

En mémoire d'Alain Roux



Laboratoire de Physique des Plasmas

Dominique Fontaine
 avec la contribution de collègues du LPP,
 du PNST, du CNES

LPP, Laboratoire de Physique des Plasmas, Ecole Polytechnique, France






Alain Roux Journée d'hommage



20 novembre 2015
 Amphî Poincaré Ecole Polytechnique

Programme

Accueil à 9h30
 Introduction de la journée, P. Chabert et D. Fontaine (LPP)

Les premières observations satellitaires
 Alain, an international scientist, A. Pedersen (Oslo University, Norway ESA),
 premières observations spatiales à bord des satellites OGO dans un plasma magnétosphérique
 rôté en Helium, S. Peraud (CETP)

Les environnements planétaires
 Mission Cassini-Cydon et émissions radio planétaires, P. Zarka (LISA)
 Dynamique de la magnétosphère de Jupiter: observations de Galileo, R. Lugin (IRAP)

La mission CLUSTER
 D'Isaac à Cluster, les origines d'un grand projet spatial européen, M. Blanc et J.-A. Sauvallet (IPAG)
 La mission de Cluster, R. Bonville et G. Sckelley (CNRS)
 Alain et l'ESA, P. Escoubert (ESA) et contributeur de R.-M. Bonnet (IST), Torrey ESA

Buffet (inscription voir: <http://www.lpp.fr>)

14h
La physique des plasmas magnétosphériques
 Oscillation magnétosphérique de l'énergie du vent solaire pendant les sous-orages, J.-A. Sauvallet (IPAG)
 Développement des sous-orages ? Une problématique résolue ouverts ? O. Le Corre (LPP)
 Alain et les collaborations pour la mesure des ondes sur la mission Cluster, P. Coiffier, P. Lemaire, J.-L. Roux (LPOE)

L'instrumentation
 Alain et les instruments spatiaux, S. de la Porte et C. Coste (CETP, LPP)

La théorie
 Alain et ses devoirs en théorie des plasmas, G. Laval (CPRE)

La stratégie scientifique
 Le partenariat Plasma - Soleil, A. Gagné (IRD)

Les projets futurs
 Le rôle d'Alain Roux dans la gestion de la mission Solar Probe, M. Maksimovic (LISA)

Témoignages personnels







Remerciements au SCOSTEP et au
PNST pour leur soutien

Ici, simple évocation de quelques aspects de la carrière d'Alain

→ occasion de survoler presque 50 ans d'histoire de la Physique des Relations Soleil – Terre/ Planètes, vus par le prisme du LPP et des observations d' « ondes »

Bref aperçu de la carrière d'Alain

1967 : DEA de Physique des Milieux Ionisés (M2)

1968 : Bourse du CEA sous la direction de René Pellat et Guy Laval

1969 : Bourse du CNES sous la direction de Roger Gendrin au GRI, Groupe de Recherches Ionosphériques (CNET, CNRS, IPG)

1972 : entrée au CNRS, affectation au GRI

GRI → 1975 CRPE: Centre de Recherche en Physique de l'Environnement terrestre et planétaire (Issy, St Maur)

→ 1992 CETP: Centre d'Etude des environnements terrestre et planétaires (Vélizy, St Maur)

→ 2009 LPP: Laboratoire de Physique des plasmas (Palaiseau, Jussieu)

1975 :Thèse d'état: travail théorique sur: « Les mécanismes non-linéaires associés aux interactions entre ondes monochromatiques et particules chargées »



UNIVERSITE DE PARIS VII
 ———
**THESE DE DOCTORAT D'ETAT
 ES SCIENCES PHYSIQUES**

présentée
 par
 Alain ROUX

pour obtenir le grade
 de Docteur ès Sciences

—————
**MECANISMES NON-LINEAIRES
 ASSOCIES AUX INTERACTIONS
 ENTRE ONDES MONOCHROMATIQUES
 ET PARTICULES CHARGEES**
 ———

Soutenue le 17 juin 1975
 devant la Commission d'examen
 composée de

E. SCHATZMAN	Président
R. GENDRIN	Examinateur
J. HEYVAERTS	Examinateur
C.F. KENNEL	Examinateur
R. PELLAT	Examinateur



Interactions ondes – particules

→ Aspects théoriques démarrés au CEA puis continués à l'Ecole Polytechnique au Centre de Physique théorique (CPhT) sous l'impulsion de R. Pellat et G. Laval:

