PROBLÈMES RADIOBIOLOGIQUES POSÉS PAR LES VOLS DES AVIONS SUPERSONIQUES ET LES EXPLORATIONS SPATIALES (*)

Roland-Paul DELAHAYE (**)

(Manuscrit reçu le 18 juin 1973)

RÉSUMÉ

Si les relations entre la dose et les effets commencent à être bien connus sur la terre, il n'en est pas de même pour les rayonnements reçus par les équipages de vols spatiaux, des vols orbitaux et des vols supersoniques à haute altitude. Il existe de nombreuses incertitudes au sujet des rayonnements cosmiques d'origine galactique ou solaire.

ABSTRACT

If the dose effect relationship begins to be well known on the earth, the situation is different as to radiations during spatial, orbital flights and high altitude supersonic flights.

It still exists a great number of uncertainties concerning the effects on man of galactic or solar cosmic radiations.

En 1955, la plupart des astrophysiciens et des techniciens de la recherche spatiale estiment que les risques radiobiologiques d'un séjour prolongé dans l'espace sont pratiquement nuls.

Dix ans après, des découvertes fondamentales démontrent que les rayonnements extraterrestres peuvent créer un danger pour un voyage spatial. De nombreux satellites américains (Pioneer) et russes (Spoutnik, Lunik, Cosmos) permettent de vérifier la réalité de l'hypothèse de J. VAN ALLEN : la terre est entourée de vastes zones de radiations. Au cours de certaines éruptions solaires, des distributions de doses très importantes apparaissent à des altitudes variables selon l'intensité du phénomène.

Chaque journée voit s'accumuler les données physiques. Les recherches biologiques à bord des satellites se multiplient. Le vol d'un homme à une altitude supérieure à 15 km nécessite une analyse des différents types de rayonnements

* Conférence présentée à la réunion scientifique « Espace et Radioprotection », organisée par la Société française de Radioprotection, le 11 janvier 1973 à Saclay (Site de l'Orme des Merisiers).

** Professeur du Service de Santé des Armées, Hôpital Bégin, 94160 Saint-Mandé.

extraterrestres et une étude des moyens utilisables pour diminuer l'irradiation du pilote de l'avion supersonique ou des membres du vaisseau spatial.

Cet exposé comprendra 4 parties :

— *Une description rapide des rayonnements* rencontrés dans l'espace nous permettra de définir les paramètres physiques.

— *Une étude radiobiologique* comprenant surtout les facteurs modifiant les réponses aux rayonnements (type de rayonnements, transfert linéique d'énergie et facteur de qualité, mode de distribution de l'équivalent de dose, étalement).

— *Une étude de médecine aéronautique* rappelant l'influence de certains facteurs du vol sur les radiolésions.

— *Les résultats observés* dans les vols supersoniques (tels que ceux de Concorde et des avions de combat) et les explorations spatiales actuelles.

* * *

I - ETUDE PHYSIQUE

Au niveau du sol tout être vivant est soumis à une irradiation naturelle (100 millirads par an) qui comprend trois composantes :

— Une composante tellurique provenant de la radioactivité de traces minérales contenues dans certaines roches ou sédiments.

— Une composante due à l'irradiation alpha, bêta, gamma d'éléments radioactifs naturels situés à l'intérieur du corps.

— Une troisième composante due aux rayonnements cosmiques.

Pour un avion supersonique décollant d'un aéroport ou pour un vaisseau spatial quittant l'aire de lancement, on constate que la première composante décroît rapidement pour devenir nulle, la deuxième demeure constante. La troisième devient la source prédominante d'exposition, c'est le rayonnement cosmique galactique. Dès que l'altitude augmente, le problème réel des dangers dus aux rayonnements extraterrestres est créé par des zones radioactives étrangères à l'environnement terrestre. Deux variétés différentes peuvent être individualisées :

— L'une strictement confinée aux régions frontières de la magnétosphère terrestre, non limitée dans le temps (les ceintures de radiations).

— L'autre limitée dans le temps, survenant occasionnellement et durant habituellement 1 à 2 jours, capable de créer des niveaux très élevés de rayonnements dans l'espace interplanétaire (éruptions solaires).

Il faut donc étudier successivement le rayonnement cosmique galactique, les ceintures de radiations et les éruptions solaires. Les problèmes les plus difficiles sont dus à la présence des deux derniers.

A - LE RAYONNEMENT COSMIQUE GALACTIQUE (R.C.G.)

Composition :

Avant l'absorption par l'atmosphère terrestre, le R.C.G. est formé de noyaux accélérés à de très hautes énergies (10^{18} à 10^{20} eV). Sa composition la plus constante est de 85 % de protons, de 14 % d'hélium (rayons alpha) et de 1 % d'ions lourds allant jusqu'au fer ($Z = 26$). Occasionnellement, des ions lourds de Z supérieur à 26 peuvent être observés.

Au fur et à mesure de la pénétration dans l'atmosphère terrestre, ces noyaux qui constituent le rayonnement cosmique galactique primaire sont absorbés au cours de réactions nucléaires avec l'azote et l'oxygène de l'air.

A 20 000 mètres, il n'en reste que 37 %. Ces différentes réactions donnent naissance au rayonnement cosmique galactique secondaire.

Intensité :

Les rayonnements cosmiques sont répartis isotropiquement autour de la Terre et le débit d'équivalent de dose varie en fonction de l'altitude. Il est plus faible près de la Terre à cause de l'influence du champ magnétique terrestre. Pour un point de même latitude choisi dans les régions tempérées, les valeurs suivantes d'après Space Radiation Guide [35] sont réunies dans le tableau I.

