

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

**ÉTUDE DES INTERACTIONS DES BIOCHAMPS AVEC LES CHAMPS
ÉLECTROMAGNÉTIQUES TERRESTRES ET COSMIQUES DANS LES AVIONS**

MÉMOIRE PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA

MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR

Afifa Amriche

Aout 2024

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (M.S.A.)

Direction de recherche :

Prof. Adam W. Skorek, [Ph.D.](#), [M.Sc.Eng.\(FEANI\)](#), [FICI](#), [IEEE Fellow](#)

Prénom et nom	directeur de recherche
---------------	------------------------

Prénom et nom	codirecteur de recherche
---------------	--------------------------

Jury d'évaluation

Prof. Nassim Noura, UQTR (Nassim.Noura@uqtr.ca)

Prénom et nom	Fonction du membre de jury
---------------	----------------------------

Prof. Ahmed Lakhsassi, UQO, (Ahmed.Lakhsassi@uqo.ca)

Prénom et nom	Fonction du membre de jury
---------------	----------------------------

Prénom et nom	Fonction du membre de jury
---------------	----------------------------

Résumé

L'aviation moderne s'oriente aujourd'hui vers le concept de l'avion « plus électrique » où les commandes électriques vont progressivement se substituer aux commandes hydrauliques, pneumatiques, mécaniques. La tendance est aussi à l'avion « plus composite » c'est à dire « moins métallique » où certaines parties en alliages métalliques sont elles aussi remplacées par des parties en matériaux composites avancés. Par rapport aux matériaux classiques comme l'acier, l'aluminium ou les alliages métalliques qu'ils envisagent de concurrencer, ces nouveaux matériaux présentent certes des avantages: ils sont plus légers, plus résistants et présentent souvent une meilleure tenue à la fatigue. Ils présentent cependant quelques inconvénients aux plans : mécanique, thermique, électromagnétique. Sur ces trois plans un avion connaît diverses agressions notamment le rayonnement cosmique et la foudre qui frappe souvent les aéronefs en est une des plus dangereuses. [1]

Entre 1940 et 1950, les problématiques liées aux interférences électromagnétiques (IEM) et à la compatibilité électromagnétique (CEM) ont émergé en tant que sujets clés. Ces préoccupations ont gagné une importance significative dans le domaine militaire et ont connu un regain d'intérêt au début des années 60. Cette hausse d'importance découle de divers incidents, notamment des défaillances de systèmes de navigation attribuées aux interférences électromagnétiques.

Dans les années 80, la production massive des composants électroniques (cartes mères d'ordinateurs,...) a entraîné une augmentation notable des interférences entre les dispositifs

informatiques et les ondes radio. Cette tendance s'est maintenue dans les années 80, mettant en évidence l'impact croissant des problématiques électromagnétiques dans le paysage technologique.

En 1990, les études sur la compatibilité électromagnétique et les interférences électromagnétiques (CEM, IEM) ont élargi leur champ d'investigation en se concentrant sur la sensibilité des circuits électroniques aux ondes électromagnétiques naturelles. Ces ondes émanent de sources telles que (la foudre, les rayons cosmiques, ...) ou artificielle (les radars GSM,...), contribuant ainsi à ce que l'on appelle communément la pollution électromagnétique.[1]

De nombreuses recherches concernant l'impact des interférences électromagnétiques sur l'avion ont été faites.

Mais la première problématique que l'on rencontre est le désir constant de limiter ces perturbations, d'améliorer la qualité des communications avion- sol, sol- avion et avion- avion et d'assurer éventuellement la sécurité des passagers et l'équipage navigant car des effets sur leur santé, comme la radiocancérogénèse et certaines réactions tissulaires, pourraient être liés à l'exposition au rayonnement cosmique.

Dans cette étude nous avons pu démontrer les interactions des champs électromagnétiques d'une source artificielle sur les avions, Ainsi que les effets provenant d'une source naturelle sur un corps humain sur différentes altitudes.

Remerciement

C'est le moment de fermer ce chapitre de ma vie en remerciant ALLAH et les personnes qui m'ont accompagné et soutenu pendant la réalisation de ce travail.

