

REX CONCORDIASI ET CONCLUSIONS DU GROUPE D'ENQUÊTE

COMET ENV: BALLONS ET ENVIRONNEMENT ATMOSPHÉRIQUE

18/05/2022

CLS, Toulouse

Françoise BEZERRA, Expert Radiations

REMERCIEMENTS

Etude menée dans le cadre d'une anomalie projet en interne CNES avec le support de l'ONERA.

IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 61, NO. 4, AUGUST 2014

1703

Atmospheric Radiation Environment Effects on Electronic Balloon Board Observed During Polar Vortex and Equatorial Operational Campaigns

G. Hubert, F. Bezerra, J.-M. Nicot, L. Artola, A. Cheminet, J.-N. Valdivia, J.-M. Mouret,
J.-R. Meyer, and Ph. Cocquerez

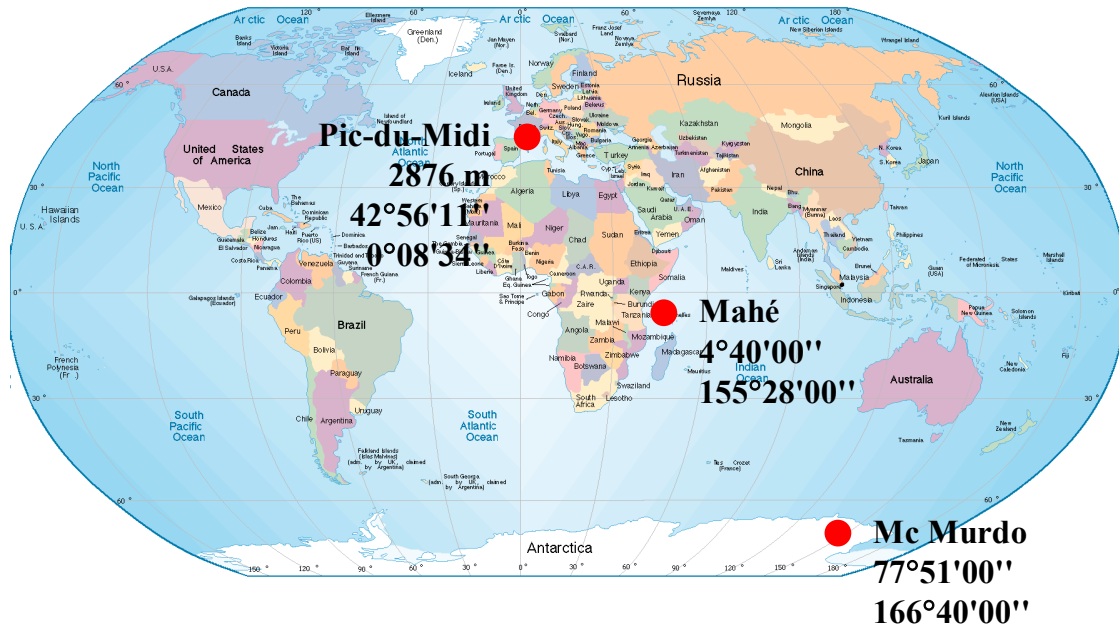
Un COTS très sensible aux radiations à l'origine d'anomalies en vol sur ballons stratosphériques



© CNES/COCQUEREZ Philippe, 2010

- La mission Concordiasi
- Les anomalies constatées
- Investigations sur une possible cause due aux radiations
- Mise en oeuvre d'essais radiations
 - sur nacelle ballon
 - au niveau composant
- Calcul de taux d'événements
- Conclusions

La mission CONCORDIASI



- Collecte de données scientifiques pour l'étude de l'atmosphère et pour l'aide à l'utilisation de l'instrument IASI en régions polaires.
- Station Concordia (Sol) + région Antarctique (Ballons).
- 2 campagnes ballons CONCORDIASI :
 - à l'équateur (validation)
Mahé, 4°40'S, 55°28'E
 - au niveau des pôles
Base US Mc Murdo, 77°51'S, 166°40'E
- Modèle représentatif testé en continu au CNES Toulouse.