TABLEAU I

Altitude		Débits d'équivalent de dose en millirems par heure
Pieds	Mètres	
30 000	9 120	0,3
40 000	12 160	0,45
50 000	15 200	0,6
60 000	18 240	0,9
70 000	21 280	1,2
80 000	24 320	1,3

Ce débit d'équivalent de dose mesuré par de nombreux satellites américains et russes atteint 10 millirems par heure à 200 km. La sonde spatiale U.S. Pioneer indique à une distance de 1 000 km de la Terre qu'il existe un flux intégral de 2,5 particules par cm^2 et par seconde et un débit d'équivalent de dose, sous un blindage de 1 g par cm^2 d'un matériau atomique de bas Z de 2 à 3 millirems/h. Pour les astrophysiciens américains, il apparaît raisonnable de penser que l'irradiation due aux rayonnements cosmiques près de Vénus ou de Mars sera comprise entre 20 et 50 millirems par jour.

Le R.C.G. présente des variations de débit d'équivalent de dose en fonction de la latitude. Près des régions polaires, les valeurs mesurées sont plus élevées

qu'au niveau de l'équateur. Elles varient dans un rapport de 1 à 2 ou 3 selon l'activité solaire. En effet, du fait de la présence de champs magnétiques créés par l'activité solaire, les intensités de rayonnements sont plus faibles en période d'activité solaire maximale et plus élevées en période d'activité solaire minimale.

La N.A.S.A. admet que, pour les voyages interplanétaires à de très grandes distances de la Terre, l'intensité de dose variera entre 30 et 50 millirems par 24 heures pour le rayonnement cosmique galactique. Elle estime que pour les voyages de 2 à 3 ans, cette accumulation de doses ne poserait pas de problèmes. Il ne semble pas en être de même pour les voyages de durée supérieure (5 à 7 ans).

B - LES CEINTURES DE RADIATION [1], [12], [13], [24]

Ce sont des régions de l'espace se caractérisant par une densité importante de particules chargées (électrons, protons) temporairement attirées dans le champ magnétique terrestre. Avec J. VAN ALLEN, on distingue deux parties :

- Une zone interne annulaire.
- Une zone externe de forme torique.

1° - La zone interne de forme annulaire est stable dans le temps. Elle s'étend de 600 - 1 000 km à 10 000 km d'altitude pour des points dont la latitude varie de 40° N à 40° S. Elle comprend des protons et des électrons dus à la décomposition des neutrons cosmiques par le phénomène de la rétrodiffusion.

Pour des protons d'énergie supérieure à 40 MeV, il existe deux maximums :

- A 3 600 km : Flux de $2,4 \times 10^4$ protons/cm².s.
- A 7 000-8 000 km : Flux de 5×10^3 protons/cm².s.

Les calculs de J. VAN ALLEN d'une part, NOYES et BROWN [13] d'autre part, démontrent que le débit en rads par heure varie selon la protection (tableau II).

TABLEAU II

Intensité de dose en rads par heure	Ecran
35	Sans écran
12,5	1 mm acier et 2 cm polyéthylène
5	2,5 mm acier et 2 cm polyéthylène

Les électrons de basse énergie ne frappent pas directement le pilote. C'est par l'intermédiaire du rayonnement X de freinage que le cosmonaute sera atteint (1,2 à 2 rads par heure).

Tout séjour prolongé dans la zone interne de radiation, dans l'état actuel des connaissances, est pratiquement interdit.

2° - La zone externe s'étale entre 50° N et 50° S. Sa limite inférieure se situe environ à 12 000 km de la surface terrestre. Son centre est approximativement à 16 000 km. Sa limite externe, d'après les dernières données recueillies par satellites, varie selon les lieux de 60 000 à 70 000 km.

Dans cette zone, l'intensité du flux de particules n'est pas constante dans le temps. Elle varie en fonction de l'activité solaire. Il y a beaucoup d'électrons ($10^8/\text{cm}^2.\text{s}$ pour une énergie supérieure à 40 keV), peu de protons (d'énergie variant de 120 keV à 1 MeV). Le maximum d'intensité dans cette zone externe de la ceinture de radiations se situe environ à 15 000-20 000 km de la Terre. Les électrons, dont la plus grande partie est absorbée par un matériel de faible poids atomique, ont une faible capacité de pénétration.

La dose tissulaire moyenne due au rayonnement X de freinage est d'un rad par jour. Par contre, pour des activités extravéhiculaires, le débit de dose dans cette région peut varier de 15 à 40 rads par jour.

Les protons, bien que présents dans la zone externe, possèdent des énergies si faibles qu'ils ne sont plus décelés après absorption par un écran de 1 g/cm².

3° - L'anomalie du champ magnétique terrestre, dite de Captown, doit être connue. Les Russes (avec les Vostok) et les Américains (à partir de Gemini 4) notent qu'on observe à une altitude de près de 220 km, dans l'Atlantique Sud, des débits de dose sous 1 g/cm² de 100 millirads par heure.

Le temps de passage pour les vaisseaux spatiaux est de 15 minutes. Les protons interviennent pour 90 % dans la dose totale. Le temps total accumulé lors du passage dans l'anomalie de Captown représente 10 % de la durée totale de la mission. Cette anomalie est pour la N.A.S.A. une contre-indication aux missions de longue durée à basse altitude.

C - LE RAYONNEMENT COSMIQUE SOLAIRE

Le soleil peut entraîner des modifications qualitatives et quantitatives des ceintures de radiations et de l'espace interplanétaire. Certaines éruptions chromosphériques sont capables d'entraîner une élévation importante de la R.A. par l'émission de particules (protons, hélions, ions lourds).

La propagation de ces particules dans l'espace interplanétaire est incomplètement élucidée.

Pour le Space Radiation Study Panel [30], il existerait 2 variétés de protons, les uns de provenance directe de l'environnement solaire, les autres indirects.

Les particules qui se propagent directement viennent du Soleil. Cette opinion est confirmée par des observations montrant que les protons naissent d'une source au voisinage du Soleil. Le temps d'arrivée dans l'espace est bref [9], [24], [30], [35],

5 minutes pour des particules de plusieurs centaines de MeV.

20 minutes pour celles ayant une énergie inférieure à 100 MeV.

Après cette première heure, les radiations « directes » laissent la place aux protons « indirects ». Ces particules arrivent de toutes les directions. Le champ magnétique et la rotation du Soleil jouent certainement un rôle dans cette variation

de la propagation, selon un mécanisme actuellement inconnu. Le délai d'arrivée de ces particules varie de 36 à 48 heures.