« Celui qui n'ose escalader les montagnes restera à jamais dans les creux » Abu Al Kacem Al Chabbi, poète tunisien (1909-1934), 'la volonté de vivre'

J'aimerais remercier vivement mon directeur de recherche, Prof Adam W. Skorek, qui a bien voulu diriger ce travail, pour son appui tout au long de mon parcours, pour le temps qu'il a consacré à relire et commenter mon travail et qui n'a jamais cessé de me témoigner confiance et sympathie, trouvez ici l'expression de ma profonde gratitude.

J'exprime mes sincères remerciements à mes chers parents pour leur soutien psychique, physique et financier comme je tiens à remercier mon cher mari Issam, pour sa collaboration morale, qui m'a apporté le soutien et l'encouragement durant toutes ces années. Aussi pour les conseils qu'il m'a prodigué tout au long de ce travail. Sans oublier, ma meilleure amie Rania pour son soutien et son encouragement. Je ne pourrais clore ces remerciements sans une pensée très personnelle à toute ma famille, mes frères et sœurs pour leur contribution morale.

Enfin, Je dédie ce travail à mon cher fils Anas, qui m'a porté la joie et le courage pour réaliser mon projet.

À la mémoire de Mr George Al-Chalouhi.

Table des matières

Résumé.....	iii
Remerciement.....	v
Table des matières	vi
Liste des tableaux	ix
Liste des figures.....	x
Liste des symboles	xiii
Chapitre 1 - Introduction.....	1
Chapitre 2 - Généralités sur les avions	4
2.1 Introduction	4
2.2 Historique	4
2.3 Les composantes de base d'un aéronef.....	9
2.3.1 La cellule.....	9
2.3.2 Les emports	10
2.3.3 Le système propulsif.....	12
2.3.4 Les commandes de vol.....	13
2.3.5 Servitudes de bord	13
2.3.6 Systèmes de communications avioniques	14
2.4 Conclusion.....	15

Chapitre 3 - Sources de perturbations électro -magnétique dans les avions	18
3.1 Introduction	18
3.2 Les sources artificielles	18
3.2.1 Problème lié à la compatibilité électromagnétique.....	18
3.2.2 Problème lié à la communication inter-domaine.....	22
3.2.3 Diaphonie d'une antenne dans un avion.....	24
3.3 Source naturelle et bio-champs	26
3.3.1 Les rayons cosmiques	26
3.3.1.1 La découverte du rayonnement cosmique.....	27
3.3.2 La foudre.....	31
3.3.3 Le champ magnétique terrestre :	33
3.3.4 Rayonnement cosmique solaire :	33
3.4 Conclusion.....	35
Chapitre 4 - Modélisation et résultats	38
4.1 L'outil de simulation.....	38
4.2 Introduction à la première simulation	38
4.2.1 Détails du modèle de simulation	40
4.3 Introduction à la deuxième simulation.....	43
4.3.1 Radiations solaires	43

4.3.2	Rayonnements spatiaux	43
4.3.3	Champ terrestre	44
4.3.4	Charge statique	44
4.3.5	Effets de la foudre.....	44
4.3.6	Appareils mobiles et signaux de télécommunication	45
4.4	Effets généraux.....	45
4.4.1	Analyse des ondes électromagnétiques.....	45
4.4.2	Logiciel d'analyse	46
4.4.3	Géométrie.....	46
4.4.4	Discretisation.....	47
4.4.5	Configuration physique.....	48
4.4.6	Résultats.....	49
4.5	Conclusion.....	63
Chapitre 5 - Conclusion		67
Bibliographie		74

Liste des tableaux

Tableau 1 Comparaisons des mesures du taux d'équivalence de dose du rayonnement cosmique galactique (GCR) effectuées par les compteurs proportionnels à l'équivalent tissulaire cosmique galactique (GCR) sur plusieurs missions de la navette spatiale et de Mir avec les calculs du code HZETRN avec un modèle GCR (NCRP, 2006). Les calculs effectués avec un modèle GCR (NCRP, 2006).	72
---	----