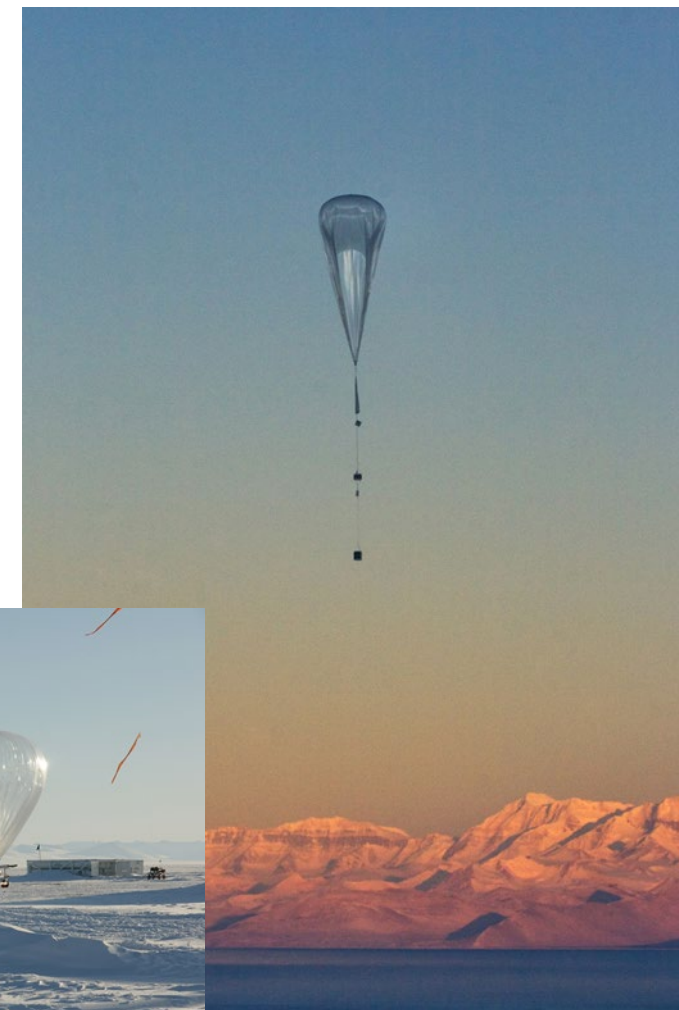
La mission **CONCORDIASI**

- **Campagne de validation:**

- Mahé, Seychelles
- 3 x 3 mois
- 16 km

- **Mission scientifique:**

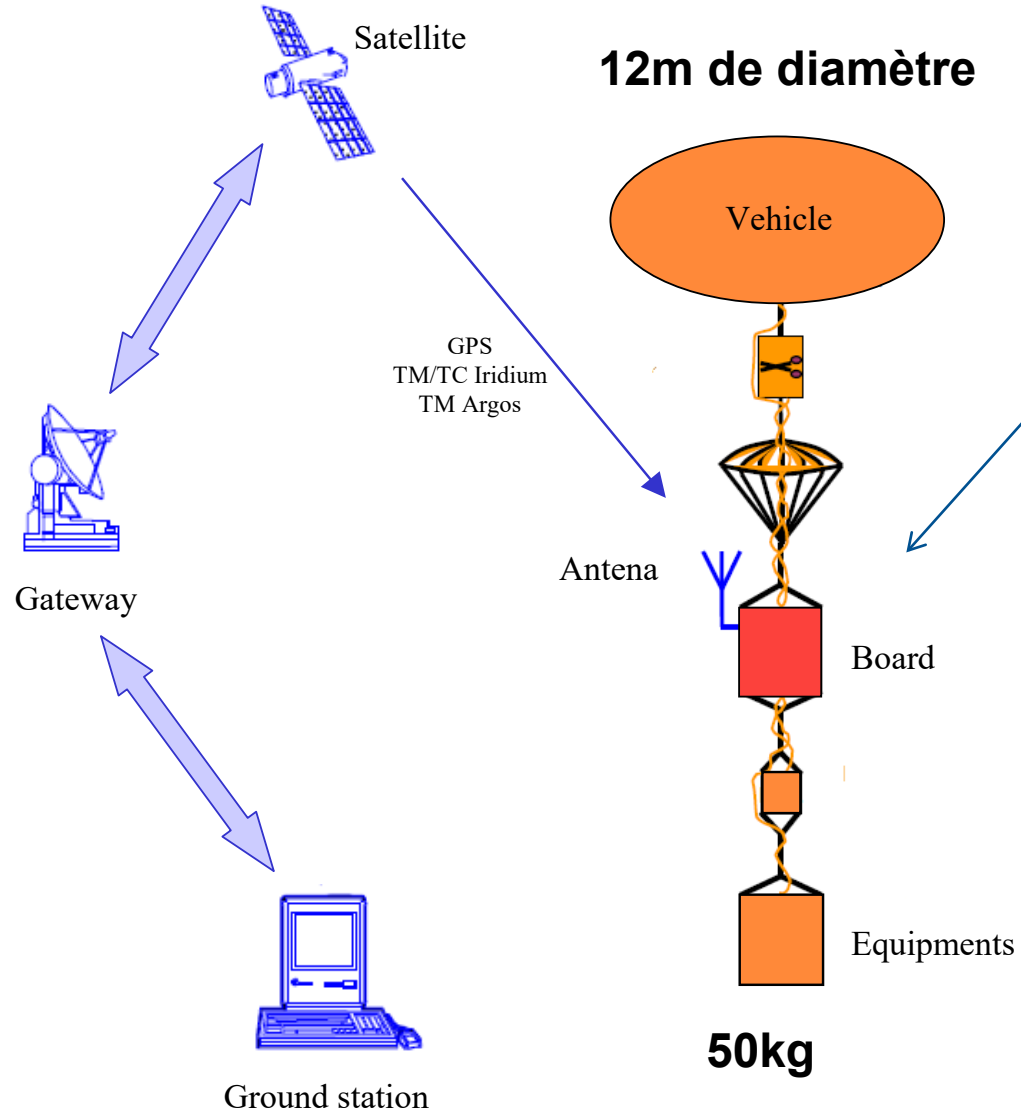
- Base de Mac Murdo (Pôle Sud)
- 19 vols ballons
- Octobre 2010- Janvier 2011.
- 69 jours en moyenne par vol.
- Altitude ~18km



© /Holy Troy, 2010

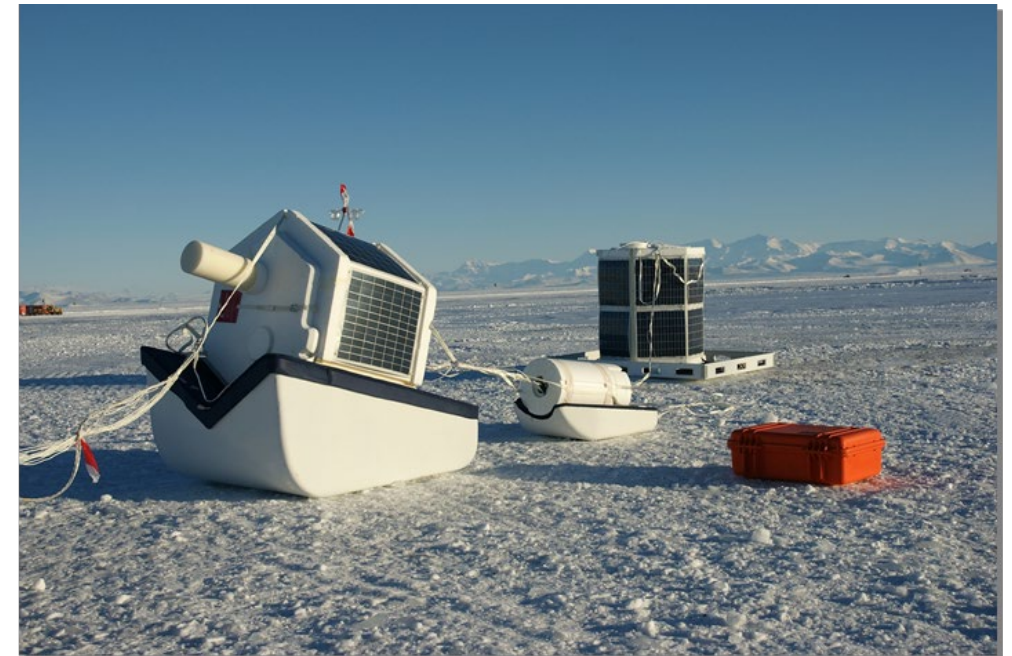
© CNES/COCQUEREZ Philippe, 2010

La mission CONCORDIASI



Plateforme ESTEMA:

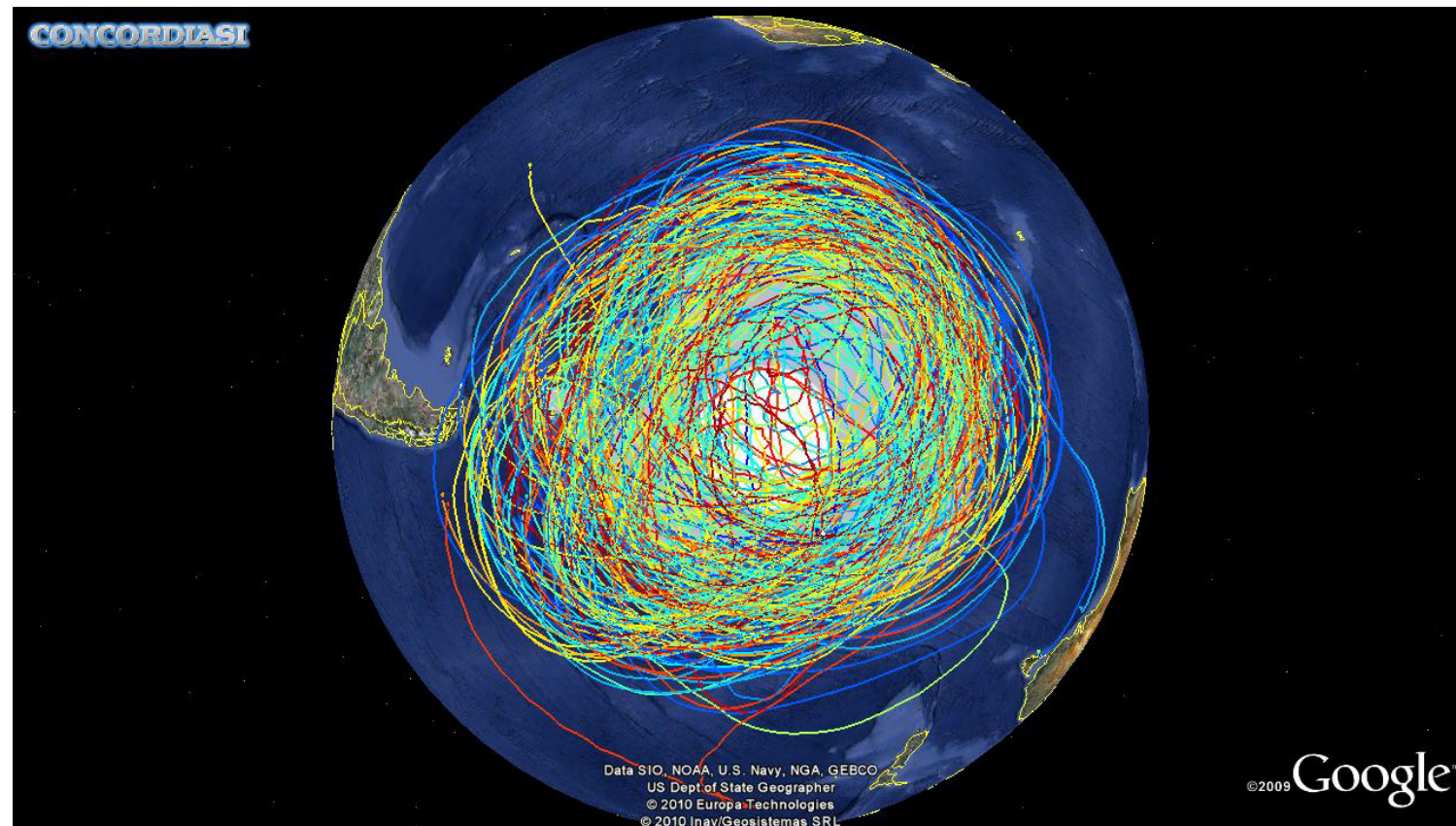
1. ISBA (Iridium gondola for Stratospheric BALloons),
2. MER (Renewable Energy Module)
3. PSB (Payload Supervisor Board)



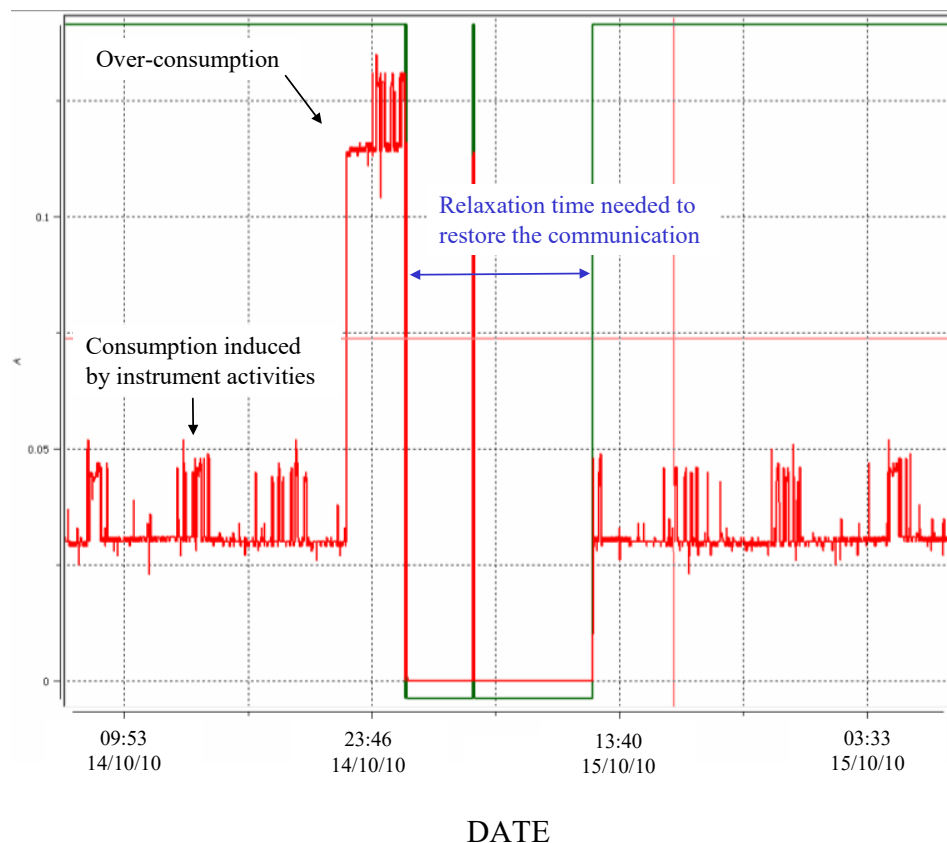
© CNES/COCQUEREZ Philippe, 2010

La mission **CONCORDIASI**

- Couverture complète de l'Antarctique
- Succès scientifique mais... des anomalies en vol



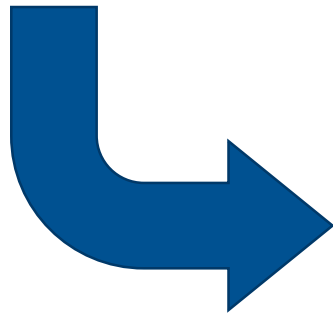
Les anomalies rencontrées



- **Anomalies à répétition observées à Mc Murdo sur des instruments scientifiques et sur le module MER**
- **Impact significatif sur collecte des données scientifiques**
 - 30% data perdues
- **Communication impossible avec PSB et/ou MER.**
- **Surconsommation sur le module PSB**
 - 300 à 500 mA
- **Délai de récupération:**
 - Plusieurs heures nécessaires dans certains cas.
 - Récupération impossible dans d'autres

Les anomalies rencontrées

- **108 pertes de communication à Mc Murdo**
- **1 seule anomalie à Mahé**
- **0 à Toulouse**



Effet de l'environnement polaire?