Le tableau III d'après [30] donne une idée de la répartition de la dose à la surface (selon le degré de protection) et de la dose en profondeur.

TABLEAU III
(d'après [30])

Eruptions	Dose à la surface en rads				Dose en profondeur en rads				
	Protection g/cm ² I	2	5	10	1 cm	2 cm	4 cm	6 cm	10 cm
23 février 1956	280	100	89	48	73	64	51	42	30
23 mars 1958	148	54	10	2,1	6,4	4,5	2,5	1,55	0,66
18 juillet 1961	128	63	20,4	7,2	15	12	8,1	5,7	3,3

Un document de décembre 1972 (N.O.A.A. de BOULDER) donne les évaluations des doses qu'aurait reçues un équipage d'Apollo au cours de l'éruption 3 B du 7 août 1972. Pour 10 jours d'irradiation, les valeurs suivantes (tableau IV) sont données en faisant remarquer que les cosmonautes ne gardent pas pendant toute la mission leur vêtement spatial.

Ils ne séjournent pas dans le « Command Modul » pendant l'exploration lunaire et pendant la descente vers la Lune. Il s'agit donc de grossières estimations extrapolées par calcul, mais qui donnent une idée de la valeur des doses reçues.

TABLEAU IV

Doses reçues en rads (10 jours)	Vêtement spatial	Module lunaire	« Command Modul »
Peau	3 765	1 588	3 58
Profondeur	90	72	3 39

Certaines éruptions sont susceptibles, lors de missions spatiales prolongées d'entraîner des irradiations importantes pouvant créer une symptomatologie modifiant profondément la vigilance et le rendement psychomoteur du personnel. Ces éruptions solaires vers 15 000 mètres augmentent la radioactivité ambiante. Dans les vols des avions supersoniques comme dans les explorations spatiales de longue durée, le problème des éruptions solaires ne doit pas être éludé.

II - ETUDE RADIOBIOLOGIQUE [7], [13], [20], [30], [35]

Les effets biologiques (précoces et tardifs) des radiations ionisantes dépendent de nombreux facteurs :

- Le type de radiation (facteur de qualité et transfert linéique d'énergie).
- Le mode de distribution de la dose.
- L'intensité de dose ou débit.
- Le fractionnement ou protraction.

L'influence quantitative de ces différentes variables sur les réponses de l'homme aux radiations est peu connue et se base largement sur des extrapolations à partir d'expérimentations animales, le nombre d'irradiations humaines étant peu élevé.

1° - FACTEUR DE QUALITÉ (F.Q.)

Le F.Q. dépend du transfert linéique d'énergie. Les réponses précoces à de fortes doses délivrées à fort débit sont moins dépendantes du T.L.E. (exprimé en keV/ μ) que les réponses tardives à faible débit.

Le « Space Radiation Study Panel » [30] a retenu les valeurs suivantes des facteurs de qualité pour les expositions (à fortes doses) dues aux radiations extra-terrestres (tableau V).

TABLEAU V

(d'après [30])

Réactions et syndromes	Composantes	F.Q.
Réponses cutanées	T.L.E. bas (inférieur à 3 keV/ μ)	1
	T.L.E. élevé (supérieur à 3 keV/ μ)	3
Syndrome prodromique	Flux total	1
Réponses hématologiques	Flux total	1
Syndrome hématopoïétique mortel	Flux total	1
Syndrome gastro-intestinal	T.L.E. bas (inférieur à 3 keV/ μ)	1
	T.L.E. élevé (supérieur à 3 keV/ μ)	3
Atrophie de l'épithélium germinatif	T.L.E. bas (inférieur à 3 keV/ μ)	1
	T.L.E. élevé (supérieur à 3 keV/ μ)	3

Les principales composantes des rayonnements extra-terrestres doivent être discutées :

a) *Protons et Héliions.*

Le F.Q. des protons spatiaux et des rayons alpha varie de 1 à 3 pour les réponses précoces et tardives des organes critiques et des tissus voisins du plan cutané. Le F.Q. est voisin de 1 pour les réponses générales précoces et tardives des organes et des tissus situés profondément : léthalité précoce, dépression de la moelle osseuse, séquelles gastro-intestinales, diminution de la longévité, leucémogénèse.

Pour les opérations extra-véhiculaires, le « Space Radiation Study Panel » estime que les valeurs de F.Q. pour les réponses tardives des plans superficiels peut atteindre 5 à 6.

b) *Electrons.*

Le F.Q. des électrons (d'énergie inférieure à 0,03 MeV) peut être assimilé à l'unité, mais ces électrons peuvent être la cause de radiations secondaires (Rayonnement X de freinage) dont le niveau est plus élevé que l'irradiation primaire.

c) *Ions lourds* [2], [3], [8], [30], [31], [35].

Les ions lourds agissant aux environs de 30 000 mètres d'altitude possèdent une énergie considérable [3]. Le T.L.E. correspond à une valeur d'ionisation spécifique exprimé en paires d'ions par micron de tissu irradié :

- 35 000 pour les ions lourds des groupes C, N, O.
- 100 000 pour les ions lourds du groupe Fe.

Les ions lourds, bien que peu nombreux par rapport aux protons et aux rayons alpha composantes principales du R.C.G. primaire, contribuent pour 40 à 50 % dans la dose absorbée par la matière [2], [3]. Pour H. SCHÄFFER, un ion lourd peut délivrer dans une seule cellule des doses de l'ordre de 10 000 à 20 000 rads. La plupart des radiobiologistes estiment actuellement que la notion de F.Q. pour les ions lourds est dépassée. En effet, pour des ionisations spécifiques égales à 5 000 paires d'ions par micron de tissu irradié, le F.Q. est de 20.

SCHÄFFER estime que l'on peut extrapoler jusqu'à 10 000 paires d'ions par micron où le F.Q. serait de 26,5.