Liste des figures

Figure 1-1 Diagramme de la méthodologie du travail	3
Figure 2-1 La mythologie Grec [6]–[8]	5
Figure 2-2 Les premiers vols motorisés [6]–[8]	6
Figure 2-3 Avion de chasse Japonais [6]–[8]	7
Figure 2-4 Les premiers avions à réaction [6]–[8]	8
Figure 2-5 Les premiers avions de ligne à réaction [6]–[8]	9
Figure 2-6 structure d'un avion [10]	10
Figure 2-7 Avion anti-incendie [11]	11
Figure 2-8 Avion militaire [12]	11
Figure 2-9 Système propulsif [14]	13
Figure 2-10 Système avionique [16]	15
Figure 3-1 Avion avec les antennes d'émission et de réception mises en évidence, la taille des antennes est exagérée	25
Figure 3-2 Les rayons cosmiques [26]	26
Figure 3-3 Victor Francis Hess se préparant à s'élever dans une montgolfière (Source : American Physical Society via Wikimedia Commons) [22]	28
Figure 3-4 La relation entre l'altitude et l'intensité du rayonnement cosmique [27]	30
Figure 3-5 Impact de la foudre sur les avions [28]	32
Figure 3-6 L'exposition de la terre au rayonnement cosmique (Image : L. Han/AIEA) [22]	35
Figure 4-1 Capture d'écran du premier modèle élaboré avec COMSOL de la trajectoire de dispersion des protons hautement chargés	41

Figure 4-2 Capture d'écran du premier modèle élaboré avec COMSOL pour montrer la profondeur de la pénétration des ions.....	42
Figure 4-3 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL d'une géométrie simplifiée et justifiée d'un corps humain dans un avion	47
Figure 4-4 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL d'une géométrie simplifiée et maillée d'un corps humain dans un avion	48
Figure 4-5 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la densité du flux magnétique à 10000ft d'altitude	49
Figure 4-6 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la densité du flux magnétique à 50000ft d'altitude	50
Figure 4-7 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL contours de la norme de densité de flux magnétique à 10000ft	51
Figure 4-8 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL des contours de la norme de densité de flux magnétique à 50000ft	52
Figure 4-9 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la norme de densité du flux magnétique à 10000ft.....	53
Figure 4-10 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la norme de densité du flux magnétique à 10000ft.....	54
Figure 4-11 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la norme de densité du flux magnétique à 50000ft.....	56
Figure 4-12 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la norme de densité du flux magnétique à 50000ft.....	57
Figure 4-13 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la densité de l'énergie électromagnétique à 10000ft	59
Figure 4-14 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la densité de l'énergie électromagnétique à 10000ft	60
Figure 4-15 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la densité de l'énergie électromagnétique à 50000ft	61
Figure 4-16 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la densité de l'énergie électromagnétique à 50000ft	62
Figure 4-17 Capture d'écran de modèle élaboré avec COMSOL de la norme du champ magnétique	64

Figure 4-18 Capture d'écran de modèle élaboré avec COMSOL de la densité
du flux magnétique..... 65

Liste des symboles

CEM: la compatibilité électromagnétique

CME: coronal mass ejection

CMOS: complementary metal oxide semi-conductor

COTS: commercial off-the-shelf

DME: distance measuring system

EM: électromagnétique

FAA: federal aviation agency

FADEC: full authority digital engine control

GSM: global system for mobile

GPS: global positioning system

GCR: galactic cosmic radiation

HF: high frequency

IEM: interférence électromagnétique

IATA: l'association du transport aérien international

MOSFET: metal oxide semi-conductor field effect transistor

OACI: l'organisation de l'aviation civile internationale

ONERA: office national des études et des recherches aérospatiales

PEM : perturbations électromagnétiques

SF: solar flares

SEP: solar energy of particules

TCAS : le système d'alerte de trafic et anticollision

TACAN : le système de navigation tactique

VOR: le système de navigation (very high frequency omni-range)

WR12: le radar météorologique

A: ampère

Ft: feet

Hz: hertz

Km: kilomètre

MEv: méga électrons-voltes

Msv: milisieverts

T: tesla

V: voltes

Chapitre 1 - Introduction

La recherche bibliographique préalable permet d'observer et de constater que les perturbations électromagnétiques deviennent de plus en plus gênantes pour un grand nombre d'activités humaines y compris aéronautique. On peut les classer par leurs origines comme les perturbations d'origine artificielle telle que celles dues aux radiocommunications, aux radars, aux équipements électriques et les perturbations d'origine naturelle telle que la foudre, les décharges électrostatiques, les champs électromagnétiques terrestres et cosmiques. Les champs électromagnétiques terrestres et cosmiques auxquels est soumis un aéronef lors d'un vol changent avec l'altitude. D'autre part, les équipages et les passagers sont les milieux affectés par les champs électromagnétiques provenant d'une source naturelle connus comme bio-champs. Ce projet vise les interactions des bio-champs avec les champs électromagnétiques et leurs effets sur un corps humain incluant l'attention particulière aux cabines des avions volants aux hautes altitudes.