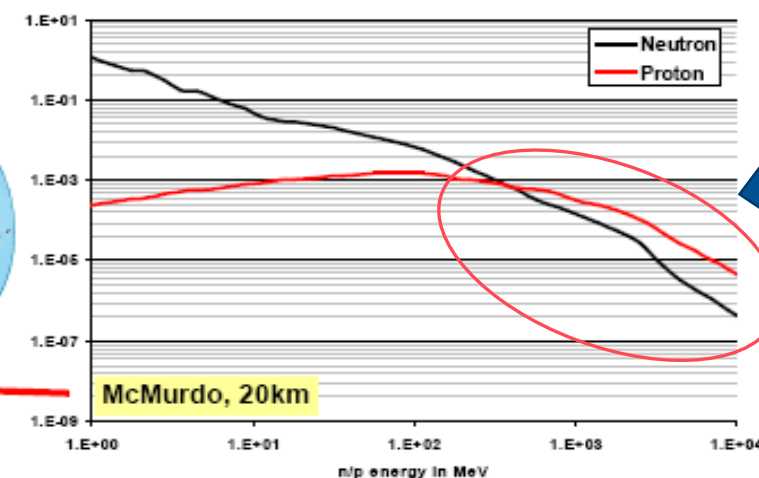
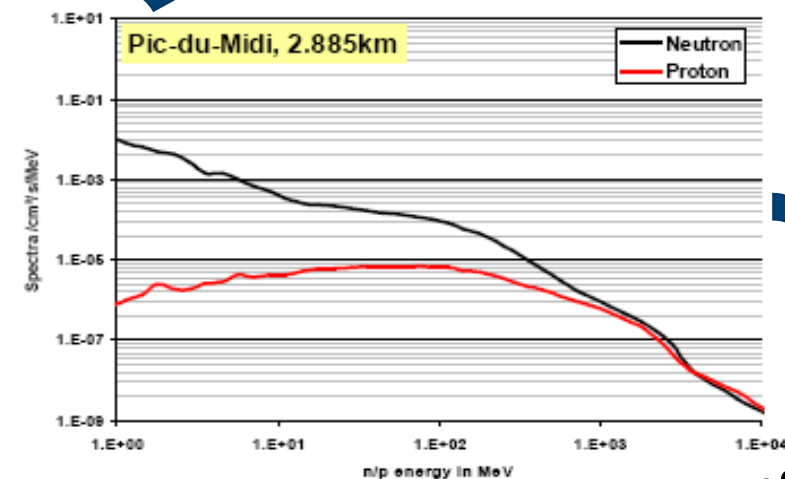
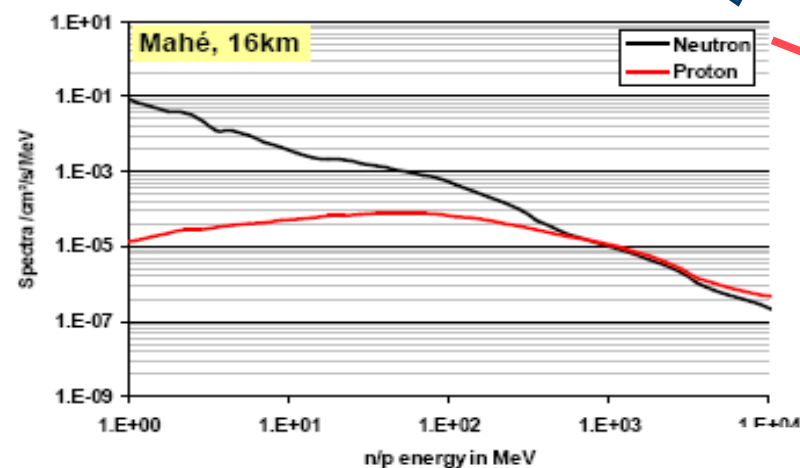
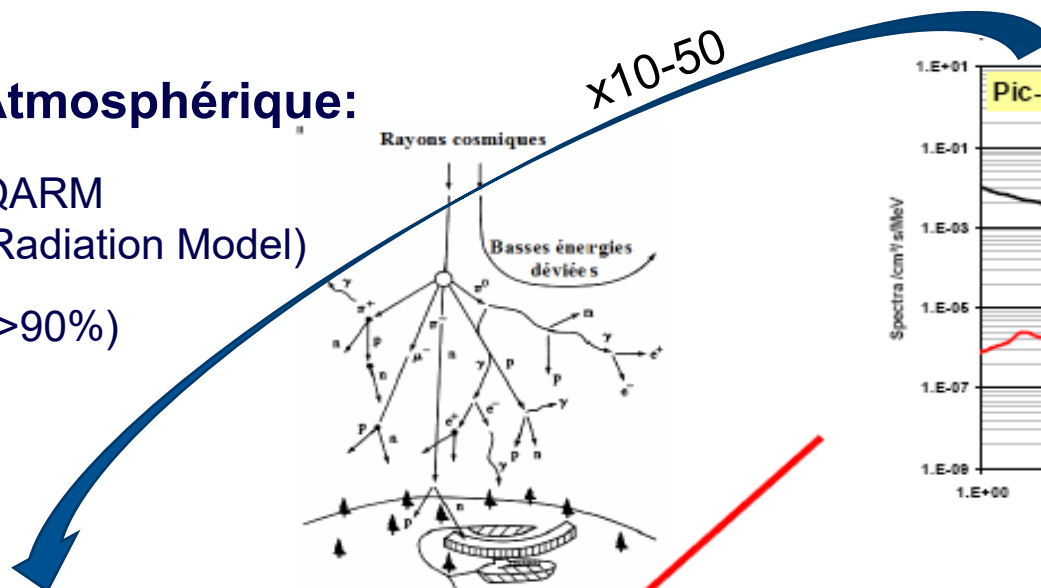
Radiations?

Single Event Effects?

Comparaison des environnements

• Environnement Radiatif Atmosphérique:

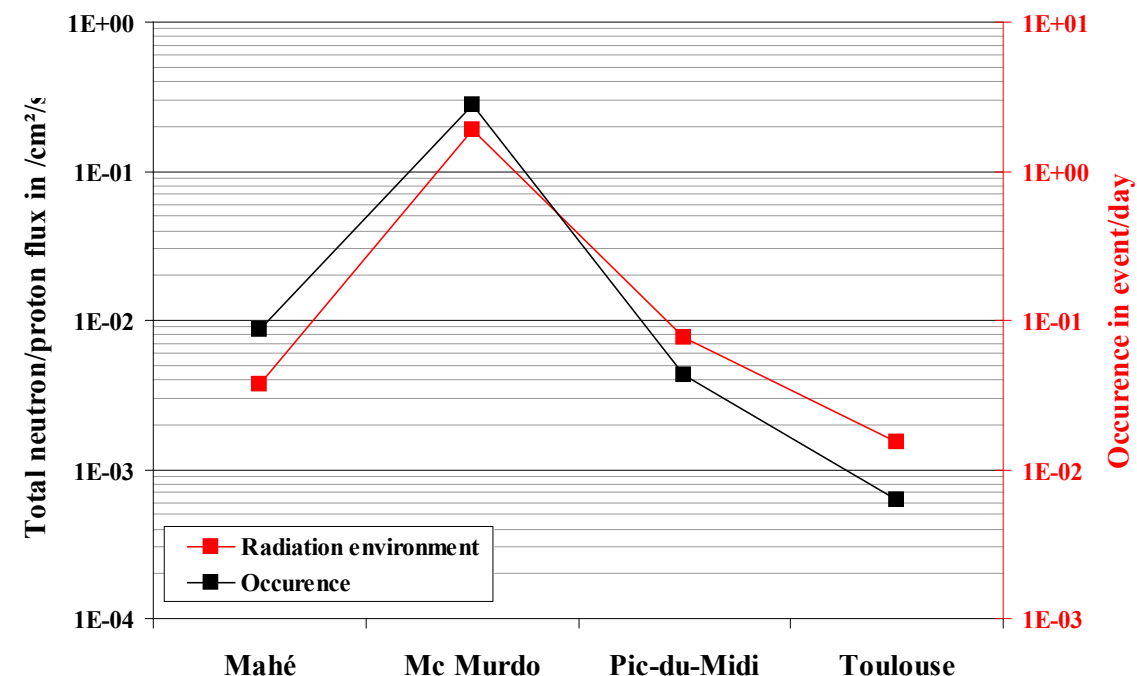
- Calculs effectués avec QARM (QINETIC Atmospheric Radiation Model)
- Neutrons majoritaires $\sim (>90\%)$
- Protons ($<10\%$)



x100-500

Comparaison des taux observés avec l'environnement radiatif

- Compte tenu des durées de test sur chacun des sites, les taux d'erreur sont exprimés en nombre d'événement/jour:
- Très bonne adéquation avec les flux protons + neutrons calculés avec QARM pour chacun des sites



Environnement radiatif très probablement à l'origine de la défaillance.