Collaborateurs: R. Pellat, G. Laval, M.-N. Bussac, E. Asseo, J.-C. Adam,

→ Interprétation d'observations au sol et dans l'espace:

au GRI/CRPE/CETP/LPP sous l'impulsion initiale de Roger Gendrin:

- au sol - station de Kerguelen - et en fusée – fusées sondes ARAKS -,
- mais surtout en satellite: missions spatiales GEOS 1 & 2, ISEE, Galileo, Cassini, Viking, Freja, Cluster, Themis, MMS ...

Quelques thématiques étudiées:

Structure des ondes en milieu inhomogène

Emissions radios planétaires

Déclenchement des sous-orages magnétosphériques

...



Missions magnétosphériques GEOS -1/GEOS -2

Lancement de GEOS-1 en 1977:

Problème du moteur d'apogée

→ orbite elliptique entre 2000 km et $7 R_E$
de période 12h

Lancement de GEOS-2 en 1978:

orbite géostationnaire

Consortium « ondes » : S300

CRPE, responsable des fluxmètres (search coils) : R. Gendrin

Rôle d'Alain : interprétation des données:

Coll: S. Perraut, J.L. Rauch (thèse), C. de Villedary...

A. Pedersen (ESTEC),

G. Kremser, A. Korth (MPI Lindau),

D. Young (U. Bern),

...

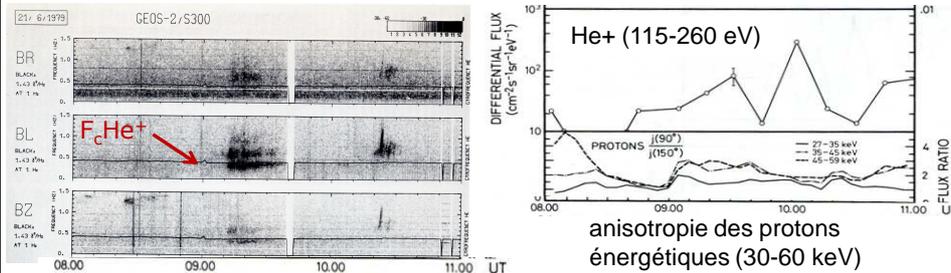


GEOS-1 à l'ESTEC
h=1.32m, d= 1.65m, 574 kg



Observations de GEOS-2 à l'orbite géostationnaire:

Ondes UBF < $F_c(H^+)$



Interprétation:

H^+ magnétosphériques énergétiques (qq 30s keV) anisotropes: $T_{\perp} > T_{\parallel}$

→ ondes cyclotroniques ioniques: $f < F_c(H^+)$

→ gyrorésonance avec des ions froids He^+ d'origine ionosphérique

→ $f < F_c(He^+)$: chauffage des ions He^+

→ $f > F_c(He^+)$: accélération $\perp B$ des ions He^+ à des énergies de 100 – 300 eV

(Young et al., 1981, Roux et al., 1982)



Mission suédoise VIKING (1986-1987), alt. ~2 Re

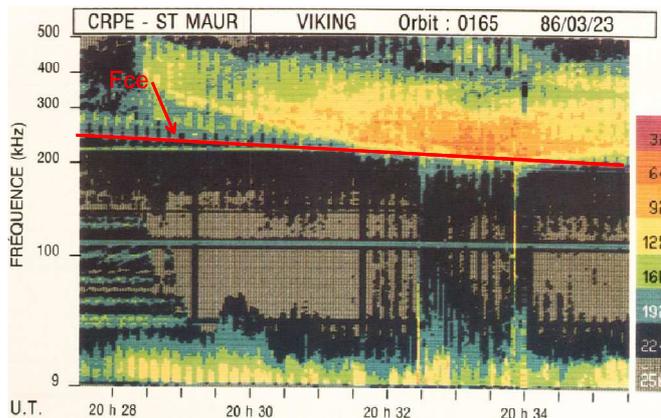


Viking
h=50cm, d=1.9m, 520 kg

Participation du CRPE à l'instrument :

