espèces animales rares ou moins aisément utilisables. Dans ces conditions, chaque discipline scientifique souhaite expérimenter dans l'espace sur des modèles animaux qu'elle met en œuvre couramment au sol. Les modèles animaux peuvent donc contribuer à l'évaluation en première instance de l'effet de la microgravité ou des radiations sur différentes fonctions et de façon plus appliquée à l'étude de l'efficacité d'éventuelles mesures prophylactiques pour combattre un effet indésirable de

l'environnement spatial.
Par ailleurs, malgré la rigueur de la sélection des spationautes, leur situation psychologique, leur histoire personnelle, leur passé aéronautique et spatial ne sont jamais identiques. Cette situation introduit des biais souvent trop importants pour autoriser une analyse statistique satisfaisante qui puisse être généralisée. Seuls les lots expérimentaux d'animaux sélectionnés, sont susceptibles de remplir les conditions d'homogénéité rigoureuses nécessaires à la plupart des expériences de physiologie et à leur interprétation statistique.

Justification éthique

L'expérimentation animale est largement utilisée dans les laboratoires de recherche biomédicale. Il est évident que des considérations éthiques et morales limitent d'avantage l'utilisation de l'homme que de l'animal comme sujet d'expérience. De nombreuses techniques d'investigation impliquant des risques pour la santé du sujet expérimental sont donc pratiquées de préférence chez l'animal. De telles expérimentations doivent, bien entendu, être conformes à la législation en vigueur. Enfin, le recours à l'animal est nécessaire car au cours de vol de plusieurs semaines, il n'est pas envisageable de priver, dans un but expérimental, des spationautes de mesures prophylactiques préparant leur retour à la gravité.

Justification opérationnelle

Les spationautes sont peu nombreux et seule une petite proportion d'entre eux a pu se consacrer à des mesures physiologiques (comme sujet d'expérience). Lors de vols spatiaux, il semble que l'expérimentation apparaisse souvent comme une charge supplémentaire, venant en sus des opérations de maintenance et de la mise en œuvre de la charge utile, technique ou scientifique. Le manque de disponibilité des spationautes limite les possibilités de mesures avant et après le vol. Par contre, l'expérimentation animale permet la multiplication des essais au sol sur les sujets eux-même, mais aussi sur des témoins expérimentaux ou des témoins vivariums identiques ou très proches de ceux ayant participé au vol spatial.

DESCRIPTION DE QUELQUES MODELES ANIMAUX

Au cours de ces réunions, et indépendamment des travaux des autres groupes thématiques, le groupe "Animaux et Recherche spatiale", a identifié plusieurs modèles animaux originaux, totalement nouveaux ou en cours d'utilisation ou de préparation à des vols spatiaux. Les modèles proposés semblent susceptibles de s'acclimater à la microgravité. Ils pourraient être éventuellement utilisés par diverses disciplines, et justifieraient des efforts de développement de matériel, de recherche d'opportunité de vol ou des travaux au sol.

Singe rhésus *(Macaca mulatta)*

Le singe rhésus est un animal couramment utilisé dans les laboratoires de physiologie et de médecine expérimentale. Il a souvent été envoyé dans l'espace par l'Union Soviétique. Sa physiologie est considérée comme très proche de celle de l'homme, et il constitue pour la plupart des disciplines un bon modèle. Il est capable de réaliser des tâches cognitives très élaborées. Lors des vols passés et pour les vols futurs programmés, il est toujours maintenu en situation de stricte contention ce qui, dans l'état actuel des techniques, limite sa durée de séjour dans l'espace à trois semaines. Son utilisation dans un système "non restreint" ou éventuellement sur la station spatiale, nécessite le développement d'un nouveau système de maintenance, ainsi que de matériel de bio-instrumentation : télémesures miniaturisées implantables ou portables, capteurs implantés à longue durée de vie (un an et plus), systèmes automatiques de recueil de données physiologiques et d'échantillons sanguins.

Microcèbe *(Microcebus murinus)*

Le microcèbe est le plus petit des primates connus, arboricole nocturne, omnivore en captivité, pesant de 80 à 150 g pour une taille de 12 cm. Sa reproduction et sa physiologie sont régulées par la photopériode. Cet animal a été l'objet de nombreuses études : cerveau, oreille audition, œil, olfaction, génétique, photopériodisme, stress, comportement, sommeil, reproduction et élevage...
Actuellement, des équipes françaises étudient sa locomotion, son comportement social, l'odorat et les phéromones et il sert de modèle d'étude pour le vieillissement cérébral. Le temps de génération est de moins d'un an et sa longévité de dix ans. Il devrait être aisé d'adapter des systèmes de maintenance des rats pour ces primates. Il

pourrait apporter une contribution décisive à l'étude de la physiologie osseuse en l'absence d'autre espèce animale adaptée à cette étude dans l'espace, de la reproduction et du mal de l'espace.

Singe écureuil *(Saimiri sciureus)*

Le singe écureuil, un petit primate de moins de 1 kg utilisé dans les laboratoires de neurophysiologie, d'immunologie parasitaire et dans l'étude des rythmes biologiques. Il peut supporter des périodes de contention de plusieurs jours et est contrairement au singe rhésus sensible au mal des transports. Sa capacité à effectuer des tâches cognitives n'est pas déterminée avec précision.
Actuellement, il n'est pas utilisé en France par les équipes concernées par la physiologie spatiale. La NASA a fabriqué un module d'expérimentation capable d'héberger simultanément dans le Spacelab quatre animaux. Ce module d'expérimentation a volé en 1983 avec deux singes écureuil au lieu des quatre prévus. La limitation était due à des raisons sanitaires. Ce modèle peut intéresser plusieurs disciplines (physiologie cardio-vasculaire, physiologie neuro-vestibulaire ou du tissu musculaire). Il est envisagé de le faire voler de nouveau dans des vols Spacelab et sur la station spatiale internationale "FREEDOM" en même temps qu'une centrifugeuse de 2,5 m de diamètre.

Rat et rat nouveau-né *(Rattus norvegicus)*

Le rat est fréquemment utilisé au sol par plusieurs disciplines scientifiques allant de la neurophysiologie à la tératologie. Dans de nombreux domaines, son utilisation est parfaitement codifiée (tératologie, simulation de l'impesanteur,...). Il a été utilisé dans l'espace par les Soviétiques et les Américains et plusieurs équipes scientifiques françaises travaillent en coopération avec les agences spatiales de ces deux pays sur ce modèle. Les Soviétiques n'envisagent pas de nouveaux vols de rat (Arrêt du programme Biocosmos). Les Etats-Unis ont développé un module d'expérimentation simplifiée (Animal Enclosure Module, AEM) qui a volé plusieurs fois dans le Middeck de la navette. Il est possible d'embarquer six à huit rats assez fréquemment avec ce système. Un autre module d'expérimentation plus complexe vole dans le Spacelab et peut accueillir vingt-quatre rats en cages individuelles (RHAF Rodent Cage). Il est possible d'effectuer quelques manipulations des animaux à l'aide d'une boîte à gant (General Purpose Work Station) adjacente. Le rat présente cependant quelques particularités physiologiques (tissu osseux,...) qui le distingue nettement des autres mammifères. Cette espèce est très sensible aux conditions d'environnement, et l'utilisation des souches sélectionnées pour leur résistance au stress pourrait être recommandée.
Le rat nouveau-né est bien connu des neuro-physiologistes. Très immature à la naissance, le rat nouveau-né poursuit un développement régulier entre 0 et 21 jours. Son utilisation dans l'espace permettrait de comprendre les problèmes fondamentaux d'organisation sensori-motrice des mammifères. Au-delà des neurosciences, ce modèle est susceptible d'intéresser d'autres disciplines (tissus osseux, tissus musculaires, immunologie...). Actuellement, on ne sait pas assurer une fécondation, une gestation et une lactation dans l'espace.

Souris *(Mus musculus)*

La souris est sûrement le mammifère quantitativement le plus utilisé en recherche biomédicale, sa biologie est parfaitement connue ainsi que sa génétique. Il est aisé d'obtenir des lots numériquement importants d'animaux très homogènes. Certaines souches présentent des caractères physiologiques originaux utilisés par les chercheurs: souris "nude", "Muta-mouse"... Elle est le modèle idéal pour les études immunologiques et en radiobiologie. Il n'existe pas actuellement de module d'expérimentation disponible pour utiliser les souris dans l'espace.
Leur petite taille, l'homogénéité des animaux et la connaissance extensive de leur physiologie devrait pourtant favoriser leur utilisation et l'exploitation statistique des résultats.

Opossum laineux *(Caluromys philander)*

Ce marsupial sud américain de 300 à 400 g, nocturne, solitaire et essentiellement frugivore, est bien adapté à la captivité. Il est de manipulation aisée pour les prises de sang. La gestation brève (25 jours) est suivie d'un développement de la "larve" dans la poche marsupiale pendant 75 à 85 jours. Cette disposition particulière est favorable à l'étude de son développement (accès facile aux embryons). Ses besoins nutritionnels sont bien connus ainsi que son comportement et ses rythmes d'activité.

Pleurodèle *(Pleurodeles walti)*

Le pleurodèle est un amphibien pesant 50 à 60 g au stade adulte. Il est capable de séjourner pendant plusieurs semaines en milieu confiné et humide sans apport de nourriture. Son développement est étudié dans plusieurs laboratoires français, son élevage est parfaitement codifié et sa reproduction ainsi que l'embryologie sont bien connues. La femelle émet plusieurs centaines d'œufs à chaque ponte. L'embryon vit sur ses propres réserves jusqu'au stade larvaire. Le développement externe est donc facilement observable. La vitesse de développement et certaines fonctions physiologiques telles que le temps de réponse a un stimulus hormonal (HCG, LHRF...) sont modulables par la température. Les spermatozoïdes survivent plusieurs mois dans le tractus génital de la femelle et l'ovulation peut être déclenchée par une injection d'hormone. Ce modèle est essentiellement utilisé pour les études de développement mais il pourrait intéresser l'immunologie (existence d'une mémoire immunitaire), la physiologie des tissus de soutien (os et muscle) ou de la circulation sanguine, l'éthologie et en particulier le comportement lié aux réactions d'équilibration (présence d'une oreille interne). Il existe d'autre part, un test de mutagénicité *in vivo*, reconnu par l'AFNOR qui utilise la larve de pleurodèle et qui pourrait être utilisé en radiobiologie.
Un projet Pleurodèle français doit participer à un vol dans un module d'expérimentation fabriquée par la NASA (Frog Experiment Unit - FEU) pour des études de développement.

Ecrevisse *(Procambarus clarkii)*

Cet animal aquatique présente des réactions posturales facilement quantifiables et est utilisé par les laboratoires de Neurophysiologie. Son anatomie et sa physiologie neuromusculaire sont bien connues et il possède des organes spécifiques de la gravité, analogues aux canaux semi-circulaire des mammifères. Cet animal extrêmement résistant pourrait être inclus dans un programme d'utilisation de l'"Aquarack" pour des études de neurophysiologie. L'intérêt de ce modèle pour d'autres disciplines mériterait d'être analysé.