1.2 Contexte et problématique

L'objectif de ce projet est l'étude basée sur la recherche bibliographique approfondie suivie par l'établissement d'un modèle numérique permettant à déterminer et à visualiser les champs électromagnétiques dans un modèle du corps humain soumis aux champs magnétiques et électriques dans les avions volant aux hautes altitudes.

La recherche bibliographique approfondie sur les bio-champs ainsi que les champs électromagnétiques terrestres et cosmiques sera suivie par la revue des outils informatiques appropriés pour la modélisation et simulation de ce genre de phénomènes électromagnétiques. Le choix d'un outil comme COMSOL sera justifié et le modèle numérique sera originalement construit. La validation du modèle se fera à partir des données bibliographiques pour les systèmes similaires. Les résultats des simulations et l'analyse paramétrique avec le modèle numérique originalement construit seront présentés et analysés. Les recommandations pratiques concluront ce projet.

1.3 Organisation du mémoire

L'organisation générale du présent travail est divisée en cinq chapitres.

Le premier chapitre présente l'état de l'art

Le deuxième chapitre est relatif aux généralités sur les avions. Il introduit l'historique de l'aviation et les principales composantes d'un aéronef nécessaires à la compréhension des chapitres suivants. L'électrification des aéronefs et le début de la problématique d'où les interférences électromagnétiques et le problème de la compatibilité est traité dans le chapitre suivant.

Le troisième chapitre décrit la problématique basée sur une comparaison des perturbations de source artificielle et naturelle, des exemples réels étaient donnés.

Dans le quatrième chapitre, deux simulations sont présentées sur l'effet des particules chargées provenant de l'espace, la première décrit ses effets sur les composantes électroniques d'un avion et la deuxième montre les conséquences de l'exposition des bio-champs sur un corps humain.

Le cinquième chapitre est une conclusion générale appuie les résultats finaux de cette étude et des perspectives.

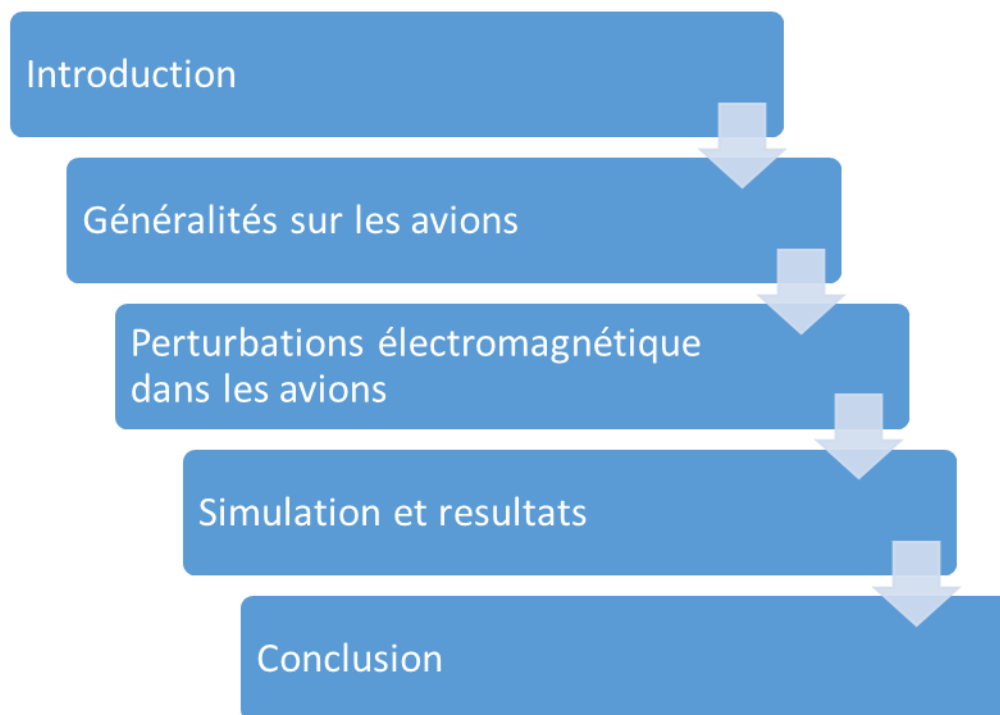


Figure 1-1 Diagramme de la méthodologie du travail

Chapitre 2 - Généralités sur les avions

2.1 Introduction

Un avion est un véhicule aérien motorisé qui est conçu pour voler dans l'atmosphère. Les avions ont des ailes fixes qui leur permettent de produire de la portance et de rester en l'air, ainsi qu'un système de propulsion qui leur permet de se déplacer à travers l'air. Les avions peuvent être utilisés pour une variété de fins, notamment pour le transport de passagers et de marchandises, pour les missions militaires, pour la recherche scientifique et pour les loisirs, comme les vols de plaisance et les sports aériens.