High-Frequency wave experiment (V4H : 10-500 kHz)

PI : Aksel Bahnsen (DSRI), Col CRPE: R. Pottelette, R. Gendrin



Premières traversées de sources AKR (auroral kilometric radiations)

Collaborations d'Alain avec: Le Quéau, Pellat, ..., doctorants: Hilgers, Louarn



Electrons piégés dans une cavité:
 → Source d'énergie libre pour l'instabilité maser synchrotron
 (Le Quéau, Pellat, Roux, 1984; Roux et al., 1993)

CRPE
CNET

Phénomènes d'accélération collective de particules, Cargèse, 1991, D. Grésillon et al.

Interactions ondes-particules dans les magnétosphères des planètes géantes

Galileo (NASA) vers Jupiter:

Enfinement, après retards:

- lancement en 1989
- arrivée à Jupiter en 1995
- plongée vers Jupiter en 2003

h=5.3m, 2 300 kg

Consortium « ondes » PWS (PI: Gurnett).
 En remplacement de R. Gendrin devenu directeur du CRPE, Alain devient «lead»-Col
 Le CRPE est responsable de la fourniture de 2 fluxmètres

- à basses fréquences (5Hz à 3.5kHz)
- à hautes fréquences (1-50 kHz)

Collaborateurs d'Alain avec:
 S. Perraut, P. Louarn, T. Chust, A. Meyer, C. de Villedary,
 ...

search coil preamplifier

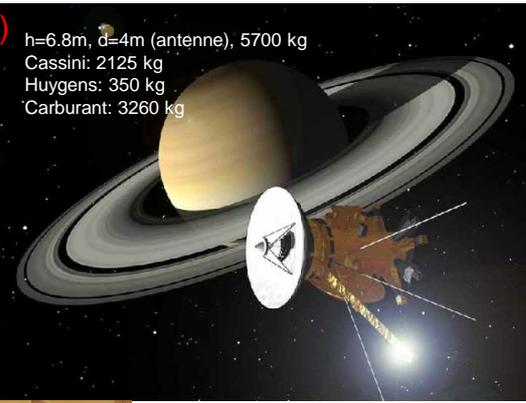
LPP

Cassini-Huygens (NASA-ESA) vers Saturne

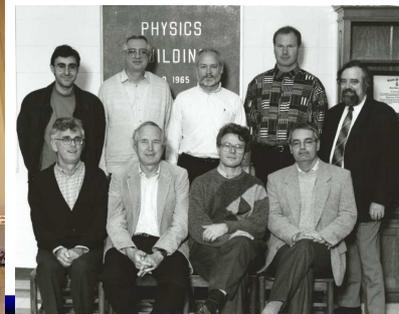
Lancement : 1997
 Insertion : 2004
 Fin de mission : 2017

Consortium Ondes (RPWS) PI: Gurnett
 Alain est « lead » Col
 Le CETP est responsable de la fourniture du fluxmètre tri-axes

Collaborations avec: P. Canu, N. Cornilleau-Wehrlin, A. Meyer, P. Galopeau, P. Louarn,



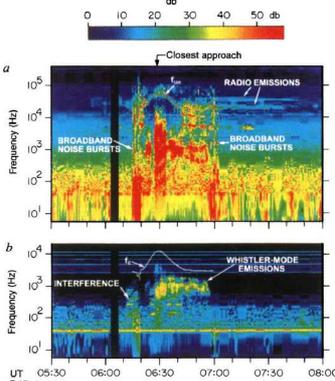
$h=6.8\text{m}$, $d=4\text{m}$ (antenne), 5700 kg
 Cassini: 2125 kg
 Huygens: 350 kg
 Carburant: 3260 kg