Autres modèles

Le ver de terre commun *(Lumbricus terrestris)* est sûrement le plus connu des annélides oligochètes. A l'exception des extrémités (prostomium et pygidium), le corps est formé de métamères, tous identiques et en nombre variable. La biologie et la physiologie sont très étudiées, en particulier le système nerveux et le système musculaire. L'ultrastructure du muscle est connue et il présente de nombreuses caractéristiques semblables à celles des vertébrés (structure, mécanisme de la contraction, biochimie,...). La locomotion péristaltique est-elle aussi bien connue, et sous la dépendance de la gravité.
Cette espèce, ou d'autres voisines, est très favorable à l'étude de la régénération après section transversale. Cette régénération comprend différents temps qui miment entre autre la cicratisation, et s'accompagne d'une différenciation cellulaire orientée (avant/arrière et gradient dorso-ventral). Les études en microgravité pourraient permettre d'identifier les modifications des mécanismes élémentaires de ces fonctions.
D'autres modèles animaux ont été rapidement évoqués et sont susceptibles s'intéresser telle ou telle discipline : utilisation de souches particulières de souris pour des études sur la réactivation des virus, des modèles simples pour mesurer les effets des radiations sur la rétine (tortues d'eau, oiseaux,...). Les modèles décrits plus haut ne sont pas exclusifs d'autres modèles spécifiques de certaines disciplines (Drosophile et génétique par exemple, échinodermes ou cœlentérés pour le développement, etc).

PRINCIPES D'UTILISATION

Principes généraux

Il n'est pas possible de hiérarchiser l'intérêt relatif des différents modèles animaux. Dans l'expérimentation spatiale, les opportunités de vol sont rares, la place et le poids embarqué sont limités. En conséquence, contrairement à ce qui se fait usuellement au sol, de nombreuses disciplines utilisent la même expérience limitant souvent la démarche scientifique à de l'observation (mesure des modifications induites par un changement global de l'environnement) plus qu'à de la véritable expérimentation (faire varier de façon contrôlée un paramètre, toutes choses égales par ailleurs).
Certains animaux expérimentaux répondent essentiellement aux préoccupations d'une seule discipline (annélides ou écrevisse par exemple) d'autres sont susceptibles de satisfaire au cours d'un vol ou de plusieurs vols successifs les besoins de plusieurs disciplines (rat nouveau-né, pleurodèle, opossum,...). Enfin, il existe des modèles relativement

universels qui ne peuvent pas répondre à toutes les interrogations des scientifiques, mais, qui sont largement utilisés dans de nombreuses disciplines (rat, singe rhésus, souris, microcèbe,...).
Le choix du modèle dépendra, la pertinence des questions scientifiques étant démontrée, essentiellement de la nature des opportunités de vol pour utiliser les modules d'expérimentation et des moyens spatiaux disponibles. Pour l'avenir, il serait judicieux de développer des systèmes de complexité croissante, adaptables aux différents animaux expérimentaux que manipulent habituellement les scientifiques.

Conditions d'utilisation

Le groupe a distingué trois grands types d'expérimentation mettant en œuvre des moyens de complexité croissante.

UTILISATION DE MATERIEL REDUIT
"Pocket Experiment"
Les expériences, utilisant un matériel réduit sont conçues par un ou deux laboratoires. Elles mettent en œuvre des animaux peu exigeants pour les conditions d'environnement, utilisant des modules d'expérimentation de faible encombrement et consommant peu ou pas d'énergie. Ces expériences peuvent être embarquées avec un spationaute comme charge utile "personnelle" ou accessoire. L'expérimentation en vol ne doit pas consommer beaucoup de "temps équipage", elle doit être simple et souvent être réduite à de l'observation et à des mesures avant/après. Les exemples de ce type d'expérience sont le "Jellyfish experiment" qui doit être embarqué sur le prochain SPACELAB (SLS-1 05/91) ou les grenouilles qui ont "accompagné" le spationaute japonais sur la station MIR en décembre 1990. Dans le passé, plusieurs expériences de ce type ont trouvé place sur la navette (abeilles, poissons etc...) et sur Mir (caille japonaise en juin 1990).

UTILISATION DE MODELES EXPERIMENTAUX SIMPLES
Les agences spatiales ont développé des modules d'expérimentation relativement aisés à mettre en œuvre, capables d'héberger des animaux et susceptibles de participer fréquemment à des vols spatiaux. L'exemple type de module expérimental est l'"Animal Enclosure Module" (AEM) qui peut être emporté pratiquement sur n'importe quel vol de la Navette ou le module à rat qui a été embarqué sur plusieurs Biocosmos soviétiques.
Ces systèmes assurent uniquement l'entretien des animaux et ne permettent qu'un recueil limité de données (pas de données individuelles) qui peut être accru par l'utilisation de télémétries implantées ou de techniques légères de bio-instrumentation. L'AEM par exemple, a été utilisée en 1989 pour étudier la réparation de fractures de l'os péroné chez le rat. Le module à rat soviétique a été utilisé lors des vols des trois derniers BIOCOSMOS.

UTILISATION DE MODELES EXPERIMENTAUX COMPLEXES
Le groupe a classé dans cet ensemble les systèmes qui permettent le recueil de données d'environnement et de données physiologiques individuelles. Ces systèmes, comme le module expérimental polyvalent de la NASA (Research Animal Holding Facility - RAHF), sont d'autant plus complexes qu'ils n'utilisent pas des matériels standards pour le recueil et la transmission de données. Leur complexité et leur coût conduit à une utilisation maximale des capacités du système et à des projets scientifiques intégrés, réunissant sur un seul sujet expérimental de nombreuses disciplines et de très nombreux scientifiques. le projet RHESUS est assez caractéristique, dans sa configuration actuelle, il occupe un tiers des capacités du SPACELAB, utilise le quart de la capacité de transmission de données, réuni vingt-six projets scientifiques différents couvrant sept disciplines scientifiques. Son développement a commencé en 1976 et il volera en 1995. Les cages à rats ou à singe écureuil qui sont compatibles avec le RAHF sont un peu moins complexes ainsi que les modules à singe rhésus qui ont volé dans les derniers BIOCOSMOS.

Relations avec la communauté scientifique

La rareté des vols spatiaux et leur caractère parfois aléatoire conduit les agences à favoriser le regroupement des expériences et à proposer des projets très intégrés. Les capacités de modulation des expériences échappent de plus en plus aux scientifiques et passent sous la responsablité des représentants des agences spatiales ("Project scientist" de la NASA). Ce phénomène est d'autant plus accentué que les expériences sont complexes. De plus, la communication entre les scientifiques concepteurs du paradigme expérimental et les ingénieurs chargés de la conception ou de l'adaptation des matériels n'est pas simple, chacun parlant un langage différent. Le groupe recommande une démarche plus pédagogique vis à vis de la communauté scientifique, les possibilités d'expériences

requérant un matériel réduit devraient être explorées plus intensivement à l'occasion des vols en coopération, avec ou sans la participation d'un spationaute français ou européen.
Les expériences réalisées au cours des vols paraboliques sont dans tous les cas une première approche de l'expérimentation spatiale extrêmement utile sinon nécessaire. La communauté scientifique devrait être encouragée à y participer.
L'expérimentation spatiale, avec ou sans l'implication d'animaux, impose des contraintes expérimentales originales dont les expérimentateurs ne sont pas familiers. L'édition par le CNES de *"Recommandations pour préparer des expériences dans l'espace"* serait d'une aide importante pour la communauté scientifique et ne peut être recommandée par le groupe.
Ces conditions expérimentales impliquent la mise au point de technologies spécifiques qui pour la plupart ne peuvent être développées dans les laboratoires scientifiques. Or le groupe estime qu'il n'existe pas à ce jour de structure adaptée répondant à ce besoin.

Limites juridiques et éthiques

L'utilisation des animaux pour la recherche scientifique est réglementée (1989) et il est évident que les lois doivent être appliquées au domaine spatial et aux équipes scientifiques impliquées, car elles renforcent les garanties de qualité et que la recherche spatiale est soumise à une valorisation médiatique qui s'accommoderait mal d'approximations dans ce domaine.
Au-delà des simples obligations légales et de façon similaire aux démarches amorcées dans les Etablissements Publics à Caractère Scientifique et Technique pratiquant l'expérimentation animale, la mise en place d'un comité d'éthique animale apparaît hautement recommandable (voir le rapport Micaux de 1980). de tels comités d'éthique existent à l'étranger, Canada, Norvège, Etats-Unis (Animal Care and Use Committee - ACUC) et jouent un rôle régulateur important. dans ce dernier pays, les ACUC apparaissent dans l'organigramme des projets.

PROGRAMME D'UTILISATION DES ANIMAUX DANS LA RECHERCHE SPATIALE

Soutien aux programmes en cours

Actuellement, le CNES développe plusieurs programmes avec les agences spatiales américaine et soviétique. Le projet RHESUS (Etats-Unis) et des expériences sur les singes rhésus de BIOCOSMOS 1992 (URSS) sont en cours de développement. Des propositions françaises ont pu être incluses au programme "rat" de SLS-1 (USA). Des expériences "pleurodèles" sont prévues en coopération avec les Etats-Unis (vol SLS-2 ou SLS-3).
La pertinence scientifique de ces projets ayant été attestée par le Comité des Programmes Scientifiques, ils doivent continuer à être soutenus et éventuellement développés.

Qualification des modèles complexes

D'autres modèles que ceux présentés ici peuvent être utilisés dans l'espace. L'intérêt de nouveaux modèles complexes qui peuvent intéresser plusieurs disciplines devrait être évalué.
Après l'avis du comité "ad hoc" du Comité des Programmes Scientifiques du CNES sur la pertinence scientifique des propositions d'expérience, le groupe de réflexion recommande:

- De soutenir des "travaux sol" pour qualifier les modèles utilisables dans une des trois configurations expérimentales mentionnées plus haut, et de simulation de l'environnement spatial (rats suspendu, radiobiologie, "bed rest", low body positive pressure"...)
- De favoriser en prenant un engagement sur la durée des financements , le passage de l'observation à l'expérimentation (pharmacologie, effet des mesures prophylactiques, effet de l'exercice,...)
- D'encourager le rapprochement entre les disciplines scientifiques et les détenteurs de techniques expérimentales originales qui ne sont pas intéressés "à priori" par l'espace (analyse compartimentale pour les études biochimiques et pharmacologiques, induction de l'œstrus chez certains mammifères, insémination artificielle et transfert d'embryon pour les études de développement dans l'espace, etc)
- D'encourager l'utilisation des vols paraboliques par les scientifiques pour, à l'occasion de mises au point expérimentales avec des modèles animaux (écrevisse, rhésus par exemple), se familiariser avec les conditions expérimentales spatiales.

Programme de recherche et technologie

Les programmes de recherche et technologie ont pour but de préparer les projets à moyen et à long terme. Le groupe recommande trois types d'actions dans ce domaine:

- Le développement d'outils techniques utilisables sur plusieurs modèles animaux et intéressant plusieurs disciplines. Par exemple: identification par puce électronique des individus, système de prise de sang automatique, télémesures ou recueil de données physiologiques portables ou implantables miniaturisés, téléscience...
- L'étude des possibilités d'adaptation des modules d'expérimentation simples ou complexes existant à de nouvelles espèces (AEM et microcèbe ou opossum,...) ou à de nouveaux objectifs scientifiques (appareil pour exercice calibré, labyrinthe à rongeur, exploitation du modèle rat nouveau-né, etc)
- L'étude préliminaire de modules d'expérimentation adaptés au programme Columbus ou à la station Freedom, susceptibles d'héberger pendant plusieurs mois différentes espèces animales, et capables de servir, pendant des périodes de durée variable, à de véritables expériences (colonie permanente de rongeurs, de primates ou d'autres mammifères; système permettant toutes les phases de la reproduction, utilisation du modèle rat nouveau-né, etc)
- La mise au point de modules expérimentaux et d'appareils dédiés à l'expérimentation spatiale avec des animaux, ne peut être réalisée qu'au sein d'une structure très spécialisée disposant d'une expertise animale et d'une expertise technique spécifiques du domaine spatial.