Un avion peut être fait sur une base d'alliage de métaux ou de matériaux composites ainsi que de nombreux circuits électriques. De ce fait il n'est donc pas à l'abri de perturbations électromagnétique celles-ci pouvant provenir de n'importe où soit de l'extérieur de l'appareil soit de l'intérieure. [2]

2.2 Historique

L'histoire de l'aviation constitue un parcours fascinant s'étalant sur des siècles et impliquant l'innovation et les contributions de nombreux individus. Voici une synthèse concise des principales étapes de l'histoire de l'aviation [3][4][5] :

L'époque des précurseurs : Des premiers orthoptères de l'antiquité jusqu'au début du XVIIIe siècle, l'être humain imagine – de manière plus ou moins réaliste – ce

que pourrait être une machine volante. Parmi ces pionniers, on trouve des figures légendaires comme Icare dans la mythologie grecque, mais aussi des penseurs et inventeurs plus tangibles comme Léonard de Vinci, qui dessina divers appareils volants. C'est une période dominée par des idées et des concepts, souvent impraticables, mais qui posent les bases de la réflexion sur le vol humain.



Figure 2-1 La mythologie Grec [6]–[8]

La fin du XVIIIe siècle et le XIXe siècle connaissent un tournant avec le développement de l'aérostation, notamment grâce aux frères Montgolfier et leur ballon à air chaud. Cette époque est marquée par de nombreuses tentatives de vol plané et les premières ascensions en ballon, ouvrant la voie à la conquête de l'air.

Les pionniers du plus lourd que l'air : Le début du XXe siècle est la période des premiers vols d'engins à moteur capable de décoller par leurs propres moyens. Cette phase est caractérisée par une série d'innovations et d'exploits, chaque vol

représentante une nouvelle "première" ou une tentative de record : un peu plus vite, un peu plus loin, un peu plus haut. Les aviateurs de cette époque sont souvent des concepteurs ou des aventuriers passionnés, comme les frères Wright, qui réalisent le premier vol contrôlé et motorisé en 1903, ou Alberto Santos-Dumont, qui effectue des vols publics en Europe. C'est une époque de découvertes rapides et d'enthousiasme pour l'aviation.



Figure 2-2 Les premiers vols motorisés [6]–[8]

La première guerre mondiale : La guerre de 1914-1918 accélère considérablement les progrès en aviation. Les avions, initialement utilisés pour la reconnaissance, deviennent rapidement des outils essentiels pour le combat et le bombardement. Les innovations technologiques sont nombreuses, et les pilotes militaires acquièrent une notoriété nouvelle, devenant des figures héroïques.



Figure 2-3 Avion de chasse Japonais [6]–[8]

L'entre-deux-guerres : Les années 1920 et 1930 voient l'aviation civile et commerciale prendre son essor. Les vols transatlantiques deviennent une réalité, et des lignes aériennes régulières sont établies. Cette période est également marquée par de nombreux exploits individuels, tels que les traversées en solo de Charles Lindbergh et Amelia Earhart. Les avions deviennent plus sûrs, plus rapides, et capables de transporter des passagers sur de longues distances.

La deuxième guerre mondiale : Le conflit de 1939-1945 provoque une nouvelle accélération des progrès en aéronautique. Les avions deviennent des armes de guerre cruciales, avec des avancées notables dans la vitesse, l'altitude et la capacité de charge. Les combats aériens, les bombardements stratégiques et le développement des avions à réaction marquent cette période.



Figure 2-4 Les premiers avions à réaction [6]–[8]

L'ère moderne et l'aviation commerciale : Après la Seconde Guerre mondiale, l'aviation commerciale connaît une croissance explosive. Les avions à réaction révolutionnent les voyages aériens, rendant le transport rapide et accessible à un large public. Les années suivantes voient l'émergence de géants de l'aviation comme Boeing et Airbus, la multiplication des vols intercontinentaux, et l'amélioration continue de la sécurité et de l'efficacité des aéronefs. La conquête de l'espace, débutée dans les années 1960, ouvre de nouvelles perspectives pour l'aviation et l'exploration humaine.