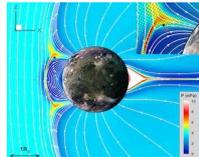



LPP

Magnétosphère de Ganymède



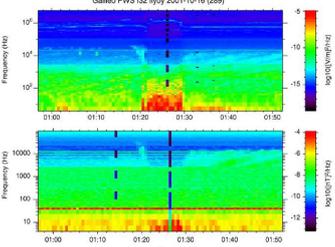
Emissions observées sur une distance de ~ 4 fois le diamètre de Ganymède suggèrent que Ganymède a une magnétosphère (Gurnett, Kurth, Roux, Bolton, Kennel, Nature, 1996)



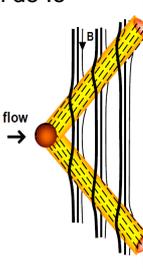
LPP

Ailes d'Alfvén de Io

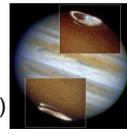
Intenses émissions EM à large bande, corrélées avec les fluctuations Alfvéniques à plus basse fréquence
 → Interprétées comme la signature de la filamentation des ailes d'Alfvén de Io



Galileo PWS 132 flyby 2001-10-16 (289)



→ Rôle dans l'accélération des électrons vers l'ionosphère Jovienne (Chust, Roux, et al, 2005)



Mission CLUSTER

Alain a consacré une grosse partie de son activité (1980 – 2015) à la mission ESA CLUSTER, 1^{ère} mission multi-satellites, dans ses différentes phases de :

- projet,
- opérations,
- et surtout analyse de données

- puis poursuivi avec l'embarquement de fluxmètres (search coils) sur les missions suivantes multi-satellites de la NASA: Themis et MMS

*Collaboration appréciée avec les ingénieurs du CRPE/CETP/LPP:
A. Meyer, B de la Porte, C. Coillot, P. Leroy, ...*



Colloque de prospective CNES, Les Arcs, 1981 Conclusions du groupe «Exploration du système solaire» *Philippe Waldteuffel*

On propose de développer, pour l'étude et la modélisation des systèmes vent solaire/magnétosphère/ionosphère haute atmosphère, trois axes de recherche complémentaires :

- 1 - La modélisation du système complet (visant à l'établissement d'un bilan global des transferts de matière et d'énergie dans le système).
- 2 - L'étude physique détaillée des régions critiques (interface avec le vent solaire, réservoirs de plasma, régions d'accélération).
- 3 - L'étude comparative des différents systèmes planétaires.

Sur le premier point, le groupe a jugé que la seule façon de faire des progrès décisifs vers la compréhension de ces zones-clefs était de les étudier en plusieurs points voisins. C'est le but du projet ESSAIM qui est destiné à mesurer les corrélations spatio-temporelles dans le vent solaire, l'onde de choc, la magnétopause et la queue magnétique. Le groupe souhaite classer ce projet en priorité ; il recommande donc que le CNES étudie la définition de cette mission puis réalise une phase A. En parallèle avec cette définition, un groupe d'étude scientifique est mis en place.

Alain Roux dirige l'étude du projet ESSAIM qui débute officiellement en 1981 avec les scientifiques français et les ingénieurs du CNES.



1982: appel à propositions de l'ESA:

✓ Les Français, sous la coordination d'**Alain Roux et Michel Blanc**, ont finalisé l'étude technique pour **ESSAIM : 4 satellites en formation tétraédrique**

Objectif: mesurer notamment les courants (rot B), la forme et la direction de propagation des frontières, ...
Orbite équatoriale, apogée 10-15 rayons terrestres pour atteindre la couche de courant dans la queue de la magnétosphère, magnétopause, ...

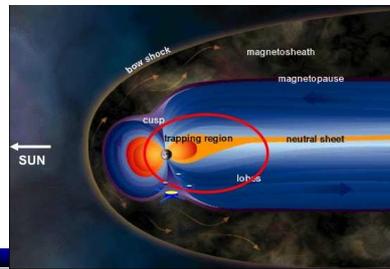
✓ Les allemands et les suédois, sous les directions de **G. Haerendel et B. Hultqvist** veulent proposer une mission à 2 satellites

Objectif: étudier la pénétration aux hautes latitudes du vent solaire dans la magnétosphère,
Orbite polaire passant par les **cornets polaires**