Programme de coopération internationale

Ni la France ni l'Europe ne disposent actuellement de satellite ou de véhicule récupérable. Toutes les expériences de physiologie spatiale se font donc en coopération avec les Etats-Unis ou l'Union Soviétique. Ces deux pays ont déjà entre eux des liens de coopération développés, dans le domaine des modèles animaux. Le groupe de réflexion recommande:

- Le développement des coopérations bilatérales (par exemple sur le vol SLS2) en favorisant les propositions expérimentales originales.
- La négociation pour l'embarquement à bord de la navette spatiale ou sur la station Mir, d'expériences utilisant des matériels réduits en favorisant des coopérations ponctuelles entre un ou deux laboratoires de chaque pays.
- Une proposition auprès des agences concernées d'un programme de recherche et d'expérimentation avec une espèce animale, soutenue sur plusieurs années et en coopération internationale. Un tel programme pourrait se concrétiser par l'équipement, en coopération tripartite (France, Etats-Unis, Union Soviétique), d'un Biocosmos pour la réalisation d'un programme scientifique commun fondé sur un programme de vols à long terme. Il serait, par exemple, possible de proposer la réalisation de cinq vols entre 1995 et 2005.
- D'émettre une proposition auprès de l'Agence Spatiale Européenne pour que des programmes d'utilisation des animaux soient pris en compte dans les projets futurs (vols préparatoires à Columbus, programme Columbus, capsules récupérables diverses).

CONCLUSION

Au cours du séminaire d'Aix-en-Provence, les travaux du groupe de réflexion ont été présentés à la communauté scientifique qui les a discutés. L'intérêt de l'expérimentation animale dans l'espace a été souligné et les scientifiques ont recommandé la poursuite et le soutien aux programmes en cours. Le développement de programmes nouveaux n'a pas formellement été abordé mais dépendra des propositions de la communauté scientifique dans les années à venir et des opportunités de vol qui seront négociées dans le cadre des coopérations internationales.

IMMUNOLOGIE SPATIALE

Jean DAVOUST
Centre d'Immunologie de Marseille-Luminy
Case 906, 13288 Marseille Cedex 09

L'effet des vols spatiaux sur le système immunitaire est insuffisamment caractérisé que ce soit chez l'homme, chez des animaux embarqués pouvant servir de modèle d'étude, ou sur des cultures *in vitro* de cellules appartenant au système immunitaire permettant d'analyser certains dysfonctionnements à l'échelle moléculaire et cellulaire.

L'impact de ces recherches sur la multiplication des vols spatiaux habités est évident. Elles permettront en particulier d'établir une prévention et une adaptation des conditions de vie aux risques d'altération des réponses immunitaires liés aux effets de la microgravité, à l'exposition aux radiations cosmiques, au stress provenant du confinement, ou à tout autre facteur identifiable tel que l'hypokinésie, le régime alimentaire.

L'impact de ces recherches sur l'acquisition de connaissances fondamentales ayant trait aux mécanismes qui gouvernent les réponses immunitaires ou sur d'éventuelles retombées d'ordre technologique, est de prime abord moins évident à cerner. Cependant de multiples raisons exposées ci-après permettent de penser que le système immunitaire peut être choisi sans risque comme modèle d'étude de l'adaptation fonctionnelle d'un tissu animal aux conditions imposées lors de vols spatiaux. Les fonctions physiologiques du système immunitaire ont l'avantage de pouvoir être décrites soit sur un organisme entier, soit au niveau cellulaire et moléculaire. L'ontogenèse ainsi que les aspects de différenciation cellulaire y sont extrêmement bien connus; la plupart des types cellulaires identifiés possèdent des fonctions aisément mesurables. Ces fonctions sont assurées par une panoplie de molécules telles que le récepteur des cellules T, les molécules codées par le complexe majeur d'histocompatibilité, les immunoglobulines circulantes ou membranaires qui sont toutes extrêmement bien caractérisées tant sur le plan de leur structure que sur le plan de leur transport intracellulaire et de leurs fonctions. Nombre d'entre elles jouent un rôle important dans la régulation des interactions intercellulaires, interactions de proximité pour des phénomènes d'adhésion cellulaire ou interactions à distance par l'intermédiaire de facteurs diffusibles tels que les interleukines et cytokines. Le tout nécessite l'expression d'un ensemble de récepteurs de surface ainsi que des mécanismes de sécrétion et d'activation cellulaire finement régulés. S'il fallait choisir un matériel biologique permettant d'étudier l'effet des conditions spatiales sur le métabolisme cellulaire et sur la physiologie d'un organe mammifère et cerner en parallèle d'éventuelles retombées technologiques dans le champ de la Biologie Moléculaire et Cellulaire, les cellules appartenant au système immunitaire constitueraient un matériel de tout premier plan, indépendamment de toute autre considération d'ordre pratique.

Tel qu'il ressort d'un document intitulé "Space Flight Immunology Research Plan" qui provient d'un Atelier d'Immunologie organisé par la Société Américaine de Biologie Gravitationnelle et Spatiale en novembre 1990, la planification de ces recherches peut être scindée en trois parties:
1) l'acquisition et l'analyse des données chez l'homme,
2) les expériences et tests menés sur des animaux embarqués,
3) les études moléculaires et cellulaires menées sur des cultures cellulaires embarquées.

ACQUISITION ET ANALYSE DES DONNEES CHEZ L'HOMME

Les observations cliniques ainsi que les examens complémentaires sur l'homme sont de toute première importance qu'elles soient effectuées en vol ou consécutivement au sol afin de déterminer l'étiologie des désordres immunitaires liés aux vols spatiaux. La mesure de la production d'anticorps, des réactions d'hypersensibilité retardée ainsi que les tests fonctionnels effectués sur des populations de cellules lymphocytaires devraient permettre de mieux cerner les dysfonctionnements liés aux conditions de vie dans l'espace. Il est évident que l'acquisition et l'analyse des données est souvent très difficile à mener pratiquement pour des raisons ayant trait au faible nombre de sujets, aux restrictions de nature déontologique et à l'emploi du temps des cosmonautes. En second lieu, la

fiabilité des conditions d'expériences effectuées par des équipes de médecine spatiale n'ayant pas nécessairement une spécialisation poussée en Immunologie peut dans certains cas être mise en cause. Inversement, l'accès à des données très fiables concernant soit le bilan de santé général des cosmonautes, soit des tests immunologiques très ciblés peut être réduite en raison de la spécificité de certaines missions spatiales.
Face à ces restrictions, il y a lieu néanmoins de collecter les données accessibles et de constituer une base de données, ce qui permettra d'établir un programme d'observations cliniques effectuées au sol et de prévoir des expériences sur des animaux embarqués. Ces recherches pourraient en particulier être menées par des équipes hospitalo-universitaires en collaboration avec des équipes provenant de pays ayant actuellement la possibilité de lancer des vols habités.

EXPERIENCES ET TESTS MENES SUR DES ANIMAUX EMBARQUES

Les tests effectués sur des animaux embarqués ne sont pas sujets à ces restrictions et lorsqu'il s'agit de petits rongeurs tels que la souris dont le système immunitaire est le mieux connu après celui de l'homme, les expériences sont facilement réalisables sur le plan pratique. Les études visant à décrire chez les rongeurs les réponses immunitaires humorales ou cellulaires suite à un protocole d'immunisation dans l'espace seront extrêmement informatives. Chez la souris, l'ensemble de ces tests peut être réalisé sur plusieurs individus possédant un système immunitaire génétiquement identique et de ce fait de nombreux contrôles peuvent être effectués au sol. De nombreux prélèvements et analyses peuvent être effectués consécutivement au vol. En dernier lieu, les résultats pourront être comparés avec l'ensemble des travaux publiés, et être évalués par une très large communauté scientifique.
Des expériences plus coûteuses sur les singes rhésus qui possèdent un système immunitaire très proche de l'homme sont elles aussi envisageables. Ces animaux permettent souvent de tester les conditions de vaccination avant de les transposer chez l'homme et pourraient faire l'objet d'études ayant trait à des traitements préventifs.

ETUDES MOLECULAIRES ET CELLULAIRES MENEES SUR DES CULTURES CELLULAIRES EMBARQUES

La justification des travaux concernant l'effet des conditions spatiales sur le métabolisme cellulaire et sur la physiologie d'un organe mammifère tel que le système immunitaire n'est pas évidente a priori. S'agit-il de travaux à visée fondamentale sur le système immunitaire, d'une approche réductionniste afin mieux cerner la cause de ces dysfonctionnements lors de vols spatiaux ou de la recherche de retombées technologiques ? Les travaux sur des cultures *in vitro* de cellules appartenant au système immunitaire, dont le caractère est plus strictement moléculaire et cellulaire présentent en fait l'avantage de concilier ces trois objectifs tout en présentant une faisabilité déjà éprouvée. Les mesures d'activation cellulaire nécessitant soit une interaction intercellulaire soit un facteur mitogène. La redistribution de récepteurs membranaires ainsi que la régulation de l'expression de constituants de surface représentent des connaissances de base en biologie cellulaire pour lesquelles les cellules lymphoïdes représentent un système modèle d'études dans les conditions spatiales.
Néanmoins ces expériences présentent certaines difficultés d'ordre physico-chimique liées en particulier à la réduction des mouvements de convection en microgravité qui peut perturber le mélange de réactifs, à la présence d'un rayonnement cosmique, aux délais parfois très longs séparant le conditionnement de l'échantillon et sa récupération. Tous ces facteurs doivent être minutieusement testés pour permettre l'interprétation des résultats et ce programme de travail ne peut trouver sa justification qu'à moyen terme de façon à accumuler une masse suffisamment importante de résultats. Il est alors indispensable de confier ces travaux à visée fondamentale à des équipes d'excellence disposées à engager des moyens sur le moyen terme.

LE PROJET STEP

François BARLIER
CERGA - GRASSE

S T E P SCIENCE

C. W. FRANCIS EVERITT

April 9, 1991

THE TWO FUNCTIONS OF MASS IN PHYSICS

$F_i = M_i a$ — M_i - receptacle of inertia

$F_g = \dfrac{G \mathcal{M}_g M_g}{R^2}$ — M_g - source of gravitation

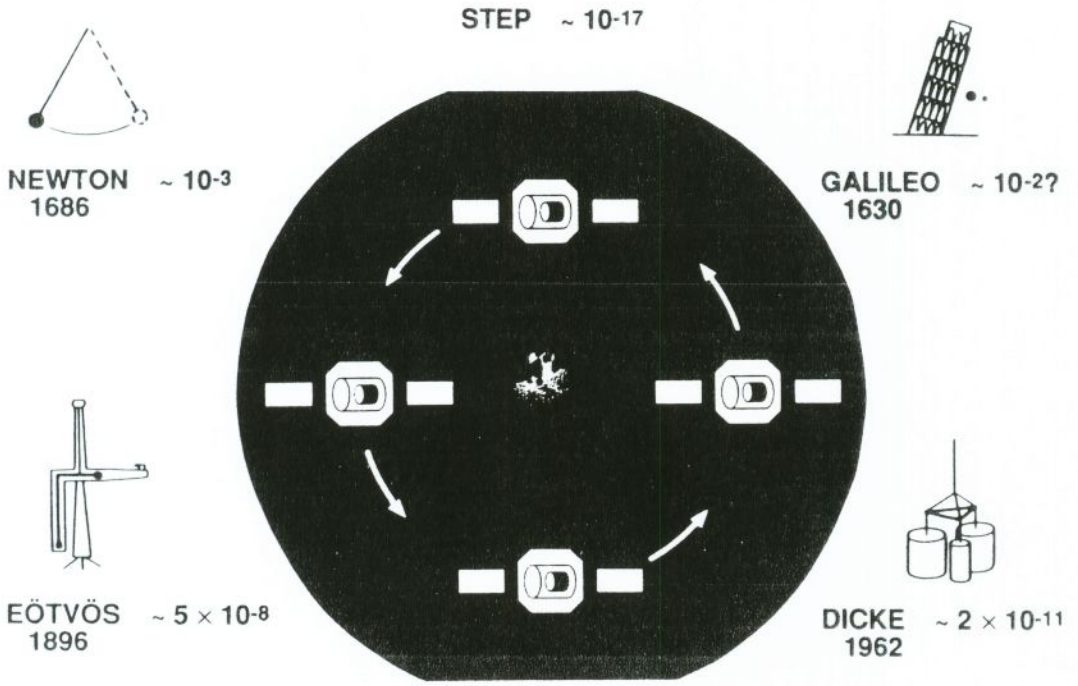
$a = \dfrac{G \mathcal{M}_g}{R^2} \left(\dfrac{M_g}{M_i} \right)$