NOLD et Coll. [13], CURTIS [8] pensent que pour les irradiations à T.L.E. élevé et à faible intensité de dose il faut utiliser un nouveau concept. Le « *fractional cell lethality* » (F.C.L.) ou mort cellulaire fractionnée est une quantité que l'on peut calculer. Elle dépend du spectre d'énergie de la particule au niveau de la cellule et de la probabilité de créer une inactivation en fonction du T.L.E. CURTIS et ses collaborateurs ont effectué un calcul pour illustrer le concept de la F.C.L. Un astronaute dans l'espace n'ayant qu'une protection faible de quelques

g/cm², exposé à plusieurs éruptions solaires, aurait pu avoir 1 à 7 % de ses cellules détruites par l'exposition à ces radiations.

Pour les auteurs américains, ce concept de la F.C.L. semble intéressant pour évaluer les dommages causés aux organes dont les cellules sont incapables de se régénérer (système nerveux par exemple). Mais, pour les cellules se multipliant rapidement, il faudra tenir compte du taux de régénération. Il se produit environ 2 impacts de désintégration par cm³ de tissu et par jour à une altitude de 23 000 m, ces faits étant indépendants du cycle solaire. Si l'on admet qu'une cellule moyenne possède un diamètre de 10 microns et que la zone d'ionisation, le long de la trajectoire de la particule de désintégration, a un diamètre de 10 microns et une longueur de 1 500 microns, une simple rencontre avec une telle radiation peut détruire $1,5 \times 10^7$ cellules exposées quotidiennement [8]. En l'absence de régénération biologique, deux rencontres par cm³ et par jour détruiraient 0,1 pour 100 des cellules du corps humain en un an. Mais le taux de restauration est plus élevé que celui de destruction.

Le concept de F.C.L. (CURTIS) doit s'appuyer sur un grand nombre d'expériences biologiques comprenant de nombreuses espèces. La plupart des chercheurs et des cliniciens de la N.A.S.A. considèrent que le problème posé par l'existence des ions lourds du point de vue de la radiobiologie fondamentale est très intéressant.

Cependant, il ne figure pas à la première place des préoccupations et le Soleil qui peut fournir des irradiations très importantes est plus inquiétant. Les ions lourds, dans l'état actuel des connaissances, ne semblent pas capables d'entraîner une symptomatologie clinique perturbant profondément la poursuite de la mission.

Les expériences biologiques avec les ions lourds devront être poursuivies pendant de nombreuses années pour permettre de formuler des opinions reposant sur des faits scientifiques, dans la mesure du possible, extrapolables à l'homme.

d) *Rayonnements secondaires.*

Les rayonnements secondaires produits par les interactions nucléaires avec les matériaux de protection comme les tissus vivants constituent une source importante de rayonnements. Pour ces raisons, la contribution du rayonnement secondaire est bien plus grande pour les missions de longue durée que pour celles de courte durée à cause de la plus grande masse du vaisseau spatial. Cette dernière peut être augmentée par une protection supplémentaire contre le rayonnement primaire.

Les principales sources de rayonnement secondaire sont les mésons, les neutrons d'évaporation, les neutrons de recul, les étoiles de désintégration, quelques électrons et des radiations électromagnétiques (rayonnement X de freinage).

Le rayonnement de freinage est particulièrement important pour les activités extra-véhiculaires et dans le passage de la ceinture artificielle de rayonnements (due à des explosions nucléaires à haute altitude).

La qualité, la nature, le flux et la distribution de ces radiations secondaires dépendent de la caractéristique du faisceau primitif, du matériel et de la géométrie de la protection du vaisseau spatial.

2° - DISTRIBUTION DE LA DOSE

Les radiations extra-terrestres *ne créent pas une distribution uniforme de la dose intégrale*. Cela veut dire qu'un cosmonaute est irradié dans la totalité de son organisme avec des radiations se répartissant de façon non homogène.

La distribution n'est pas uniforme à cause de l'intégrité de certaines zones situées en profondeur ou du respect de certaines parties du corps. La dose en profondeur décroît et dépend des caractéristiques énergétiques des radiations.

Cette hétérogénéité de la distribution a deux facteurs principaux :

— *La protection du vaisseau spatial* qui varie de 1,75 g/cm² à 212 g/cm² dans le vaisseau Apollo.

— *La répartition non homogène des tissus dans l'organisme.*

Cette hétérogénéité entraîne une variabilité de la réponse de l'organisme. Des expérimentations ont démontré que l'exposition non uniforme est moins efficace que l'exposition uniforme pour créer des lésions précoces ou tardives telles que la mortalité précoce, une dépression de la moelle épinière, une réduction de la longévité, des radiocancers.

3° - FRACTIONNEMENT

Dans l'espace, il y a un fond constant dû au rayonnement cosmique galactique (10 à 50 millirads par jour) et une surexposition temporaire, modérée ou intense provenant du Soleil (éruptions importantes) ou des ceintures de radiation.

Les incidents d'irradiation supplémentaire peuvent durer quelques minutes pendant lesquelles l'intensité de dose et le F.Q. varient. Des mesures d'intensité de dose à la profondeur de la moelle osseuse durant ces périodes montrent qu'il existe une variation de 1 à 10-20 rads par heure.

De nombreuses réponses (réaction prodromique, mortalité précoce, érythème, déplétion hématopoïétique) dépendent du débit.

La dépendance du débit de dose est plus prononcée cependant pour les expositions à T.L.E. peu élevé que pour celles à T.L.E. élevé, pour les réponses précoces que pour les réponses tardives.

III - LES FACTEURS DU VOL ET LES RADIOLÉSIONS

Cette étude de médecine aéronautique pose le problème de la combinaison des facteurs radiobiologiques et de l'environnement spatial.

On distingue généralement 3 catégories de facteurs d'agression :

— 1° ceux dus à *la dynamique* du vol spatial y compris le décollage et la rentrée dans l'atmosphère terrestre;

— 2° ceux créés par les conditions de vie à l'intérieur de la cabine;

— 3° ceux de *l'environnement* externe (les radiations extra-terrestres étant l'élément le plus important).