Investigations sur causes radiations atmosphériques possibles

- **Incréments de courant => Single Event Latchup ?**

SEL: Mise en conduction d'une structure thyristor parasite, potentiellement destructive par effet thermique

- **Analyse de la DCL:**

- Deux composants CMOS non caractérisés en SEL identifiés:

- μ C NXP P89V51RC2FA
- SRAM BSI BS62LV8001E (Brilliance Semiconductors)

- **Analyse du design:**

- SRAM BSI utilisée en mémoire de contexte et protégée par une pile.
- μ C maintenu en mode Reset si Vcc insuffisant.



Lancement d'essais radiations pour confirmer l'hypothèse d'un SEL entretenu par la pile et/ou une autre voie d'alimentation.

Mise en œuvre d'essais radiations

- **Au niveau composant (CNES)**

- Test SEL sous protons de forte énergie à Groningen (Pays-Bas)
- Microcontrôleur NXP P89V51RC2FA
- SRAM BSI BS62LV8001E

Note: Au-delà de 50MeV, la sensibilité SEE est la même sous protons ou neutrons.

- **Au niveau carte PSB (CNES/ONERA)**

- Test carte PSB sous Cf 252 (neutrons 1 à 10MeV)
- Moyen CIRIL de l'ONERA Toulouse
- Source placée au contact du μ C, de la SRAM, d'un CAN et d'une Flash EPROM (boîtiers fermés).

- **Au niveau nacelle complète pilotée depuis Toulouse (CNES/ONERA)**

- Test au PIC du MIDI (2885m)
- Test sous faisceau de neutrons 180MeV à UPPSALAA (Suède)

Résultats des essais radiations:

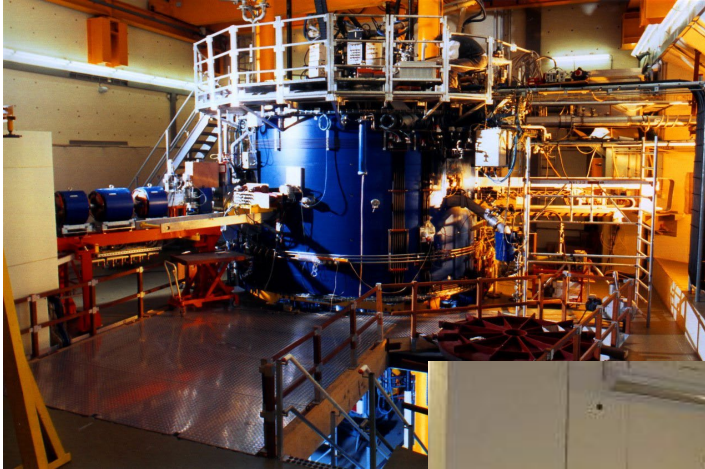
1/ Essais SEL sous faisceau de protons

- **Accélérateur de protons de forte énergie du KVI (Université de Groningen, Pays-Bas)**
 - Energie 10 à 187MeV
 - Cible dans l'air
 - Testeur à 1,5m, contrôle à 40m.
- **Testeur: TILU2**
 - Testeur Intégré de Latch-Up 2eme génération
 - Développé par CNES/ADENEO
 - Test statique: une carte développée pour le μC , une autre pour la SRAM.



Accélérateur de protons fortes énergies du KVI

- KVI, Groningen, Pays-Bas



Faisceau



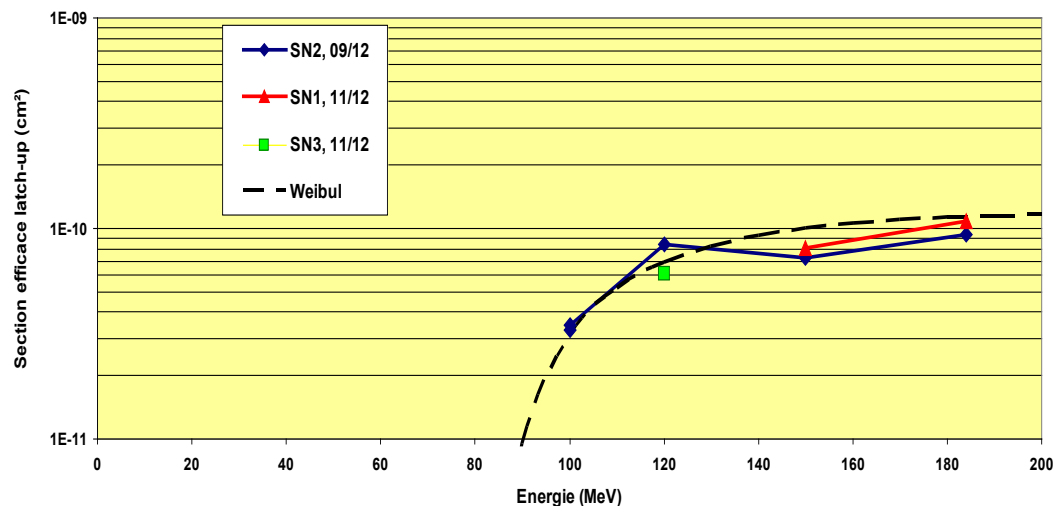
DUT

TILU2

© CNES/ BEZERRA F./2010

Résultats sur le microcontrôleur NXP P89V51RC2FA (1/2)

SEL sous protons du microcontrôleur NXP P89V51RC2FA

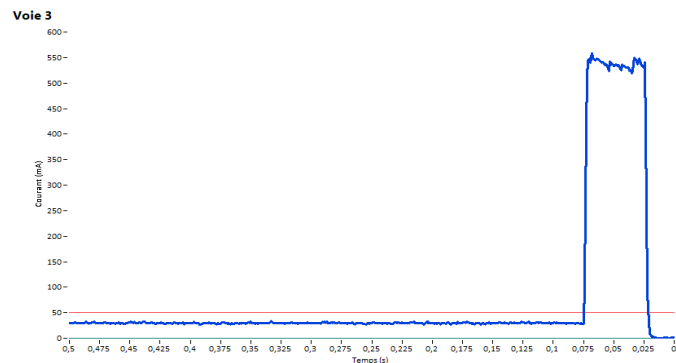


1,20E-10	SIGsat (cm2)
85	L0 (MeV)
40	W (MeV)
1,2	s (nombre)

Composant sensible au latch-up

- Essai réalisé en 2 campagnes (Sept/Nov 2012)
- Même comportement sur 3 pièces
- Sensibilité assez faible
 - Runs longs, Activation des pièces et de la salle
 - Pas de test pour $E < 100 \text{ MeV}$
 - Pas d'effet de dose sur la consommation des DUTs