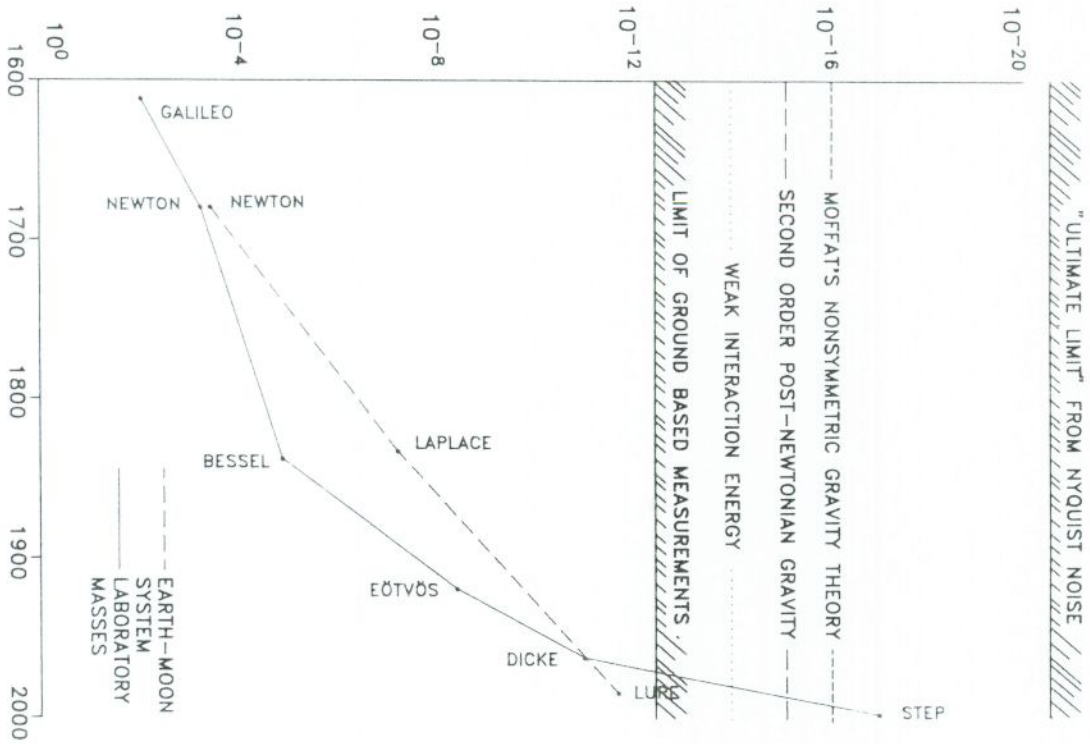
Eötvös ratio $\eta = \left| \dfrac{(M_g/M_i)_A - (M_g/M_i)_B}{\frac{1}{2}\left[(M_g/M_i)_A + (M_g/M_i)_B\right]} \right| \Rightarrow 0$

(1) SETS OFF GRAVITY FROM ALL OTHER FORCES OF NATURE

(2) BASIS OF EINSTEIN'S REPRESENTATION OF GRAVITY AS SPACE-TIME CURVATURE

EXPERIMENTS TO TEST EQUIVALENCE PRINCIPLE





ADVANTAGES OF SPACE: TWO VIEWS

GALILEO VIEWPOINT

- FREE-FALL EXPERIMENT WITH PERIODIC ACCELERATION, SHIELDED TEST MASSES, AND "TOWER" $7000/\pi$ KM INSTEAD OF 60 M HIGH

EÖTVÖS-DICKE VIEWPOINT

- REPLACE SUN BY EARTH AS SOURCE ~ 10^3 INCREASE IN DRIVING ACCELERATION
- REPLACE EARTH AS BASE BY DRAG-FREE SATELLITE WITH SMOOTH PROPORTIONAL THRUSTERS ~ 10^4 REDUCTION IN "SEISMIC" DISTURBANCE

EINSTEIN'S GENERAL RELATIVITY THEORY: THE BACKGROUND

- NEWTON'S THREE ABSOLUTES: SPACE, TIME, MASS
- SPECIAL RELATIVITY (1905): A SINGLE ABSOLUTE, THE VELOCITY C OF LIGHT, AND TWO PAIRED QUANTITIES

  SPACE-TIME $s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2$

  MASS-ENERGY $E = mc^2$

- TWO INTRIGUING CONSEQUENCES
  - SINCE NO SIGNAL CAN TRAVEL FASTER THAN LIGHT, NEWTON'S THEORY OF GRAVITATION HAS TO BE AMENDED
  - SINCE ENERGY NOW HAS MASS ($m = E/c^2$) ENERGY ITSELF MAY GRAVITATE

EINSTEIN'S GENERAL RELATIVITY THEORY: THE CONTENT

- FIRST STAGE (1911)–*THE EQUIVALENCE POSTULATE*
  SINCE ENERGY GRAVITATES, LIGHT WILL BE (a) DEFLECTED BY SUN (b) REDSHIFTED AS IT MOVES UPWARD THROUGH GRAVITATIONAL FIELD

- SECOND STAGE (1913)–*NONLINEARITY*
  SINCE GRAVITATIONAL ENERGY ALSO (PRESUMABLY) GRAVITATES, THEORY WILL BE *NONLINEAR*

- THIRD, FINAL STAGE (1915, 1916)–*SPACE-TIME CURVATURE*
  IN PLACE OF MASS-ENERGY VARIABLES EFFECTS OF GRAVITATION ARE EXPRESSIBLE IN TERMS OF SPACE-TIME VARIABLES

  GRAVITY WARPS SPACE-TIME

EINSTEIN'S GENERAL RELATIVITY THEORY: SOME CONSEQUENCES

- NEW EXPERIMENTAL RESULTS–EINSTEIN'S 2 1/2 TESTS (1915)
  - REDSHIFT
  - PRECESSION OF MERCURY'S PERIHELION
  - GRAVITATIONAL DEFLECTION OF LIGHT

- PREDICTION OF GRAVITATIONAL RADIATION (1916)

- MACH'S PRINCIPLE AND ORIGIN OF INERTIA
  - "MATTER THERE CREATES INERTIA HERE" (J. A. WHEELER)
  - LENSE-THIRRING FRAME-DRAGGING (1918)

- NEW CELESTIAL OBJECTS–BLACK HOLES, ETC.

- A NEW UNIVERSE
  - EXPANSION
  - CLOSURE
  - MODERN COSMOLOGY

EINSTEIN'S UNIVERSE

"*Ptolemy* invented a universe and it lasted two thousand years.

Newton invented a universe and it lasted two hundred years.

Now *Dr. Einstein* has invented a new universe and no one knows

how long this one is going to last."

George Bernard Shaw
Speech at a dinner party in honor of Albert Einstein, London 1930

"EINSTEIN'S GENERAL RELATIVITY THEORY IS LIKELY TO BE AMENDED"
C. N. YANG

- THE FAILURE OF EINSTEIN'S GEOMETRIZATION PROGRAM
  - NO UNIFIED GEOMETRIC THEORY OF GRAVITATION AND ELECTROMAGNETISM
  - $R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = k T_{ik}$

    space-time variables (gold) mass-energy variables (mud)

- INCOMPATIBILITY OF GENERAL RELATIVITY AND QUANTUM MECHANICS

- THE GENERIC INTELLECTUAL AND EXPERIMENTAL PROBLEMS
  - MASS AND THE EQUIVALENCE PRINCIPLE
  - INERTIA AND MACH'S PRINCIPLE

SOME PROPOSED ALTERNATIVES TO GENERAL RELATIVITY

EARLY THEORIES

POINCARÉ (1910), NORDSTRÖM'S CONFORMALLY FLAT THEORY (1912), WHITEHEAD'S QUASILINEAR THEORY (1922), BIRKHOFF'S THEORY (1943), MILNE'S KINEMATIC RELATIVITY (1948)

SCALAR TENSOR THEORIES

JORDAN (1955), BRANS-DICKE (1961), BERGMANN (1968), BEKENSTEIN (1977), BARKER (1978)

PREFERRED FRAME THEORIES

VECTOR-TENSOR: WAGONER (1972), WILL-NORDTVEDT (1972), HELLINGS-NORDTVEDT (1973)

BIMETRIC: ROSEN (1973), LIGHTMAN-LEE (1973), RASTALL (1976)

STRATIFIED: PAPAPETROV (1954), WHITROW-MORDUCH (1965), NI (1973), LEE-LIGHTMAN-NI (1974)

LINEAR FIXED GAUGE THEORIES

DESER-LAURENT (1968), BOLLINI-GIAMAGI-TIOMINO (1970)

NONMETRIC THEORIES

BELINFANTE-SWIHART (1957), MOFFAT NONSYMMETRIC GRAVITATION THEORY (1979)

EXPERIMENTAL RELATIVITY SINCE 1960

EINSTEIN'S $2_{1/2}$ TESTS

	1950	1990
REDSHIFT	~ 50%	0.014%
STARLIGHT DEFLECTION	15%	1%
RADAR RANGING	–	0.1%
PERI(HELION) PRECESSION		
SUN	1%	2%
BINARY PULSAR	–	0.8%
ECLIPSING BINARIES	–	serious disagreement

OTHER NEW POSITIVE TESTS

DE SITTER EFFECT	–	2%
GRAVITATIONAL WAVE DAMPING IN BINARY PULSAR	–	0.8%

NEGATIVE TESTS–EFFECTS GIVING NULL RESULT IN GENERAL RELATIVITY

NORDTVEDT EFFECT

GALAXY-CENTERED EARTH TIDES (WILL)

STRONG-FIELD EFFECTS IN BINARY PULSAR (DAMOUR)

THE ROLE OF SPACE IN TESTING GRAVITATIONAL THEORIES

LUNAR LASER RANGING SEARCH FOR NORDTVEDT EFFECT (1968 +)
- EQUIVALENCE TO 6×10^{-12}; ALSO MEASURE $(4\beta - \gamma - 3)$
- GRAVITATIONAL SELF-ENERGY EFFECT CHECKED TO 1%

RADAR RANGING TO VIKING LANDER ON MARS (1976)
- SHAPIRO TIME DELAY TO 0.1%

GRAVITY PROBE A CLOCK COMPARISON EXPERIMENT (1976)
- MEASUREMENT OF "REDSHIFT" TO 0.014%

GRAVITY PROBE B ORBITING GYROSCOPE EXPERIMENT (planned for 1997)
- RELATIVISTIC FRAME-DRAGGING TO 0.3%
- SPACE-TIME CURVATURE TO 0.001%