✓ Une réunion décisive se tient au CNET. Après une discussion approfondie, une synthèse est élaborée, pour une mission avec:

- **4 satellites,**
- **une orbite quasi-polaire qui traverse le cornet polaire et la queue de la magnétosphère.**

→ **projet CLUSTER**



CLUSTER

STUDY IN THREE DIMENSIONS OF PLASMA TURBULENCE
AND SMALL-SCALE STRUCTURE IN THE MAGNETOSPHERE

MISSION PROPOSAL, submitted to ESA
15 NOVEMBER 1982

CLUSTER

STUDY IN THREE DIMENSIONS OF PLASMA TURBULENCE
AND SMALL-SCALE STRUCTURE

MISSION PROPOSAL¹⁾ SUBMITTED TO ESA
15 NOVEMBER, 1982

BY

G. HAERENDEL (CONTACT)
A. ROUX
M. BLANC
G. PASCHMANN
D. BRYANT
A. KORTH
B. HULTQVIST

1) This proposal greatly benefitted from a French study (ESSAIM) which was prepared by: M. Blanc, J. Etcheto, C. Harvey, M. Pirre, R. Pottelette, A. Roux, A. Saint-Marc, and J.-A. Sauvaud.



ESA:

- 1983: Mission sélectionnée par l'ESA: ISO (Infrared Space Observatory)
- En 1983, mauvaise situation financière à l'ESA (retards, surcoûts).
Roger Bonnet, nommé Directeur de la Science à l'ESA, propose (1984):
 - de bâtir un programme spatial pour l'ESA avec une stratégie à long terme,
 - permettant aux scientifiques et industriels de se préparer
 - et d'adapter le programme scientifique au budget disponible
 - c'est le concept du **programme Horizon 2000** couvrant la période 1985-2000
- 1985 avril-mai: Workshop de Garmisch-Partenkirchen : **fusion de Cluster et Soho, Solar Terrestrial Space Programme (STSP), 1^{ère} Pierre Angulaire d'Horizon 2000**

Les 3 autres Pierres Angulaires de ce programme seront:

XMM – Newton: observatoire rayons X (1999-2018 ?)

Rosetta vers la comète Churiumov – Gerasimenko (2004 - 2016)

FIRST (Far InfraRed Spatial Telescope) ensuite appelé Herschel (2009-2013)

+ des missions de moyennes importance ou contributions aux missions d'autres agences

*CNES: Séminaire de prospective, Deauville, octobre 1985, classe:
 Soho-Cluster, Cassini et Vesta en 1^{ère} priorités du groupe système solaire*



- En 1986, l'ESA met en place un **Comité Consultatif Terre-Soleil**, présidé par D. Southwood: Alain Roux faisait partie.

Question:
 Comment lancer Soho-Cluster avec le budget d'une seule mission: 400 MUC (~M€) max.?



Compromis trouvé:

- 4 mini Cluster identiques et Soho construits par l'ESA
- réduction de l'instrumentation
- collaboration avec la NASA pour lancer Soho
- lancement gratuit avec le 1^{er} tir d'Ariane 5 (tir de test) pour Cluster
- **Confirmation de Soho-Cluster par l'ESA, comme 1^{ère} Pierre Angulaire de H2000**



10 ans après sélection:

1995:

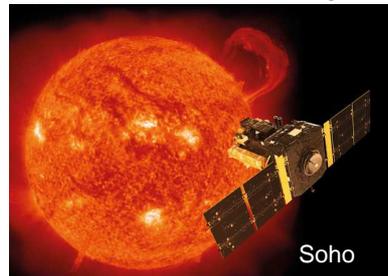
Soho est lancé en décembre 1995 par la NASA

Objectifs: Intérieur solaire, Couronne, Vent solaire

Durée de vie nominale de 2 ans

→ ... en fait, 20 ans d'opérations

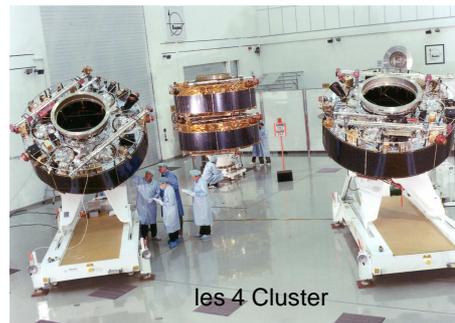
$h=4.3m$, $l_{max}= 9.5m$, 1850 kg



1996:

Les 4 Cluster sont lancés le 4 juin 1996 depuis Kourou par le 1^{er} vol de qualification de la fusée Ariane 5

Durée de vie nominale de 2 ans



4 satellites: $h= 1.3m$, $d=3m$, 1200 kg



4 juin 1996, au lancement:

Panne du calculateur (dépassement de mémoire), suivie d'une panne du système de navigation : mécanisme d'autodestruction enclenché 40 secondes après le lancement



Les débris du lanceur et des satellites retombent dans la mangrove
Anéantissement de 10 ans de travail (communauté scientifique et ESA)

et 16 novembre 1996 : lancement de Mars 96 échoue



Dès le lendemain, Alain a commencé à œuvrer avec une grande énergie et constante détermination pour reconstruire CLUSTER à l'identique

SPC extraordinaire de juillet 1996: problème de coûts:

- Reconstruire Phoenix = 1 Cluster avec les éléments de rechange : 30 MUC.
 - Reconstruction de 4 Cluster : entre 351 MUC et 640 MUC
- Recommandation SSAC : pas plus de 210 MUC pour Cluster II, pour préserver la suite du programme H2000

Agences nationales:

Tièdeur des agences nationales, pour refinancer les charges utiles
En France, refus du Secrétariat d'Etat à la Recherche du Ministère

Avril 1997: Finalement, après plusieurs mois de discussions et plusieurs réunions des conseils de l'ESA:

La NASA s'engage sur une participation au « Cluster Recovery »

Arianespace propose l'utilisation eu Soyouz-Fregat pour un coût moindre:

Deux lancements nécessaires, 60 MUC = ½ A5

Accord de R. Bonnet pour financer 40% du coût de reconstruction par l'ESA

→ **Décision de reconstruire à l'identique pour un coût de 214 MUC**



Cluster II a été reconstruit en moins de 4 ans

Lancements réussis des 2 x 2 satellites de Cluster II de Baïkonour les 16 juillet et 8 août 2000.

Alain est le 1^{er} PI du consortium « ondes » WEC

Wec meeting, 1999



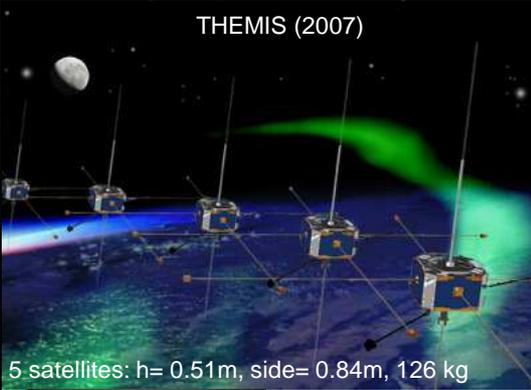
Le LPP est responsable du fluxmètre 3-axes
STAFF (PI: Nicole Cornilleau – Wehrlin)



L= 27 cm
sensibilité
0.012pT/√Hz à 1 kHz

Missions multi-satellites NASA: THEMIS (2007), MMS (2015)
dans le plan équatorial de la magnétosphère (feuillet de plasma)

Le LPP est responsable des fluxmètres 3-axes; *Alain est «lead» Col*

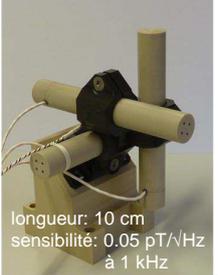


THEMIS (2007)