Résultats sur le microcontrôleur NXP P89V51RC2FA



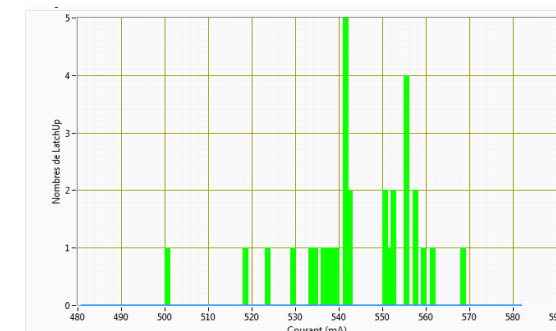
- **Courants de latch-up élevés**

- **Faciles à détecter**

- Conso Nominale 30mA
- ISEL >> 100mA

- **Distribution varie avec l'énergie des protons**

- Centrée autour de 500mA pour $E > 150\text{MeV}$
- De l'ordre de 350mA pour les énergies plus faibles

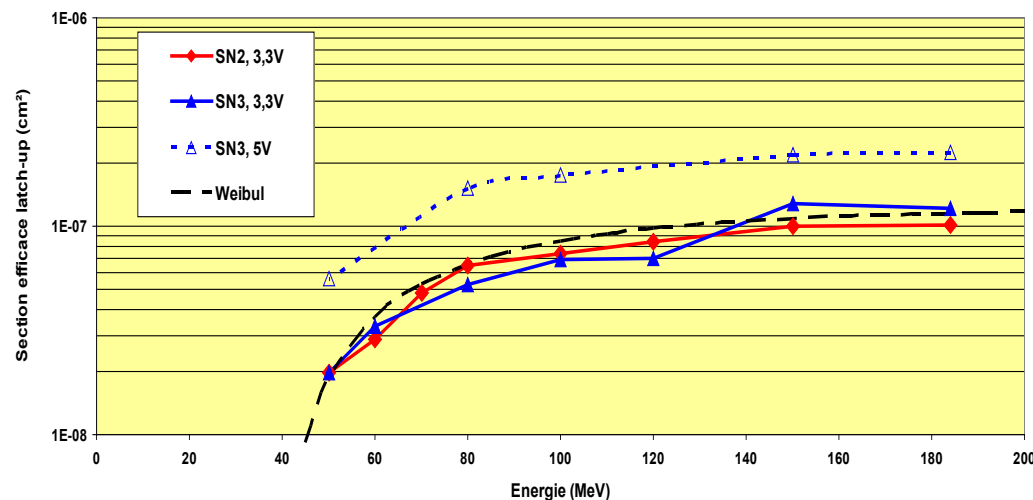


- **Même comportement sur les 3 pièces**

- **Pas de destruction de la pièce si SEL maintenu 30 minutes**

Résultats sur la SRAM BSI BS62LV8001E

SEL sous protons SRAM BSI BS62LV8001E

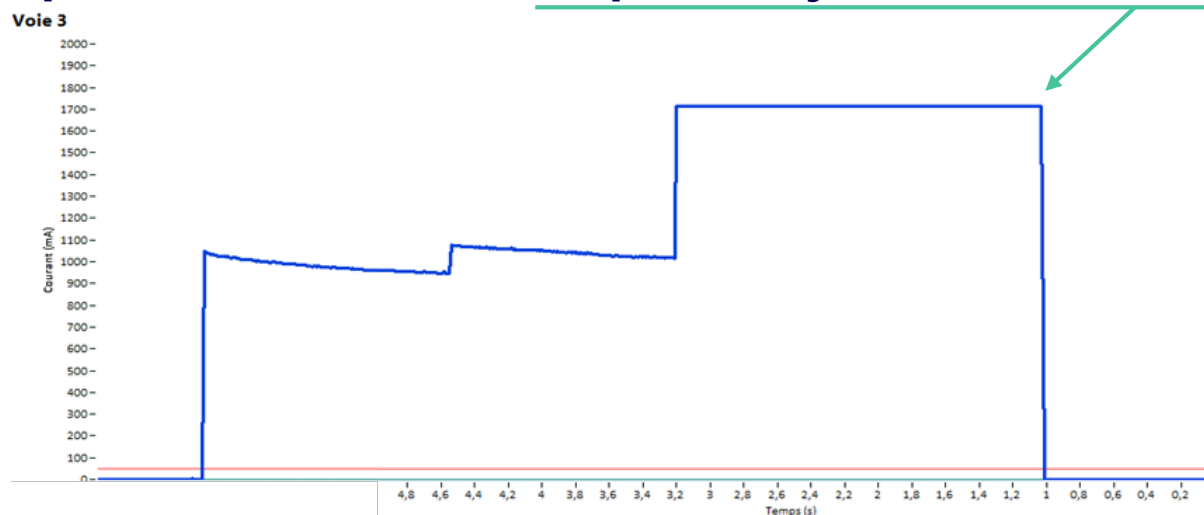
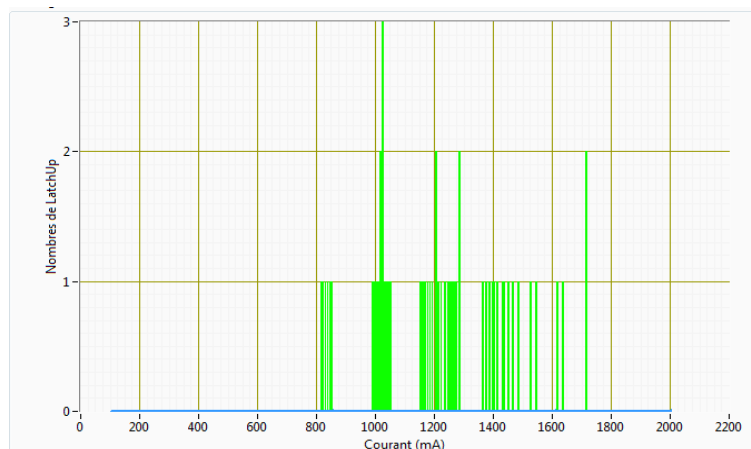
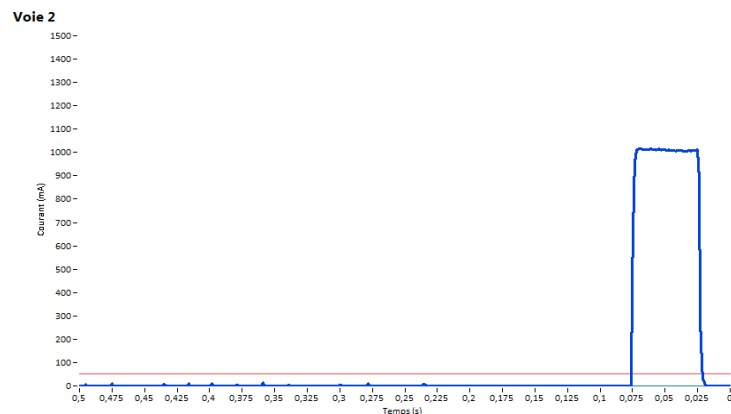