STEP SATELLITE TEST OF EQUIVALENCE PRINCIPLE (planned for 2000)
- 10^6 IMPROVEMENT IN TESTING EQUIVALENCE PRINCIPLE
- 10^2 IMPROVEMENT IN MEASURING G
- COEXPERIMENTS IN GEODESY AND AERONOMY

SIGNIFICANCE OF STEP

EXTEND BY 10^6 THE TESTING OF A FUNDAMENTAL PRINCIPLE OF PHYSICS

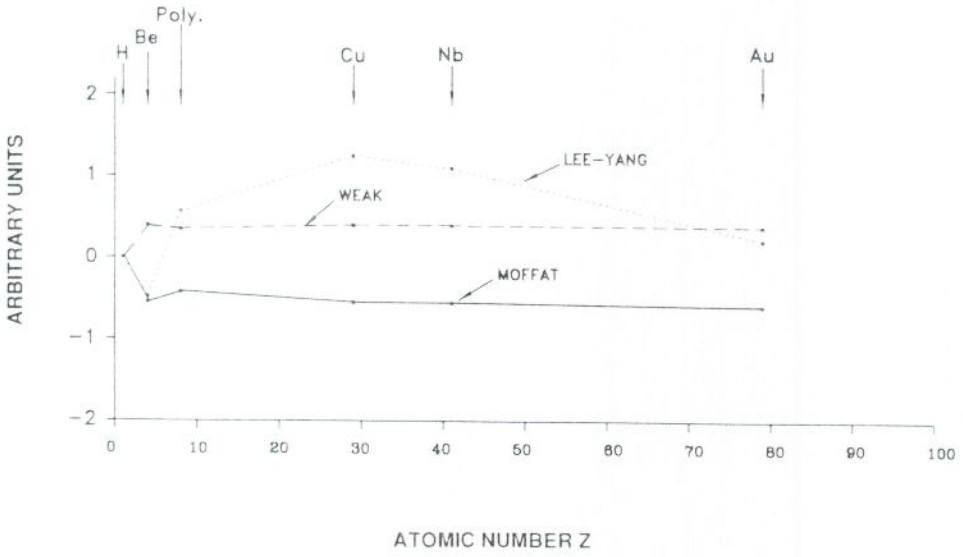
NEGATIVE RESULT

- GRAVITATION CONFIRMED AS METRIC PHENOMENON
- SEVERELY LIMITS
  - CONNECTION BETWEEN GRAVITY AND WEAK INTERACTIONS
  - LEE-YANG THEORY OF PROTON STABILITY
  - NONSYMMETRIC COMPONENT IN CURVATURE TENSOR
- STRENGTHENS CONFIDENCE IN APPLYING GENERAL RELATIVITY TO ASTROPHYSICS AND COSMOLOGY
- WITH IMPROVED LUNAR RANGING DATA OPENS WAY TO SEARCH FOR HIGHER ORDER POST-NEWTONIAN GRAVITY

POSITIVE RESULT

- DEPENDING ON COMPOSITION AND DISTANCE VARIATIONS, MAY ESTABLISH
  - LINK BETWEEN GRAVITATION AND WEAK INTERACTION
  - LEE-YANG THEORY OF PROTON STABILITY
  - NONSYMMETRIC COMPONENT IN CURVATURE TENSOR (2 FORMS)
- MAY PROVIDE EVIDENCE FOR NEW INTERMEDIATE RANGE FIFTH FORCE
- MAY REQUIRE A NEW NONMETRIC THEORY OF GRAVITATION
- NEW IMPLICATIONS FOR COSMOLOGY AND ASTROPHYSICS

FORM OF SOME POSSIBLE VIOLATIONS OF EQUIVALENCE PRINCIPLE



PHYSICS TODAY
MAY 1990 VOL. 43 (5), 9-10

V. L. GINZBURG'S LIST OF *"ESPECIALLY INTERESTING AND IMPORTANT"* PROBLEMS

MACROPHYSICS

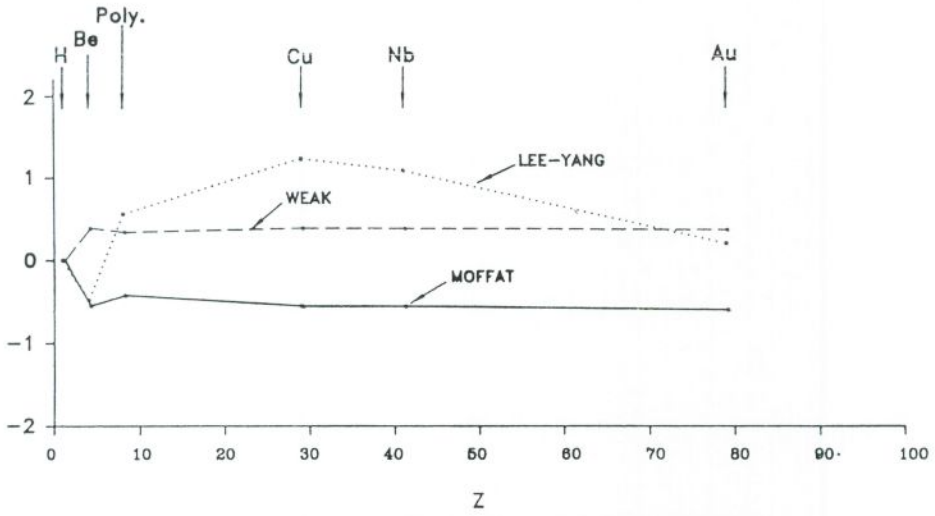
1. CONTROLLED NUCLEAR SYNTHESIS
2. HIGH T_c SUPERCONDUCTIVITY
3. NEW SUBSTANCES (METALLIC H_2ET_c)
4. CERTAIN SOLID STATE PROBLEMS
5. SECOND ORDER PHASE TRANSITIONS
6. SURFACE PHYSICS
7. LIQUID CRYSTALS
8. MATTER IN VERY STRONG MAGNETIC FIELDS
9. RASERS, GRASERS AND ULTRAHIGH POWER LASERS
10. STRONGLY NONLINEAR PHENOMENA
11. SUPERHEAVY ELEMENTS

MICROPHYSICS

12. PARTICLE MASS SPECTRUM; QUARKS AND GLUONS; QUANTUM CHROMODYNAMICS
13. UNIFIED THEORY OF WEAK AND E.M. INTERACTIONS; W± AND Z BOSONS; LEPTONS
14. GRAND UNIFICATION; PROTON DECAY; NEUTRINO MASS; MAGNETIC MONOPOLES; SUPERUNIFICATION; SUPERSTRINGS
15. FUNDAMENTAL LENGTH; HIGH AND SUPERHIGH-ENERGY PARTICLE INTERACTIONS
16. NONCONSERVATION OF CP INVARIANCE; NONLINEAR PHENOMENA IN VACUUM AND IN SUPERSTRONG MAGNETIC FIELDS; VACUUM PHASE TRANSITIONS

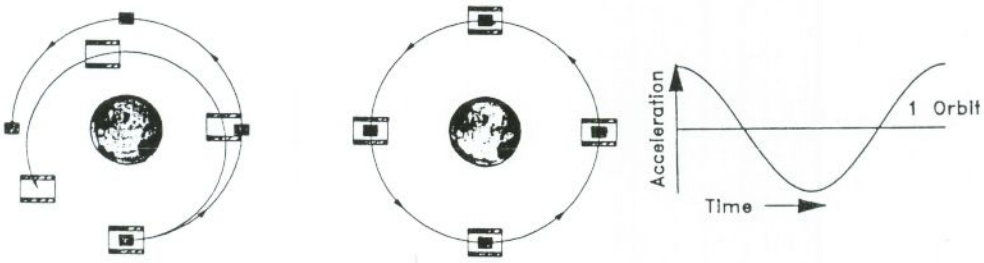
ASTROPHYSICS

17. EXPERIMENTAL VERIFICATION OF GENERAL RELATIVITY
18. GRAVITATIONAL WAVES
19. COSMOLOGICAL PROBLEM; CONNECTION BETWEEN COSMOLOGY AND HIGH ENERGY PHYSICS
20. NEUTRON STARS AND PULSARS
21. BLACK HOLES
22. QUASARS AND GALACTIC NUCLEI AND GALAXY FORMATION; DARK MATTER
23. ORIGIN OF COSMIC RAYS AND X-RAY, γ-RAY EMISSION; γ-RAY ASTRONOMY AT SUPERHIGH ENERGIES
24. NEUTRINO ASTRONOMY



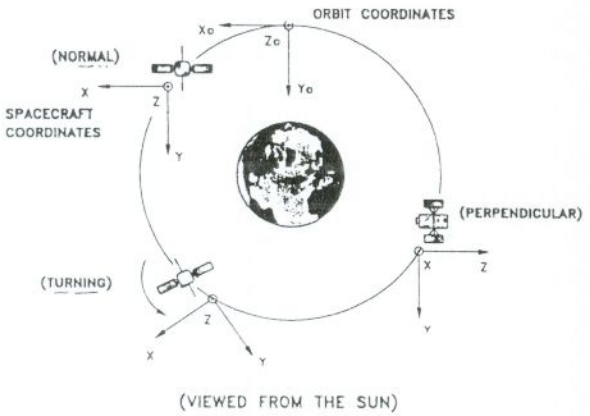
ANOMALOUS ACCELERATIONS IN SEVERAL THEORIES
(ARBITRARY UNITS)

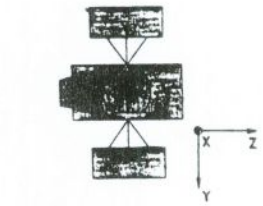
EQUIVALENCE PRINCIPLE VIOLATION

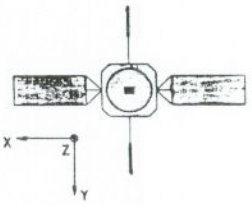


Uncontrolled Masses Effect of Servo Signal of Violation

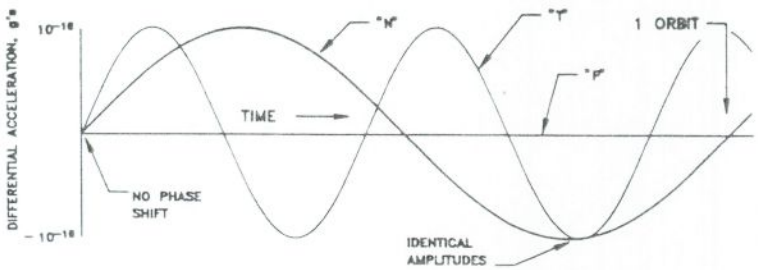
STEP COORDINATE SYSTEMS AND POINTING MODES



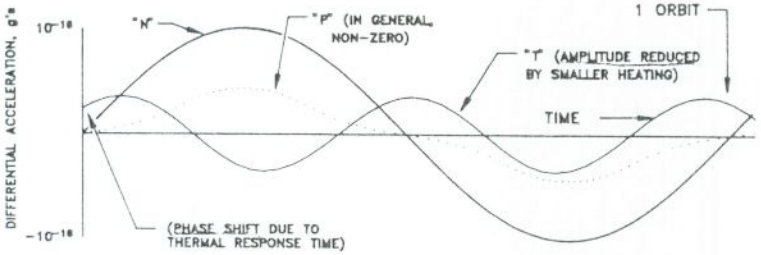




IDENTIFICATION OF SIGNALS



SIGNATURE OF 10^{-16} EQUIVALENCE PRINCIPLE VIOLATION



SIGNATURE OF 10^{-16} THERMAL DISTORTION
DUE TO CHANGING DIRECTION OF HEAT FROM THE EARTH

STEP EXPERIMENT CALIBRATION

A. ON THE GROUND

CALIBRATE FOR EACH TEST MASS:

1. CAPACITANCE PICK-OFF AND ELECTROSTATIC SUSPENSION
2. SQUID PICK-OFF
3. MAGNETIC BEARING FORCE AND MASS CENTERING
4. BACKGROUND FORCE CALIBRATION
5. COMMON MODE REJECTION
6. OTHER CALIBRATIONS (THERMAL CONSTANTS, ETC.)