Les facteurs du vol sont les accélérations et les vibrations, l'apesanteur (y compris les désordres vestibulaires).

Les facteurs internes dépendent de la vie en cabine — (température ambiante, pression partielle d'oxygène, bruit, facteurs émotionnels, infections latentes et subaiguës). Il faut prévoir les situations urgentes, les atteintes traumatiques, les modifications de température et de pression, les infections. Ces différents facteurs d'agression peuvent se combiner de trois façons :

- *additive* quand la somme des effets est égale aux effets combinés,
- *synergétique* quand les effets combinés sont plus grands que la somme des effets,
- *antagoniste* quand la somme est inférieure à chacun des effets (effet de protection).

Malheureusement, dans l'état actuel des connaissances et malgré de très nombreuses recherches, il est impossible de chiffrer l'effet quand différents facteurs sont combinés. Aucun fait humain sur les interactions des radiations avec les facteurs du vol n'est valable. Les études sur l'animal sont trop imprécises. La plupart concernent des systèmes cellulaires à but génétique.

Aucune réponse n'est extrapolable à l'homme, mais il n'est pas impossible que l'action des radiations soit plus facile à comprendre et à interpréter au niveau cellulaire. Pour ne pas alourdir mon exposé et l'allonger au-delà des limites permises, je me contenterai de donner un résumé des différentes combinaisons des facteurs et des types d'interaction [6], [7], [21], [22], [30], [33], [40], [41].

TABLEAU VI

	Combinaison
Radiations - Bruit	Neutre à synergétique
Radiations - Hypothermie	Neutre à synergétique
Radiations - Hyperthermie	Neutre à synergétique
Radiations - Hypoxie	Synergétique (antagoniste pour de brèves périodes d'exposition)
Radiations - Hyperoxie	Neutre à additive
Radiations - Facteurs physiologiques du vol	Synergétique
Radiations - Facteurs émotionnels	Indéterminée
Radiations - Vibrations	Neutre à additive à synergétique
Radiations - Accélération	Antagoniste à neutre à synergétique
Radiations - Apesanteur	Additive à synergétique
Radiations - Situations urgentes	Neutre à synergétique

IV - RÉSULTATS OBSERVÉS

Il faut distinguer les vols des avions supersoniques au-dessous de 20 km, et les explorations spatiales.

1° - VOLS SUPERSONIQUES (entre 15 et 20 km)

Depuis de nombreuses années, des avions militaires (chasse, bombardement, transport) volent à des altitudes comprises entre 15 et 20 km. Bientôt des transports supersoniques commerciaux (Concorde, T.S.S. russe et peut-être américains) vont parcourir ces mêmes altitudes. Dès 1963, la Sous-Commission Médicale du Transport Supersonique (Secrétariat à L'Aviation Civile - Ministère des Transports) s'est préoccupé des problèmes posés par les radiations extra-terrestres aux altitudes du Concorde [11]. Elle a dans un premier temps entrepris un bilan des paramètres physiques par des mesures prises à bord d'avions subsoniques, d'avions de combat et de ballons. Conjointement avec les britanniques, dans le cadre du groupe aéromédical Concorde, des colloques ont été organisés avec discussion des protocoles d'expérimentation [10], [14], [15]. Des réunions organisées par les Ministères des Affaires Etrangères ont eu lieu à Londres, Paris et Washington (Franco-Anglo-U.S. T.S.S. meetings). Ces réunions FAUSST de plus, permettaient des échanges scientifiques et d'uniformiser les conduites opérationnelles [38].

Dès 1969, des programmes de mesures à bord des prototypes sont établis et les résultats régulièrement publiés [17], [18], [19].

Plusieurs laboratoires participent actuellement à cette collecte des données physiques à l'altitude du Concorde.

— Le laboratoire de Physique corpusculaire du Centre d'Etudes nucléaires de Strasbourg (Responsable : R. KAISER).

— Le service technique et de protection du Centre d'Etudes Nucléaires de Fontenay-aux-Roses (Responsables : H. FRANÇOIS et G. PORTAL).

— Le service mixte de sécurité radiologique (Responsable : Colonel DURNEY).

— L'observatoire de Meudon (P. SIMON).

Les différentes mesures montrent que les intensités de dose varient selon les latitudes de 0,4 à 1,7 millirems par heure de vol. Les ions lourds n'ont pas été mis en évidence sur les émulsions nucléaires placées à bord des prototypes.

Le problème des éruptions solaires, lorsqu'on envisage l'envoi régulier d'avions à des altitudes supérieures à 15 km, doit être étudié avec soin. M. l'Abbé SIMON directeur à l'échelon international des Ursigrammes (Etude de l'activité solaire) nous a dit tout à l'heure que toutes les éruptions solaires ne font pas ressentir leurs effets à l'altitude de 15 km. A 18 000 mètres (100 g/cm²), on estime que lors du dernier cycle solaire 24 éruptions entraînent un débit de dose supérieur à 1 millirem par heure, 9 événements par contre donnent un débit supérieur à 50 millirems par heure.

Les autorités franco-britanniques chargées de la certification du Concorde ont décidé la mise à bord d'un détecteur d'alarme dont les valeurs sont provisoirement fixées (pour les prototypes). Ces valeurs sont comprises entre 10 et 50 millirems par heure. Il est vraisemblable que l'on s'achemine vers 10-20 millirems par heure.

A partir d'un certain débit de dose, les autorités décideront du changement d'altitude, par exemple à 20 millirems par heure.

Pour les vols prolongés au-dessus de 20 km, il est nécessaire de recueillir de nombreuses données physiques surtout concernant la répartition des radiations aux altitudes de croisière au cours des éruptions. Il est certain que le développement des explorations spatiales va faciliter l'inventaire physique de ces régions de l'espace.

2° - VOLS SPATIAUX

Plusieurs profils de mission doivent être différenciés.

a) *Orbite terrestre basse non polaire* (360 km d'altitude).

Les estimations de doses les plus récentes (PICKERING) sont les suivantes (tableau VII).