1,20E-07	SIGsat (cm2)
< 40	L0 (MeV)
50	W (MeV)
1,1	s (nombre)

- **Composant très sensible au latch-up**
 - Même comportement sur 2 pièces (Nov 2012)
 - Sensibilité très élevée
 - x1000 comparée au μC
 - Pas d'effet de dose sur la conso des DUTs
- 2x plus sensible pour $V_{cc}=5V$ que pour 3.3V

Résultats sur la SRAM BSI BS62LV8001E

- **Courants de latch-up très élevés (2 pièces et 2 Vcc)**
 - Faciles à détecter
 - Conso Nominale 11mA
 - ISEL > 1A
 - Distribution varie avec l'énergie des protons
- **Si latch-up maintenu, pas de destruction de la pièce mais empilement et saturation puis disjonction testeur (>1.8A)**



Test sur carte PSB sous Cf252

- CIRIL: Source Californium 252 de l'ONERA Toulouse, Emetteur ions, alphas et neutrons (10MeV max).
- Source au contact des composants fermés
- SRAM et μC
- Durée >1mois chacun
- Aucun événement

=> Energie seuil >10MeV.

Vanne d'isolation de la source

Lieu de stockage de la source



Objet sous test

Source en position d'irradiation

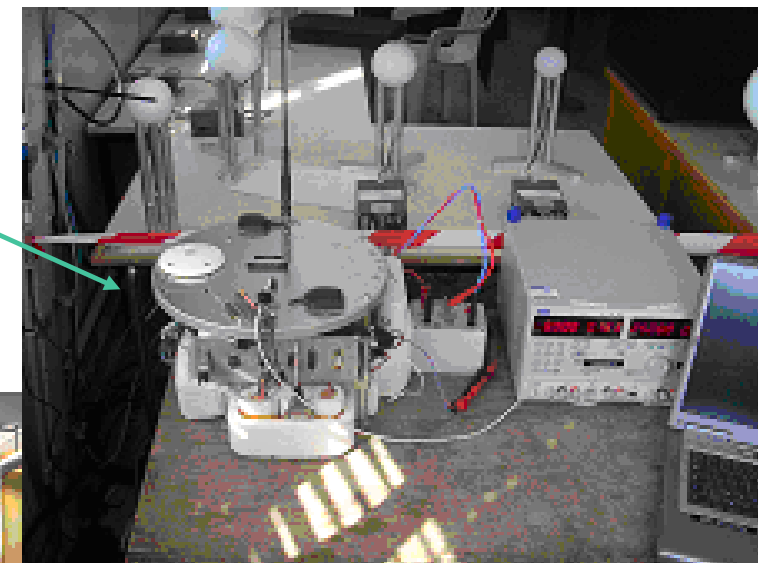
Tige porte-source

Test de nacelle au Pic du Midi (2885m)

- ACROPOL: (high Altitude Cosmic Ray ONERA/Pic du Midi Observatory Laboratory)
- Ancienne salle TDF convertie en salle d'expérimentations scientifiques coordonnées par l'ONERA, équipée entre autres d'un spectromètre neutrons.



ESTEMA

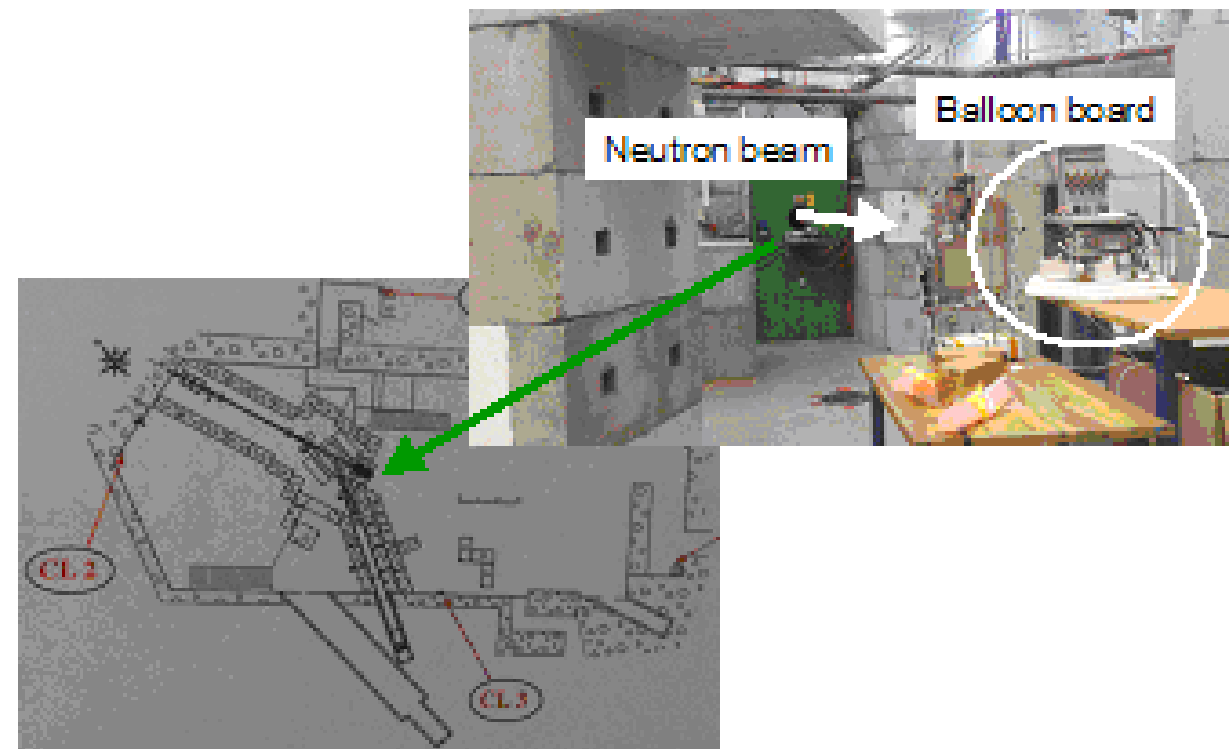


Spectromètre à sphères de Bonner

- Une erreur est survenue en 2012: Incrément de consommation similaire à ceux observés en vol mais sans perte de communication

Test de nacelle sous faisceau de neutrons

- **UPPSALAA, Suède, Moyen QMN**
(Quasi Monoenergetic Neutron beam facility)
- Faisceau neutrons 180MeV dans l'air
- Diamètre 80cm
- **Nacelle complète dans le faisceau en mode opérationnel**
- **Antenne déportée à l'extérieur pour pilotage depuis le CST.**



3 erreurs et signature identique à celles vues en vol:

- incrément de courant,
- perte de communication
- délai de plusieurs heures nécessaire pour récupération complète.