B. IN ORBIT

1. DRAG-FREE PROPORTIONAL THRUSTERS
2.–6. AS ABOVE
7. GRAVITY GRADIENT ORIENTATION SYSTEM
8. TESTS FOR SYSTEMATIC DISTURBANCES

ITEMS 1-7 WILL BE RUN IN AN AUTOMATIC SEQUENCE CONTROLLED BY ON-BOARD SOFTWARE

SUMMARY OF MAIN PAYLOAD REQUIREMENTS ON THE SPACECRAFT

ACCELERATION NOISE LEVEL $7 \times 10^{-12}\ g/\sqrt{Hz}$

POINTING

- CONTROL — 30 ARC-SEC/$\sqrt{Hz}$
- MEASUREMENT — 1 ARC-SEC

MASS DISTRIBUTION STABILITY

- AVOID THERMAL DISTORTION AT ORBITAL FREQUENCY
- HIGH RIGIDITY
- NO MOVING PARTS

CRYOGENIC ENVIRONMENT FOR A SIX-MONTH LIFETIME

PRELIMINARY TEST MASS SELECTION (FIVE MATERIALS FOR SIX TEST MASSES)

	Density	Binding Energy Per Nucleon	(P-N)/(P+N)	Fermion Number	A
Hydrogen	0.08	7.85×10^{-3}	+1	2	1
(as polyethylene $-CH_2-$)	0.95	(0.17×10^{-3})	(+0.143)	(20)	(6.5)
Copper	8.96	(-1.12×10^{-3})	(−.088)	(92.62)	(63.62)
Niobium	8.57	-1.01×10^{-3}	−.118	134	93
Beryllium	1.85	-1.35×10^{-3}	−0.11	13	9
Gold	19.32	-0.17×10^{-3}	−.198	276	197

Numbers in parentheses are averages

— each test mass weighs 1 kg

— centre of mass to be within 0.01 cm of the centre of geometry

— outer surfaces accurate to within ~ 10^{-4} cm

ORBIT SELECTION

ALTITUDE

REASONS FOR A LOWER ORBIT:

- GRAVITATIONAL SIGNAL IS LARGER
- SHORTER ORBITAL PERIOD REDUCES DRIFT
- AVOIDS THE RADIATION BELTS

REASONS FOR A HIGHER ORBIT:

- SMALLER AIR DRAG, LESS HELIUM USED
- LONGER MISSION (HELIUM LASTS LONGER)
- EARTH GRAVITY GRADIENTS AND HELIUM TIDE SMALLER
- THERMAL HEAT LOAD FROM EARTH SMALLER

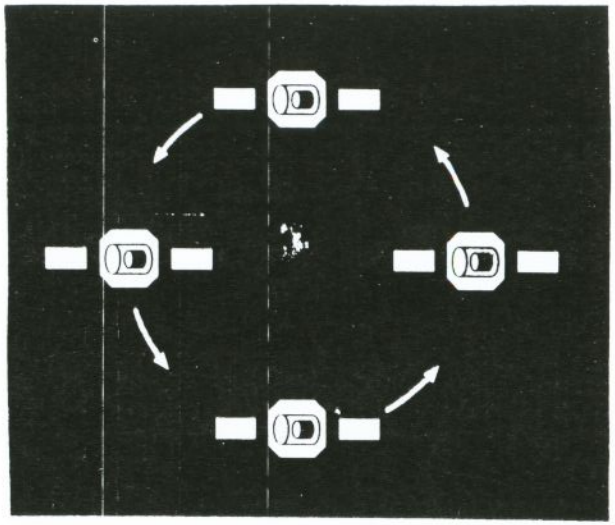
INCLINATION

- EQUATORIAL — AVOIDS SOUTH ATLANTIC ANOMALY
- POLAR — ALLOWS STUDYING SOME GENERAL RELATIVISTIC EFFECTS
- SUN-SYNCHRONOUS — AVOIDS ECLIPSES, REDUCES TEMPERATURE EFFECTS

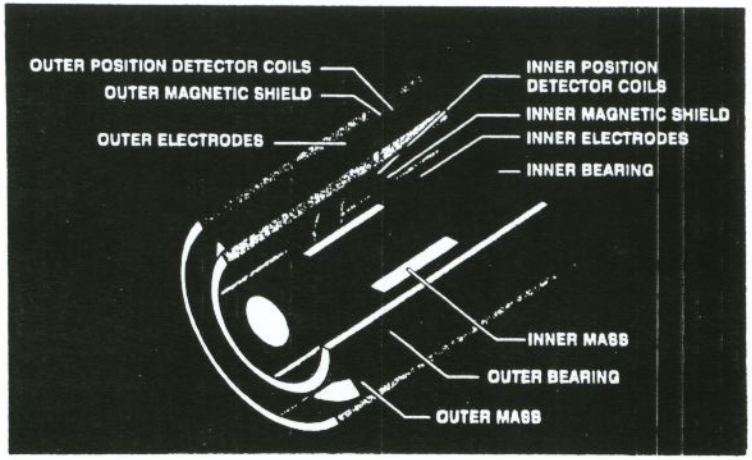
ECCENTRICITY

- A SLIGHTLY ELLIPTICAL ORBIT (1-2% ECCENTRICITY) HELPS DISCRIMINATE BETWEEN DIFFERENT THEORIES OF GRAVITY

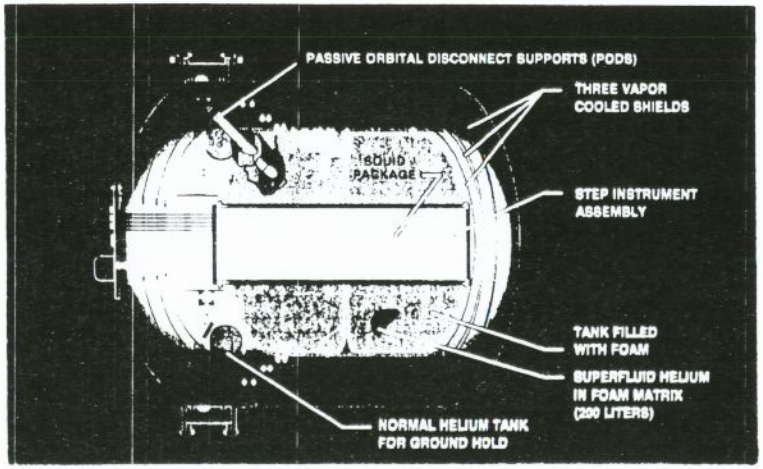
PERIGEE 550 KM, APOGEE 700 KM, SUN-SYNCHRONOUS ORBIT SELECTED AS BASELINE



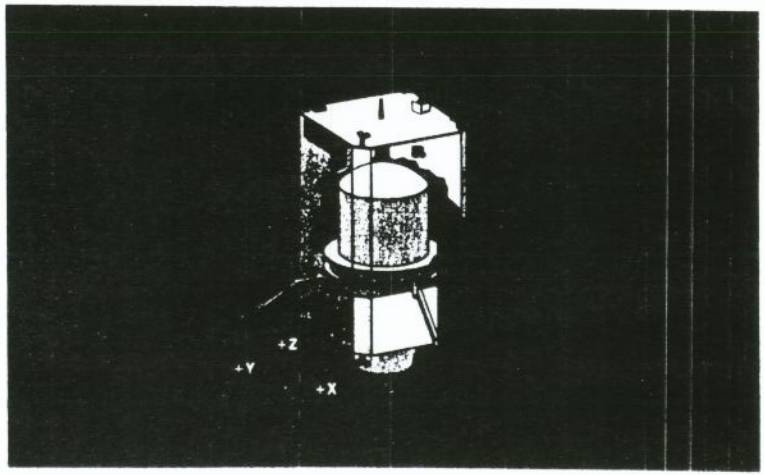
ACCELEROMETER



STEP



INSTRUMENT INTEGRATED WITH ORBITAL DEWAR



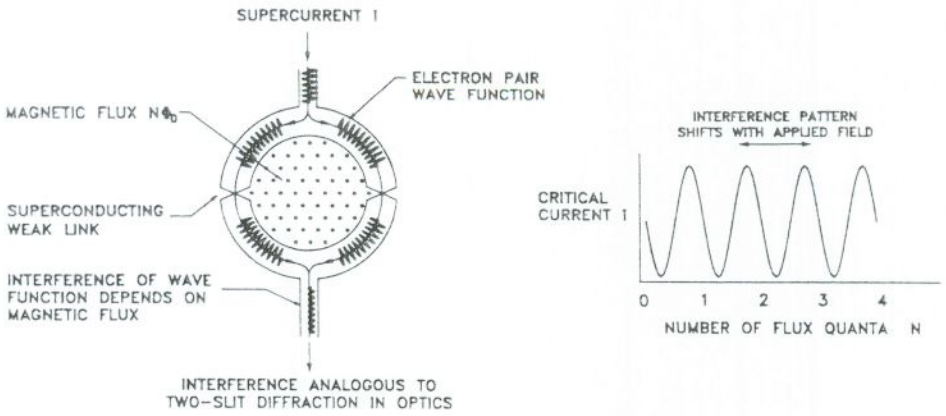
SPACECRAFT

WHY CRYOGENICS AND SUPERCONDUCTIVITY?

- SUPERCONDUCTING DISPLACEMENT SENSOR SENSITIVE TO 10^{-5}Å
- MECHANICAL STABILITY
  (THERMAL EXPANSION IS GREATLY REDUCED)
- THERMAL STABILITY
  (THERMAL RELAXATION TIMES ARE GREATLY REDUCED)
- EXTREMELY LOW GAS PRESSURE (< 10^{-13} TORR)
  (AT 2 K ALL GASSES EXCEPT He FREEZE)
- SUPERCONDUCTING SHIELDING
  (CAN ATTENUATE EXTERNAL FIELDS (EARTH) BY MORE THAN 10^{8})
- THERMAL RADIATION PRESSURE DIFFERENCES ARE GREATLY REDUCED
  (DECREASES AS T^4)