TABLEAU VII

	Dose estimée
Rayonnement cosmique galactique	0,01 rad/j
Anomalie Atlantique Sud	0,20 rad/j
100 millirads par heure	
25 millirads par orbite	

La N.A.S.A. estime que les missions de plus de 60 jours sur ces orbites sont possibles en maintenant une surveillance étroite de l'activité solaire et en pouvant interrompre la mission en cas d'éruptions importantes. Ce type de mission se caractérise par des débits de dose variables, un manque d'uniformité de la distribution et la faible énergie des particules qui ont surtout un effet sur les couches les plus superficielles.

Pour les missions prolongées (plus d'un an) sur des orbites circulaires plus élevées, on doit craindre des effets cutanés [30], [34].

Les doses reçues par les membres des explorations spatiales effectuées en dessous de la ceinture de radiation sont très faibles (tableaux VIII et IX).

TABLEAU VIII

VOLS SOVIÉTIQUES MONOPLACES

Vaisseau	Date	Durée	Dose (mrad)	Pilotes
Vostok I	12-4-61	1 h 28	1	GAGARINE
Vostok II	6-8-61	25 h	13	TITOV
Vostok III	11-8-62	94 h	64	NICOLAÏEV
Vostok IV	12-8-62	70 h 40	48	POPOVITCH
Vostok V	14-6-63	119 h 54	75	BYKOVSKIY
Vostok VI	16-6-63	70 h 20	48	V. TERECHKOVA

TABLEAU IX

VOLS AMÉRICAINS MONOPLACES

Vaisseau	Date	Durée	Dose (mrad)	Pilotes
Mercury (Freedom 7)	20- 2-62	4 h 56	Inférieur à 30	GLENN
Mercury (Aurore 7)	24- 5-62	4 h 56	Inférieur à 30	CARPENTER
Mercury (Sigma 7)	3-10-62	9 h 13	Inférieur à 30	W. SCHIRRA
Mercury (Faith 7)	15- 5-63	34 h 20	28	G. COOPER

Il s'agit le plus souvent d'estimations moyennes et les doses données correspondent à celles enregistrées par des films placés sur les combinaisons. Les doses reflètent essentiellement l'irradiation provenant des électrons ou des rayons gamma.

Les explorations spatiales multiplaces entreprises ultérieurement ont permis de recueillir des données numériques figurant dans les tableaux X et XI.

TABLEAU X

VAISSEAUX SPATIAUX MULTIPLACES RUSSES

Vaisseau	Date	Durée	Dose (mrad)	Pilotes
Voskhod I	12-10-64	24 h 17	25 29 32	V.H. KOMAROV B.E. EGOROV K.P. FEOKTISTOV
Voskhod II	18- 3-65	26 h	75 65	P. BELAIEV A. LEONOV

TABLEAU XI
VOLS MULTIPLACES U.S.A.

Vaisseau	Date	Durée	Dose (mrad)	Pilotes
Gemini III	23- 3-65	3 h 56	Inférieur à 30	GRISOM YOUNG
Gemini IV	3- 6-65	97 h 54	45 69	MAC DIVITT WHITE
Gemini V	21- 8-65	190 h 54	195 186	COOPER CONRAD
Gemini VI	15-12-65	25 h 52	Inférieur à 30	SCHIRRA STAFFORD
Gemini VII	4-12-65	330 h 35	178 215	LOVELL BORMANN
Gemini VIII	16- 3-66	8 h 18	Inférieur à 30	ARMSTRONG SCOTT
Gemini IX	3- 6-66	72 h 30	≈ 30	STAFFORD CERMAN
Gemini X	18- 7-66	70 h 47	≈ 30	YOUNG COLLINS

b) *Orbites elliptiques.*

Les orbites seront employées en cas de sauvetage. Les estimations de doses figurent dans le tableau XII.

TABLEAU XII
ORBITE ELLIPTIQUE

Rayonnement cosmique galactique	0,010 rad/j
Anomalie Sud Atlantique	0,3 à 0,6 rad/j
Ceinture extérieure	8 - 9 rads par jour

Pour une orbite elliptique haute, la répartition est légèrement différente (tableau XIII).

TABLEAU XIII

Rayonnement cosmique galactique	0,010 rad/j
Anomalie Sud Atlantique	0,6 rad/j
Ceinture externe	7 rads par jour
Ceinture interne	2 rads par jour

Ce type de vol ne permet pas des missions prolongées en dehors de toute éruption solaire. La N.A.S.A. estime qu'il est possible d'envisager des missions de 60 jours en utilisant des moyens de protection (tablier du type de celui utilisé par les radiologues, sous-vêtements spéciaux à circulation d'eau).

c) *Orbite synchrone* (le vaisseau tourne autour de la Terre en 24 heures).

TABLEAU XIV

R.C.G.	0,02 rad/j
Ceinture de VAN ALLEN (Interne)	
perforée avant que l'orbite synchrone	1 - 2 rads par jour
soit établie	2 rads par jour
Ceinture de VAN ALLEN	

Le rayonnement X de freinage est important. Les particules alpha de 5 à 85 MeV contribuent de façon importante à la dose de la peau. La N.A.S.A. estime qu'avec les moyens de protection énoncés plus haut, les missions prolongées sont possibles en dehors de toute activité solaire importante.

d) *Mission lunaire de 8 jours.*

TABLEAU XV

ESTIMATIONS DE DOSE D'UN VOYAGE LUNAIRE (d'après PICKERING)

R.C.G.	0,02 rad/j
Transfert à travers la ceinture	1 - 2 rads par jour

En réalité, comme BERRY [5] le fait remarquer, ces estimations s'avèrent supérieures aux doses reçues par les cosmonautes au cours des différentes missions Apollo.

TABLEAU XVI

(d'après 5)

	Millirads
Apollo 7	160
8	160
9	200
10	480
11	180
12	580
13	240
14	1 140
15	300
16	530

Les valeurs données sont celles figurant dans le rapport présenté au XX^e Congrès International de Médecine Aéronautique. Chaque membre de l'équipage porte des dosimètres au fluorure de lithium 6 et 7, des films photographiques, des émulsions nucléaires. Le tableau XVI indique des valeurs obtenues en faisant la moyenne des différents dosimètres.