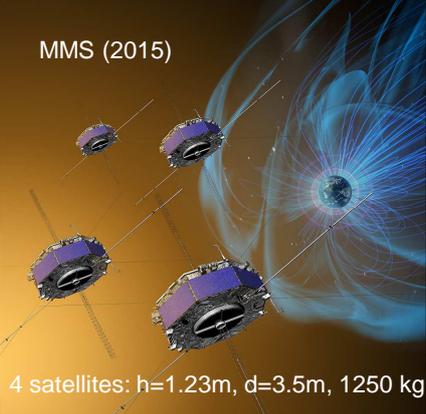
5 satellites: h= 0.51m, side= 0.84m, 126 kg



longueur: 17 cm
sensibilité: 0.015 pT/√Hz
à 1 kHz



longueur: 10 cm
sensibilité: 0.05 pT/√Hz
à 1 kHz



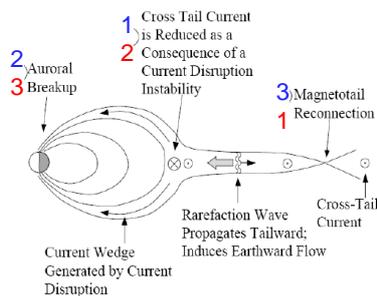
MMS (2015)

4 satellites: h=1.23m, d=3.5m, 1250 kg

Déclenchement des sous-orages magnétosphériques:

l'un des intérêts majeurs d'Alain sur (GEOS) CLUSTER, THEMIS, MMS:

2 scenarii toujours en discussion dans la communauté:



1. interruption de courant ~7–15 Re
2. dipolarisation locale
premières manifestations aurorales
écoulements rapides vers la Terre
propagation de la perturbation vers la queue
3. reconnexion

1. création d'une ligne neutre ~20-30 Re
écoulements rapides vers la Terre
2. freinage, courants //,
3. premières manifestations aurorales

Alain a plus particulièrement contribué à l'étude des modes « ballooning »
(Roux et al, 1985, 1991; Holter et al., 1995, Baumjohann et al., 2007)

Actuellement, l'instabilité initiale du déclenchement n'est pas encore identifiée !

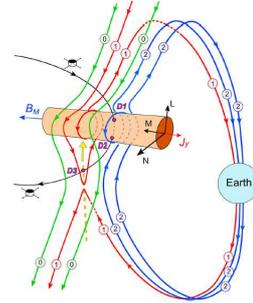


Dernier article publié au JGR en juin 2015:

What is the Nature of magnetosheath FTEs ?

FTE: flux transfer events

A. Roux, P. Robert, D. Fontaine, O. Le Contel, P. Canu, P. Louarn



Rôle d'Alain dans le projet à venir de « sonde solaire » :

- Proposition de *E. Marsch et A. Roux* en réponse à un AO de l'ESA en 1993 du programme H2000+, pour participer à un projet d'exploration in situ de la couronne solaire: « Orpheus »
- 1998: CNES séminaire de prospective d'Arcachon: recommandation de lancer une mission de type « sonde solaire »
- 1998: proposition RAMSES, A. Roux, D. Le Quéau, J.-C. Vial
- 1999-2000: projet de sonde solaire NASA – CNES: A. Roux et al. contribuent à la valorisation des moyens d'essai du site d'Odeillo pour des tests
- 2004: lettre de participation française, lancement prévu 2018

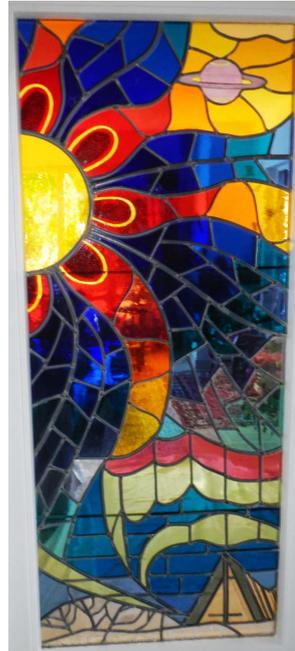


Fondation du PNST en 1998 avec Alan Gabriel, et 1^{er} directeur

- A partir des GDR plasmae et solaire
- Succès: Près de 20 ans après, le PNST est devenu le lieu où s'élabore la stratégie de la discipline sur les plasmas d'origine solaire, terrestre et planétaire en France.



Courtesy of J. Macri, Durham, 2008



@ SylvainePerraut, 2015