MEASUREMENT OF 10^{-13} CM WITH A DC SQUID

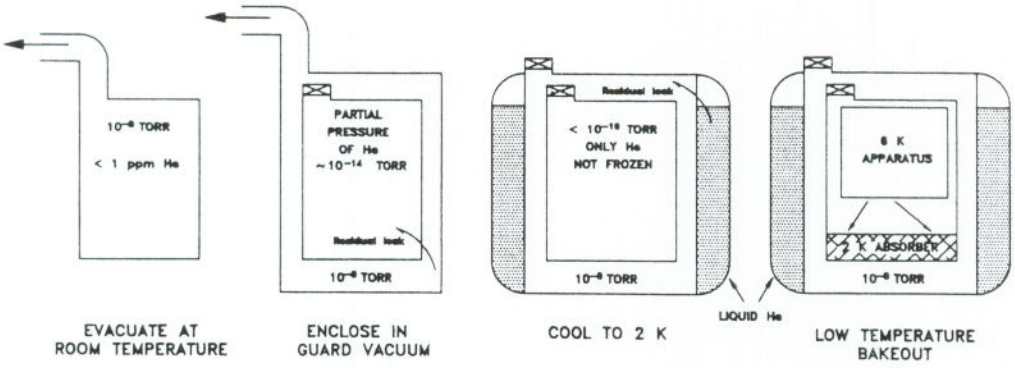
(SUPERCONDUCTING QUANTUM INTERFERENCE DEVICE)



$$\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15} \text{ WEBER}$$

A GOOD SQUID HAS SENSITIVITY < 10^{-5} Φ_0
THIS CORRESPONDS TO 10^{-13} CM WITH A BASIC CIRCUIT

HOW TO REACH AND MAINTAIN 10^{-13} TORR



ULTRAHIGH VACUUM REFERENCES

ISHIMARU, H. J. VAC. SCI. TECHNOL. A 7(3) PT 2 P 2439-42
-REACHED AND MEASURED 3 X 10^{-13} TORR AT 300K WITH LN2 SHROUD

DEHMELT, H. AM. J. PHYS. 58(1) P17-27
-ESTIMATED 1 ATOM/CM^3 IN A PENNING TRAP AT 4 K

ATOMES ULTRA-REFROIDIS

Christophe SALOMON

Chaire de Physique Atomique et Moléculaire du Collège de France
Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'Ecole Normale Supérieure
24, rue Lhomond - 75005 PARIS

LASER COOLING AND TRAPPING OF ATOMS IN MICROGRAVITY TOWARDS A HIGH PERFORMANCE CLOCK

INTRODUCTION

Recent progress in the field of laser cooling and trapping of neutral atoms have opened new opportunities both in fundamental physics and in the field of Time and Frequency standards [1-3]. Cesium atoms have been laser cooled to ~2 microkelvins and have a mean quadratic velocity of ~12 mm/s [2]. The primary time and frequency standard is presently realized with cesium atoms in a conventional atomic beam at high temperature (400 K).The width of the Ramsey resonance used to realize the standard is proportional to the velocity of the atoms (200 m/s) and is typically of about 100 Hz. Since the stability and accuracy of these clocks is limited by the high velocity of the atoms, one expects several order of magnitude improvement when using laser cooled cesium atoms.

We recently demonstrated at Ecole Normale Supérieure in Paris in a collaboration with the LPTF, that, by using a laser cooled cesium atomic fountain, a 2.0 Hz wide Ramsey resonance could be observed with good signal-to-noise ratio [4]. See Figs. 1-3. This resonance is 50 times narrower than any resonance in existing Cs standard. Short term expectations for the stability and accuracy of such a fountain clock are in the 10^{-16} range for a one day integration time. This would outperform by more than 2 orders of magnitude any existing Cs clock.

THE INTEREST OF THE MICRO-GRAVITY

It is clear that the atomic fountain geometry is imposed by the gravity. g determines the width of the resonance: for a 30 cm high fountain the resonance width is 1.0 Hz and to get narrower lines one gains only as the square root of the fountain height. The microgravity that exists in a satellite should thus allow the realization of narrower resonances and consequently more exact clocks. 0.1 Hz wide cesium resonances, which are unattainable on earth, could be obtained in a small volume satellite clock.

An important advantage of a cold atom clock and a crucial element for a satellite clock is the recently demonstrated possibility of producing the cold Cs atoms in a low vapor pressure cell of very small dimensions (~1 liter) [5,7].

The key element of such a device is a magneto-optical laser trap (Fig.4). It is the combination of a radiation pressure force and of a magnetic field gradient that radiates a restoring force towards the origin [6]. Such trap has remarquable properties. It is deep (1 Kelvin) and it produces in addition a strong cooling that increases the confinement.

PERSPECTIVES

It is then possible to imagine an ultra-stable and compact clock involving only a small vacuum chamber and two laser diodes. In a detailed study of the physical mecanisms which limit the stability and the accuracy of a cold atom clock, we were able to show that a 10^{-16}/day stability and 10^{-16} accuracy were perfectly realistic expectations for both ground based clocks and satellite clocks.

With this goal, we have started with the help of CNES a program to demonstrate the feasibility of laser cooling and trapping experiments in microgravity. Parabolic flights (20 s at 10^{-2} g) are appropriate for this demonstration and our first flight aiming at testing the laser diode frequency stability and the mechanical stability of the optical system was succesfully achieved in February 1991.

Such experiments should first lead to the definition of the basic requirements for a satellite clock and also give access to new types of physics experiments, forbidden on earth. For instance, vacuum field atom trapping, ultracold

atom-surface interaction, or atom cavities.
Finally ultra-stable satellite clocks would find several applications in various fields of physics: very long base interferometry, fundamental tests of general relativity, millisecond pulsar timing, global positioning system and geodesic measurements.

Principal proposer: Christophe SALOMON
Directeur de Recherches au CNRS
Laboratoire de spectroscopie hertzienne de l'ENS

Co-proposer: André CLAIRON
Laboratoire primaire temps frequences

REFERENCES

[1] C. Cohen-Tannoudji et W.D. Philips, Physics Today, Octobre 1990, p. 33, and the special issues of J. Opt. Soc. Am. B**2** (1985) and B**6** (1989).
A. Aspect et C. Salomon, Images de la physique, C.N.R.S., 1990.

[2] C. Salomon, J. Dalibard, W. Philips, A. Clairon and S. Guellati, Europhys. Lett., **12**, 683 (1990).

[3] J. Dalibard and C. Cohen-Tannoudji, J. Opt. Soc. Am. B, **2**, 2023 (1989).

[4] A. Clairon, C. Salomon, S. Guellati, EFTF 1991, Besançon, to be published.

[5] C. Monroe, W. Swann, H. Robinson and C. Wieman, Phys. Rev. Lett., **65**, 1571 (1990).

[6] J. Dalibard, unpublished (1987). E. Raab, M. Prentiss, A. Cable, S. Chu and D. Pritchard, Phys. Rev. Lett., **59**, 2631 (1987). T. Walker, D. Sesko and C. Wieman, Phys. Rev. Lett., **64**, 408 (1990).

[7] D.Grison, B. Lounis, C. Salomon, J-Y. Courtois, and G. Grynberg, to appear in Europhysics letters, (1991)

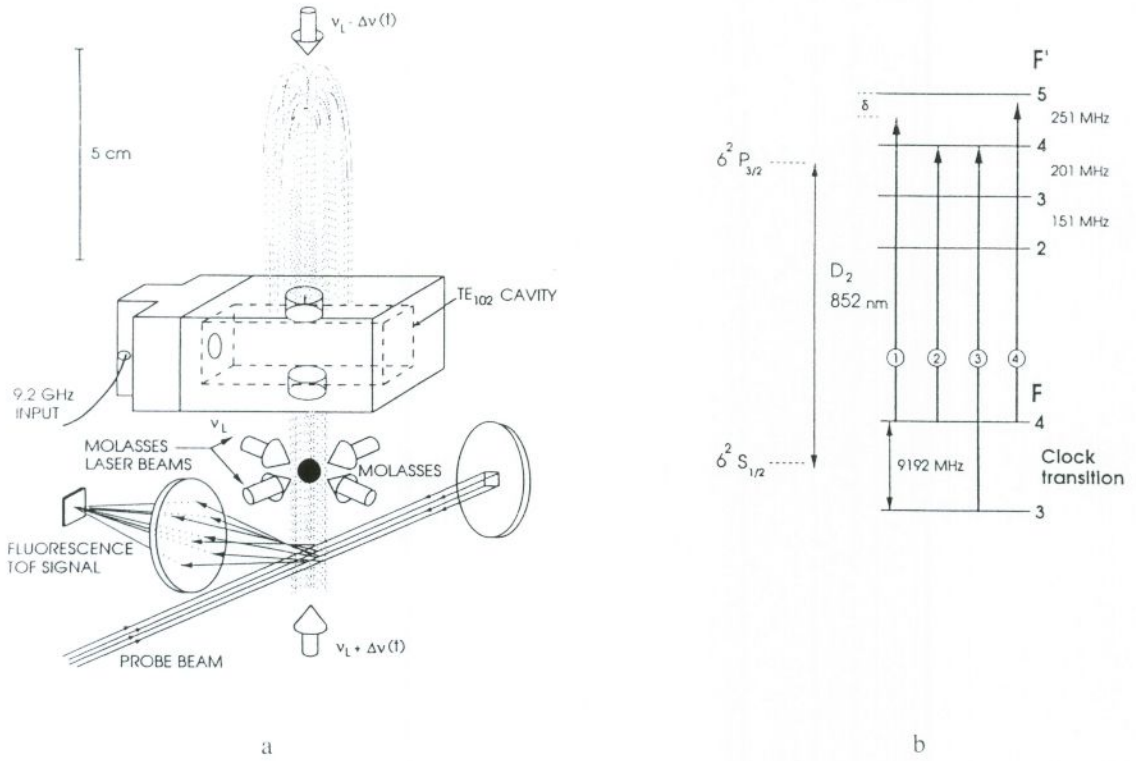
FIGURE CAPTIONS

Fig. 1(a). Apparatus: Atoms from a laser-cooled atomic beam (not shown) are further cooled and confined in optical molasses at the intersection of three pairs of mutually orthogonal, counterpropagating laser beams. Then, by properly changing the frequencies of the vertical beams, one creates a 'moving' molasses that drags the atoms upwards and subsequently cools them to about 5.5 μK in a frame moving up at a chosen velocity. On their way up, the launched atoms interact a first time with the field of a microwave cavity which creates a coherent superposition of two atomic states. During the time T of the ballistic flight of the atoms above the cavity, this coherence freely precesses and is finally probed when the atoms, after having turned around, interact a second time with the cavity on their way down. This produces the Ramsey fringe pattern of Fig 4 for the transition probability between the two levels. The width of the fringes is simply 1/2T or 2.0 Hz for a 0.25 s ballistic time. The microwave resonance is detected optically by measuring the probe induced fluorescence when the atoms cross the probe beam on their way down.
(b) Relevant cesium transitions. Molasses loading and launching: 1 + 3. Hyperfine pumping: 2. Detection: 4.

Fig. 2. Time of flight signal of Cs atoms launched at 1.4 m/s by the method of 'moving molasses' and subsequently cooled to 5.5 ± 1 μK. If the horizontal beams have the frequency ν_L , and if the vertical beams (±) have frequencies $\nu_L \pm \Delta\nu_L$ (t), one creates an optical molasses moving up at velocity $v_z = \Delta\nu_L$ (t) x λ which drags the atoms upwards at the velocity v_z. If the accelaration dv_z / dt is not too large, the temperature of the atoms, which is initially at equilibrium in the molasses, will stay nearly at equilibrium during the acceleration phase. Here $\Delta\nu_L$ (t) is swept between 0 and 1.6 MHz in 1 ms, launching the atoms at v_z = 1.4 m/s. Then a 1.6 ms cooling phase at constant $\Delta\nu_L^{final}$ during which the molasses beam intensity I is divided by four and the detuning increased to 70 MHz cools the atoms to 5.5 μK. For I = 5 mW/cm² and a detuning of -2 Γ, we find that for $(dv_z / dt) < 2\ 10^3$ m/s², nearly all the atoms of the molasses are launched and cooled. In order to reduce the geometrical contribution of the size of the molasses to the width of the TOF peak, a 3 mm high slice of the molasses is selected as in [3] by optically pumping all atoms of the molasses in g, F = 3 except those in a 3 mm high shadow. This is done in less than 1 ms by the $F = 4 \rightarrow F' = 4$ beams. The probe beam vertical dimension is also reduced to 3 mm.