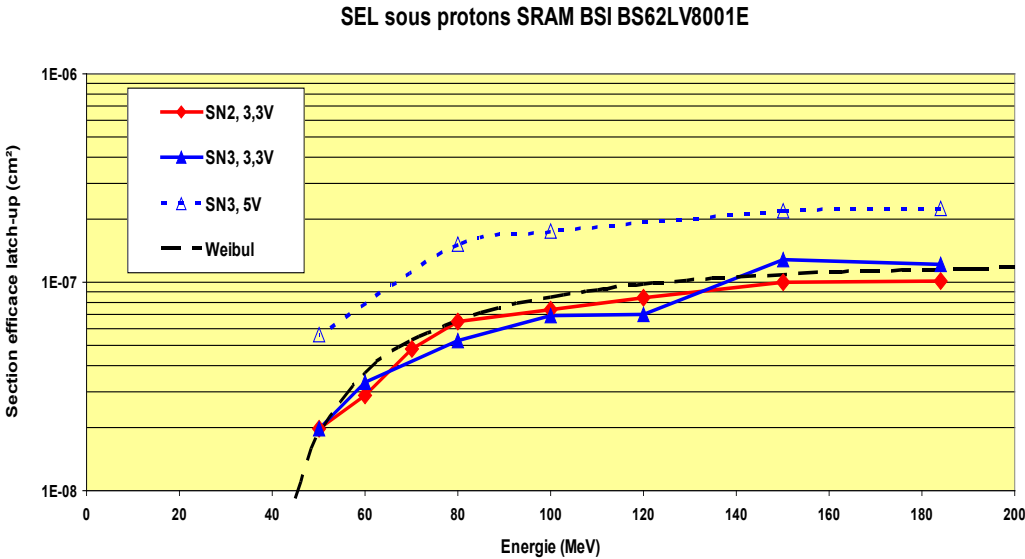
Run	Fluence in cm ²	Consumption in mA	Relaxation in hour
1	1.73E6	31 → 122	1 < τ < 18.5
2	1.87E6	31 → 118	3
3	2.12E6	39 → 121	-

Calcul de taux à partir des résultats de test sur les composants

- A partir des paramètres de Weibull présentés plus tôt:

$$N_{anomaly} = \Delta t \cdot \int_r \left(\frac{\delta \varphi_n}{\delta E} + \frac{\delta \varphi_p}{\delta E} \right) \cdot \sigma_{SEL}(E) \cdot dE$$

	Mc Murdo	
	Modeling i.e. SEL events	In-flight
SRAM BSI 3,3V	40	108
SRAM BSI 5V	80	
NXP P89V51RC2PA	0.04	

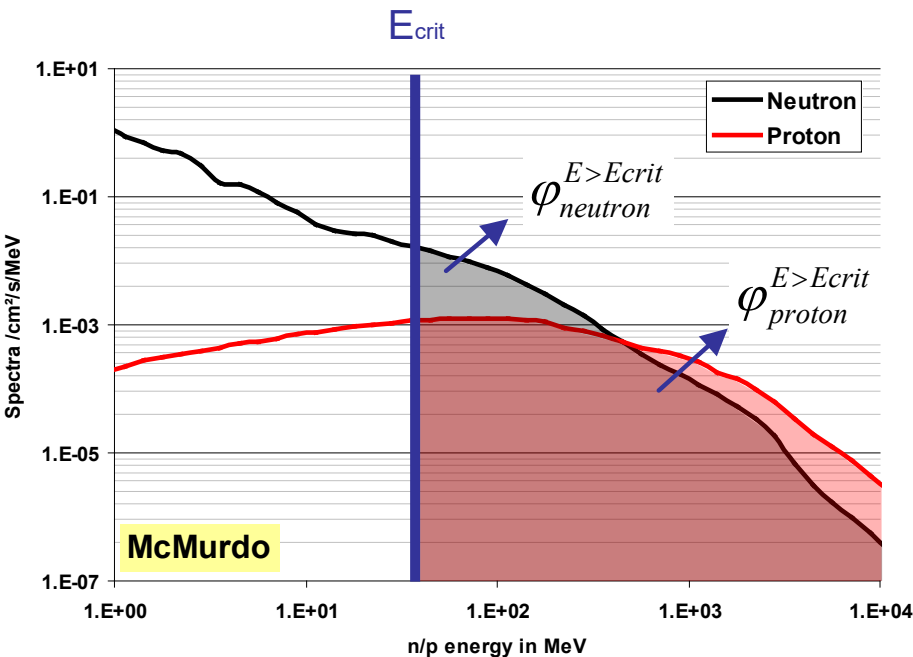


1,20E-07	SIGsat (cm2)
< 40	L0 (MeV)
50	W (MeV)
1,1	s (nombre)

Calcul de taux à partir des résultats de test sur les composants

$$\varphi_{E>Ecrit} = \varphi_{neutron}^{E>Ecrit} + \varphi_{proton}^{E>Ecrit} = \int_{E>Ecrit} \left(\frac{\delta\varphi_n}{\delta E} + \frac{\delta\varphi_p}{\delta E} \right) .dE$$

$$N_{anomaly} = \frac{\varphi_{E>Ecrit}}{\phi_{anomaly}} .\Delta t$$



	Critical energy (E _{crit}) in MeV	N _{anomaly} (from Eq. 2)	
		Modeling	In-flight
Mahé	15	0.74	1
	30	0.63	
	50	0.55	
	100	0.4	
Mc Murdo	15	76	108
	30	60	
	50	53	
	100	42	
Pic-du-Midi	15	0.14	0
	30	0.11	
	50	0.10	
	100	0.07	

Résultat confirmé en février 2022 au CAL (Nice) avec des protons de 20MeV, la SRAM présente toujours du SEL.

CONCLUSION & REX

- Grâce à la redondance entre les vols, la mission scientifique CONCORDIASI a été un succès (taux de succès de 86%) mais 30% de données supplémentaires auraient pu être accumulées sans ces anomalies
=> Nécessité de comprendre l'origine du problème!
- Les anomalies en vol ont pu être reproduites au sol avec un faisceau de neutrons 180MeV.
- L'origine des anomalies a été démontrée: La SRAM BSI
 - Très sensible au SEL avec incréments de courant similaires à ce qui est observé au niveau système.
 - Alimentée par pile en cas de coupure d'énergie: SEL maintenu tant que la pile n'est pas vide.
 - Toutefois, la durée de décharge de la pile est incompatible avec le délai de plusieurs heures reproductible observé en vol et au sol sur nacelle complète: d'autres voies d'alimentation doivent contribuer au verrouillage du SEL.
 - Les consommations des autres voies d'alimentation bord ne sont pas observables au moment des anomalies. => impossible de conclure sur les raisons du délai reproductible de plusieurs heures pour sortir de l'anomalie.

CONCLUSION & REX

- Les calculs de taux ont montré la cohérence des prédictions avec observation en vol
- Malheureusement le moyen d'essai QMN a été définitivement fermé il y a quelques années. Désormais ne sont disponibles que protons monoénergétiques (PARTREC - ex KVI, NL) ou spectres de neutrons (ISIS-ChipIR, UK).
- Faute à « pas de chance » car sélection d'un composant particulièrement sensible mais cela peut se reproduire car le niveau d'intégration des électroniques bord augmente.
- Les expériences scientifiques ont eu plus de chance dans leur sélection de composants puisqu'elles n'ont pas subi ce type de problème.



- **Recommandation du groupe d'enquête:**

La sensibilité à l'Environnement radiatif atmosphérique, en particulier vis-à-vis du Single Event Latch-up, potentiellement destructif, devra désormais être prise en compte dans le design des équipements électroniques embarqués dans les couches les plus basses de la stratosphère.

- Merci pour votre attention