Les doses reçues au cours de la mission Apollo 14 sont plus élevées parce que les doses dues au rayonnement cosmique galactique en période de soleil minimum sont toujours plus importantes qu'en période d'activité maximale. Les différentes recherches radiobiologiques effectuées n'ont pas démontré la présence de facteurs aggravants dus au vol. En particulier, les aberrations chromosomiques ne semblent pas en rapport avec la durée de la mission [15].

CONCLUSIONS :

Les radiations extra-terrestres ne sont qu'un des risques du vol spatial. Il existe un grand nombre d'incertitudes dans les prédictions des réponses de l'organisme à l'irradiation parce qu'on connaît mal les influences des facteurs spécifiques du vol. Si les relations dose-réponse clinique sur Terre commencent à être bien connues, l'estimation du risque dû aux radiations extra-terrestres ne peut être formulée de façon définitive sur les faits observés dans les explorations spatiales actuelles. Le Soleil apparaît au cours de certaines éruptions comme le danger le plus grand. En effet, des doses importantes peuvent être distribuées en un court laps de temps. L'interdépendance entre le débit de dose et l'apparition du syndrome prodromique (nausées, vomissements) est peu connue. Il est possible, mais cela n'est pas complètement prouvé, que l'intensité de dose durant la majorité de certains événements ne semble pas capable de créer des signes cliniques importants. Il faut plutôt craindre une diminution des performances, du rendement, qui perturberait profondément la poursuite de l'exploration spatiale.

Ainsi les responsables de la N.A.S.A. déterminent actuellement les risques globaux de la mission. Pour chaque vol le coût présumé en radiations est évalué en tenant compte des éléments recueillis au cours des différentes explorations spatiales (en particulier, des satellites scientifiques non habités) et par l'observation continue du Soleil et de son activité.

Travail de l'Ecole de Spécialisation du Service de Santé pour l'Armée de l'Air (Enseignement de la Biophysique).

BIBLIOGRAPHIE LIMITÉE

- [1] VAN ALLEN J.A. Corpuscular radiation in Space. *Radiation Research*, 1961, 14, 540-550.
- [2] ATLAN H. Effets biologiques des particules lourdes. *Rev. Med. aéro.*, 1966, 5 (n° 18), 45-57.
- [3] ATLAN H., DELTOUR G., PFISTER A., KAISER R. Problèmes actuels posés par les radiations cosmiques au cours des vols à haute altitude (expérimentations sur les effets biologiques des ions lourds). *Bull. Doc. Med. Aéro.*, 1966, 14, 25-28.
- [4] BERRY C.A. Summary of medical experience in the Apollo 7 through 11 manned space flights. *Aerospace Med.*, 1970, 41, 500-519.
- [5] BERRY C.A. O.S. Views of Human Problems to be addressed for long Duration Manned space flights. Communication au XX^e Congrès de Médecine Aéronautique et Spatiale Nice. Sept. 72. *Revue de Médecine Aéronautique*, 1973 (à paraître).
- [6] VON BORSTEL R.C., SMITH R.H., WHITING A.R., BROSCHE D.S. Biological responses of Halorobrocon to Spaceflight. *Life Sciences and Space Research*, VIII, 1970, p. 6-11.
- [7] BUSBY D.E. *Space clinical Medicine. A prospective Look at Medical Problems form Hazards of Space operations*. 1 vol., 1968. D. Reidel Publishing Company.
- [8] CURTIS S.B., DYE D.E., SHELTON W.R. Fractional Cell lethality Approach To Space Radiation in Hazards in *Second Symposium on Protection against Radiation in Space*. Gatlinburg 1964, N.A.S.A., 1965, p. 213-223.
- [9] DALRYMPLE G.V., LINDSAY I.R. Protons and Space travel. An introduction. *Radiat.-Research*, 1966, 28, 365-371.
- [10] DAVISON P.J.N. *Radiation doses rates et supersonic transport altitudes*. M.O.A. grand P.D. 34 017. Farnborough. Royal Aircraft Establishment 1967.
- [11] DELAHAYE R.P., TABUSSE E. Les vols prolongés entre 20 000 et 30 000 mètres d'altitude sont-ils dangereux au point de vue radiobiologique? (Soc. Franç. Physio. Méd. Aéro. cosmon. Séance du 15 Novembre 1963). *Revue de Méd. Aéronaut.*, 1964, 3 (n° 10), 581-584.
- [12] DELAHAYE R.P., TABUSSE E. Explorations spatiales et radiations extra-terrestres. *Forces Aériennes Franc.* : 1964, n° 203, 588-604; n° 205, 109-136; n° 206, 303-314; n° 207, 481-492.
- [13] DELAHAYE R.P. Rayonnements extra-terrestres et explorations spatiales. I. Problèmes physiques. *Rev. Corps de Santé*, 1966, 7 (n° 5), 689-705. II. Problèmes radiobiologiques. *Rev. Corps de Santé*, 1967, 8 (n° 4), 529-544.
- [14] DELAHAYE R.P. Problèmes médicaux posés par les vols commerciaux supersoniques. *Médecin de Réserve*. 1968, 64 (n° 4), 104-108.
- [15] DELAHAYE R.P., PFISTER A., DELTOUR G., KAISER R. Essai d'évaluation du risque radiobiologique des transports supersoniques. *Gaz. méd. France*, 1968, 75, 3761-3766.
- [16] DELAHAYE R.P., PFISTER A., DELTOUR G., KAISER R. Rayonnements extra-terrestres et transport supersonique. (Soc. Franç. Physio. Méd. aéro. Séance du 20 Février 1970). *Revue de Méd. Aéro. Spat.*, 1970, 9 (n° 34), 85-99.
- [17] DELAHAYE R.P., PFISTER A., KAISER R. Premiers résultats dosimétriques des rayonnements cosmiques à bord du prototype Concorde. *Revue de Méd. Aéro. Spat.*, 1971, 10 (n° 39), 119-121.
- [18] DELAHAYE R.P., PFISTER A., KAISER R. Problèmes radiobiologiques posés par les T.S.S. (exposé des premiers résultats de l'expérimentation entreprise à bord du prototype Concorde). XIX^e Congrès de Médecine Aéronautique et Spatiale. Tel Aviv 24-29 Octobre 1971. *Revue, Corps de Santé* 1972, 13 (n° 4), 411-420 et *Aerospace Medicine* (en anglais), 1972, 43, 782-784.
- [19] DELAHAYE R.P., KAISER R., FRANÇOIS A., PORTAL H., DURNÉY. Rayonnements cosmiques et recherches entreprises à bord du prototype 001 Concorde. Résultats de la campagne 1971-1972. (Soc. Franç. Physio. Méd. Aéro. Cosmon. Séance du 26 Mai 1972). *Rev. Méd. aéro. spat.*, 1972, 11 (n° 43), 143-150.
- [20] DYE D.L., WILKINSON M. Radiation Hazards in Space. *Science*, 1965, 147, 19-25.
- [21] GLEMBOSKY J.L., GROZDOVA T.J., PARFENOY G.P. Experiments with drosophila on board the space craft. Zond 5. *Life Sciences and Space Research*, VIII, 1970, p. 1-3.
- [22] GRIGORYEV Yu.G. Vestibular analyser as a critical organ in the Evaluation of Radiation Hazards during space flights. *Life Sciences and Space Research*, VII, 1969, 173-185.