Fig. 3. Cold fountain Ramsey fringes for two different conditions:
a) v_z = 1.19 m/s, T = 26 μK. The atoms reach 3.4 cm above the cavity. The fringe width is 3.0 Hz. Each dot is the average of 5 fountain cycles. 0.5 Hz per frequency step.
b) v_z = 1.41 m/s, T = 5.5 ± 1μK. Fringe with 2.0 Hz.
c) Central fringe of b) with a 0.2 Hz frequency step. Each dot is the average of 5 cycles. The continuous curve is a least square fit with the usual 1/2 [1 + $\cos(\omega_{\mu w}-\omega_{at})$ T] transition probability. The standard deviation is 2.8 %. The frequency (horizontal) standard deviation is about 50 mHz and is comparable to the Allan variance of our Quartz crystal reference oscillator (50 mHz for times between 1 and 100 s). We have chosen this variance for the diameter of the data points. The quartz frequency noise is the dominant limitation to the S/N ratio on this recording.

Fig. 4. The magneto-optical trap.
Consider a one dimensional problem and an atom with a J = 0, J = 1 transition. This atom is placed in an inhomogeneous magnetic field created by two anti-Helmholtz coils. The field is zero at center and increases linearly with the position z. The atom is illuminated by two counterpropagating laser beams detuned red from the atomic resonance ($\omega_l < \omega_{at}$) and respectively polarized σ^+ and σ^- along Oz. Because of this choice of polarizations, atoms on the right (resp. left) of the center are brought into resonance with the laser beam coming from the right (resp. left) and are pushed towards the center by the radiation pressure of this laser beam. Such a scheme can be extended to 3 dimensions and a J, J + 1 transition.


$\nu_L - \Delta\nu(t)$
5 cm
TE_{102} CAVITY
9.2 GHz
INPUT
ν_L
MOLASSES
LASER BEAMS
MOLASSES
FLUORESCENCE
TOF SIGNAL
PROBE BEAM
$\nu_L + \Delta\nu(t)$
F'
5
251 MHz
4
201 MHz
3
151 MHz
2
$6^2P_{3/2}$
D_2
852 nm
1
2
3
4
F
4
$6^2S_{1/2}$
9192 MHz
Clock
transition
3

a b

Fig. 1

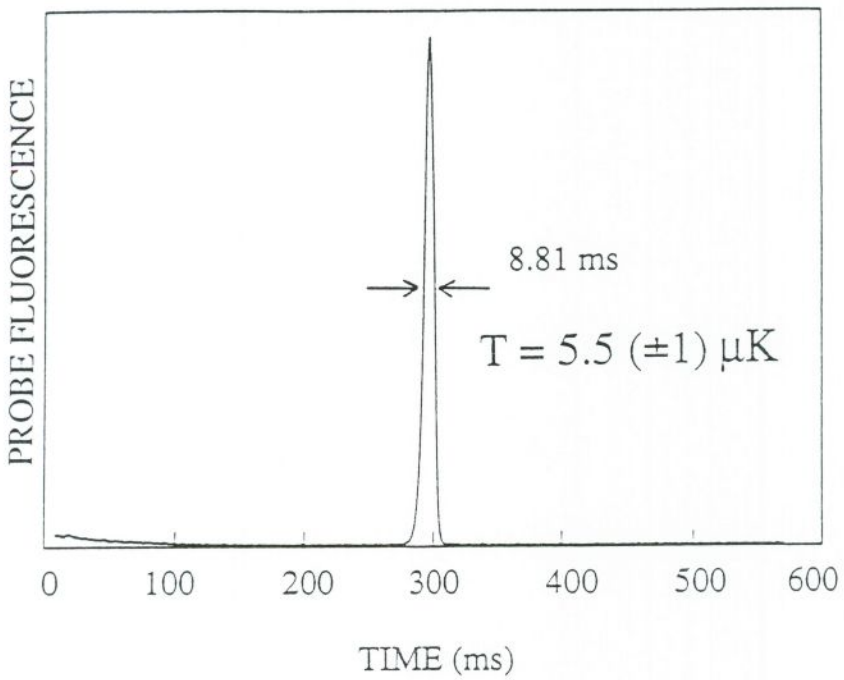
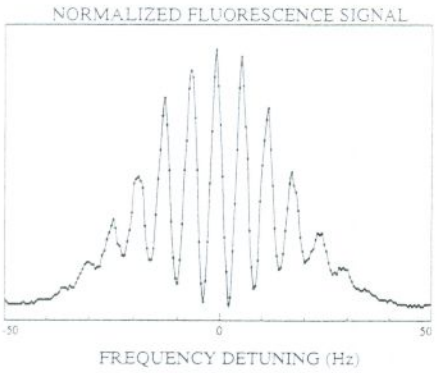
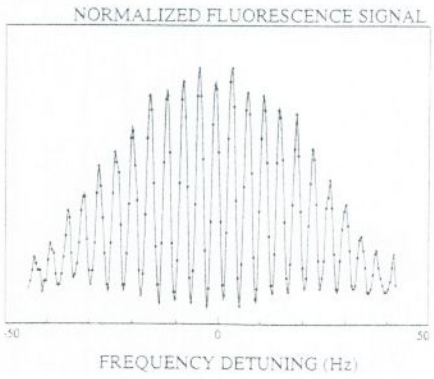

PROBE FLUORESCENCE
8.81 ms
T = 5.5 (±1) μK
0
100
200
300
400
500
600
TIME (ms)

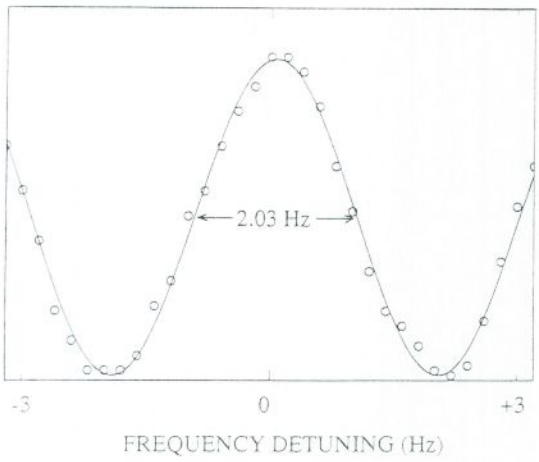
Fig. 2



a



b



c

Fig. 3

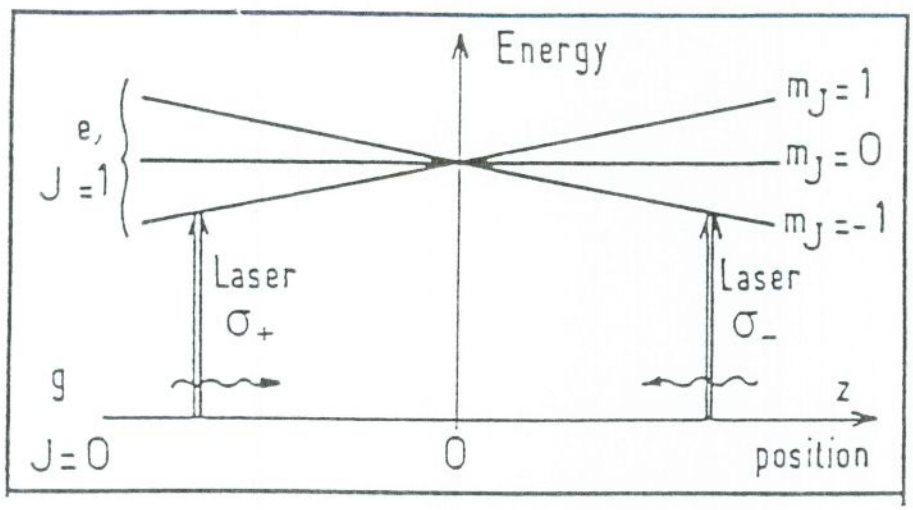


Fig. 4

ANNEXE 5

TABLE RONDE SUR LA TELESCIENCE

Bien que chargé, le programme du Séminaire a permis de réunir une trentaine de personnes, essentiellement des scientifiques, pour présenter les concepts de téléscience, en préciser les enjeux et discuter de l'approche de cette problématique (voir tableau ci-joint des transparents présentés).

La discussion a fait ressortir les points suivants:

- la téléscience est à la fois inévitable et souhaitable pour enrichir globalement le retour scientifique des expériences spatiales, principalement dans le contexte de la préparation de COLUMBUS;

- la téléscience doit permettre une interactivité suffisante entre le scientifique et son expérience.

Il est essentiel de bien connaître le domaine dans lequel l'expérimentateur doit évoluer donc il est nécessaire de s'entraîner, de répéter et d'effectuer des expériences probatoires autant que possible.

Un questionnaire a été distribué aux scientifiques en fin de séance, portant sur leurs projets en cours ou futurs qui pourraient bénéficier de méthodes de téléscience et les opérations de tests et de familiarisation qu'ils souhaiteraient mener. Ce sondage servira de base pour démarrer un programme probatoire de téléscience dès l'année 1991.

TELESCIENCE

CARACTERISTIQUES OPERATIONNELLES COMMUNES AUX FUTURS MOYENS SPATIAUX (COLUMBUS, CAPSULES)

LONGEVITE OPERATIONNELLE (CONTINUITE / RECURRENCE DES VOLS)
=> DUREE DE VIE D'UN INSTRUMENT SPATIAL VOISINE D'UNE DUREE DE VIE TERRESTRE

LIMITATION OU ABSENCE DU ROLE DE L'EQUIPAGE

QUASI-PERMANENCE DES LIAISONS (AC pour les capsules)

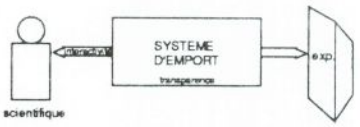
ESSOR TECHNOLOGIQUE

ACQUISITION / COMPRESSION / TRANSMISSION / PRESENTATION DE L'INFORMATION

=> EMERGENCE DU CONCEPT TELESCIENCE COMME MODE OPERATIONNEL CARACTERISE PAR

INTERACTIVITE

TRANSPARENCE



INTERACTIVITE

CONDITIONS	MOYENS	CONTRAINTES	APPROCHE
OBSERVABILITE DE L'EXPERIENCE	. Observation multi-dimensionnelle	. Capacité des canaux de liaison	· Compression de données · Filtrage bord (SE)
	. Présentation de l'information	. Comprehensibilité	BANCS
	. Permanence de l'accès	. Retard, contraintes opérationnelles	
LIBERTE DE PLANIFICATION "TACTIQUE"	. Allocation d'enveloppe de ressources	. Suivi en temps réel	
	. Responsabilisation, entrainement	. Représentativité du contexte opérationnel simulé	DE
	. Corrélation avec des ressources sol	. Accès, liaisons	
CAPACITE DE REACTION	. Permanence de l'accès	. Délais de vérification	
	. Facilité de génération des commandes	. Sécurité	SIMULATION

TRANSPARENCE

CONDITIONS	MOYENS	CONTRAINTES	APPROCHE
DELAI DE FAMILIARISATION	. Simulateurs	. Représentativité	Etude de définition USOC
FACILITE D'ACCES AU CENTRE OPERATIONNEL	. Décentralisation (USOC, UHB)	. Complexité opérationnelle	Vols précurseurs COLUMBUS
DISPONIBILITE DE L'INSTRUMENT	. Maintenance / Préparation de l'instrument	. Planification de l'utilisation des ressources	Expériences probatoires fusées-sonde,..
		. Existence de moyens dédiés (robotique interne)	. Evaluation des apports de la robotique interne