- [23] GRIGORYEV Yu. G., KOUALEV E.E., LEBEDINSKIY A.V., MEFEDOV Yu. G., VYSOTSKIY V.G., RYJOV N.I., MARKELOV B.A., SMIRENNY L.N., DUDKIN V.E., DERBENEVA N.N. *Critères de protection contre les rayonnements au cours des vols cosmiques prolongés*. II^e symposium international sur les problèmes fondamentaux concernant les facteurs d'ambiance rencontrés par l'homme dans l'espace. Paris, Juin 1965, 25 p., 4 tabl.
- [24] HAFNER J.W. *Radiation and Shielding in Space*. 1 vol., 1967, Academic Press New York, Londres.
- [25] HAZEL J. Radiation Hazards and Manned Space flight. *Aerospace med.*, 1964, **35**, 436-439.
- [26] HUMPHREYS J.W. Protection of Astronauts against Ionizing radiations. *J.A.M.A.*, 1970, **211**, 1550-1551.
- [27] International Commission Radiation Protection : Aspects radiobiologiques du transport supersonique.
- [28] International Commission Radiation Protection : The R.B.E. for High LET Radiations with respect to Mutagenesis.
- [29] LANGHAM W.H., BROOKS P.M., GWRAHN D. Radiation Biology and Space environmental parameters in manned space craft design and operations. *Aerospace medicine*, 1965, **36**, 1-65.
- [30] LANGHAM W.H. *Radiobiological factors in Manned Space flight*, 1 vol. National Academy of Sciences National Research Council, 1967, 274 pages.
- [31] MIRO L., DELTOUR G., PFISTER A., KAISER R., GRANDPIERRE R. Current status of French Research on the biological effects of Heavy ions in Cosmic radiation as observed in High altitude Balloons. *Life Sciences and Space Research*, VIII, 1970, 39-44.
- [32] O'BRIEN K., MAC LANGHLIN J.E. Calculation of dose and Dose Equivalent Rates to Man in the Atmosphere from galactic cosmic rays. Health and Safety Laboratory U.S. *Atomic Energy commission*. Mai 1970.
- [33] PARIN V.V., GRIGORYEV Yu.G., KOUALEV E.E., RYZHOV N.I., DERBENEVA N.N., 'OLOV V.I., PETROVNIK M.G. Characteristics of Biological Effects of Cosmic radiation Podel Investigations. *Life Sciences and Space Research*, VII, 1969, 160-170.
- [34] PICKERING J.E. Radiobiological concepts for Manned space missions. *Aerospace medicine*, 1970, **41**, 159-165.
- [35] SAYLOR W.P., WINER D.E., EIWEN C.J., CARRIKER A.N. Space radiation guide. W.A.D.D.-A.M.R.L.T.D.R. 62 — 68 US Air force Aeromedical Research Laboratory Wright Patterson.
- [36] SCHAEFER H.J. Radiation monitoring on Project Mercury. Results and implications. *Aerospace Med.*, 1964, **35**, 829-833.
- [37] SCHAEFER H.J., SULLIVAN J.J. Radiation monitoring with nuclear emulsions on Mission Gemini IV and V. *Aerospace Med.*, 1967, **38**, 1-5.
- [38] SCHAEFER H.J. Public Health Aspects of galactic Radiation Exposure at Supersonic Transport Altitudes. *Aerospace Med.*, 1968, **39**, 1299-1303.
- [39] SCHAEFFER H.J., SULLIVAN J.J. Nuclear emulsion recordings of the Astronaut's radiation exposure on the first lunar landing mission Apollo XI. *Naval Aerospace Medical Research Laboratory*, Pensacola 1970, M.F. 12 524 010 500 - 1 B.
- [40] SCHAIRER L.A., SPARROW A.H., MARIMUTHU K.M. Radiobiological Studies of Plants Orbited in Biosatellite II. *Life Sciences and Space Research*, VIII, 1970, 19-24.
- [41] DE SERRES F.J. Effects of radiation during Space flights on micro organisms and plants on the biosatellite and Gemini IX missions. *Life Sciences and Space Research*, VII, 1969, 62-66.
- [42] SIMON P. Eruptions solaires et atmosphère terrestre. *Rev. Med. Aéro. Spat.*, 1972, **11** (n° 43), p. 141-142.
- [43] TABUSSE E. Contribution à l'étude des problèmes radiobiologiques posés par les rayonnements extraterrestres. *Thèse Méd. Paris*, 1964.