Figure 2-5 Les premiers avions de ligne à réaction [6]–[8]

Chacune de ces périodes a contribué de manière significative à faire de l'aviation ce qu'elle est aujourd'hui, une industrie mondiale essentielle à la connectivité et au progrès humain.

2.3 Les composantes de base d'un aéronef

2.3.1 La cellule

La cellule est constituée du fuselage, de la voilure, de l'empennage horizontal et vertical et du train d'atterrissage. On obtient alors un planeur. La forme de la cellule, en dehors des considérations aérodynamiques, est déterminée par la fonction de l'appareil : ce sont les emports [9].



Figure 2-6 structure d'un avion [10]

2.3.2 Les emports

Les emports sont les éléments que l'aéronef emporte et qui sont nécessaires à l'accomplissement de sa mission. La plupart des emports sont contenus dans le fuselage ; c'est le cas des avions de transport de passager ou de fret. Les emports des aéronefs militaires sont constitués par des armes qui sont souvent accrochées sous le fuselage ou sous la voilure. La cellule peut aussi être adaptée à certaines missions très particulières : le fuselage d'un avion de lutte contre l'incendie est constitué d'un réservoir d'eau.



Figure 2-7 Avion anti-incendie [11]



Figure 2-8 Avion militaire [12]

2.3.3 *Le système propulsif*

Le système propulsif est le dispositif permettant à l'aéronef d'acquérir sa vitesse et de vaincre la traînée aérodynamique. Parmi les différents systèmes, on distingue principalement :

- Les propulseurs directs, produisant une force dirigée vers l'avant, appelée poussée opposée à la traînée. Dans ces moteurs se trouve la famille des turbo réacteurs ainsi que des moteurs fusées.
- Les propulseurs indirects, pour lesquels la force, appelée traction est produite par un organe intermédiaire, l'hélice. Celui-ci transforme l'énergie mécanique d'un moteur thermique en énergie propulsive. Les principaux moteurs thermiques utilisés sont les moteurs à pistons et les turbomachines. [13]



Figure 2-9 Système propulsif [14]

2.3.4 Les commandes de vol

Les commandes de vol sont les éléments qui sont généralement situés sur la voilure et les empennages et qui permettent le pilotage de l'appareil.

2.3.5 Servitudes de bord

C'est l'ensemble des systèmes qui fournissent ou transmettent l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'aéronef ainsi que la vie à bord :

- Circuit carburant pour l'alimentation des moteurs
- Circuit électrique pour l'alimentation de l'avionique et des commandes de vol
- Circuit hydraulique pour le fonctionnement des commandes de vol et du train d'atterrissage
- Circuit d'air conditionné pour la pressurisation du fuselage et le confort des passagers

2.3.6 Systèmes de communications avioniques

Le système avionique est défini comme un ensemble de logiciels et de ressources électroniques installés sur les aéronefs. Apparue au début des années 1970, le terme "avionique" combine les termes "aviation" et "électronique". Initialement développés par l'industrie aéronautique militaire, les systèmes avioniques comprennent des capteurs, des ordinateurs, des actionneurs et des unités d'alimentation électrique qui effectuent diverses tâches afin d'assurer le bon fonctionnement de l'aéronef.

Avant l'avènement de l'avionique, chaque appareil à bord d'un avion fonctionnait avec son propre système matériel et logiciel, ce qui entraînait d'importantes contraintes en temps réel et une inter connectivité limitée entre les différents systèmes [15][5].

2.3.6.1 Exemple de systèmes avioniques

Un système avionique se compose généralement de dispositifs de communication, de navigation, de contrôle et de gestion. Les systèmes avioniques comprennent:

- le système d'alerte de trafic et anticollision TCAS
- le système de navigation tactique TACAN
- le système de mesure de distance DME
- le système de navigation VOR
- le système de navigation par satellite GPS
- le radar météorologique WR12
- In-Flight Entertainment
- les systèmes de contrôle "Fly by Wire" et FADEC13.

Les bandes de fréquences opérationnelles utilisées par les systèmes avioniques couvrent une partie importante du spectre des fréquences radio, allant de quelques kHz à quelques GHz.

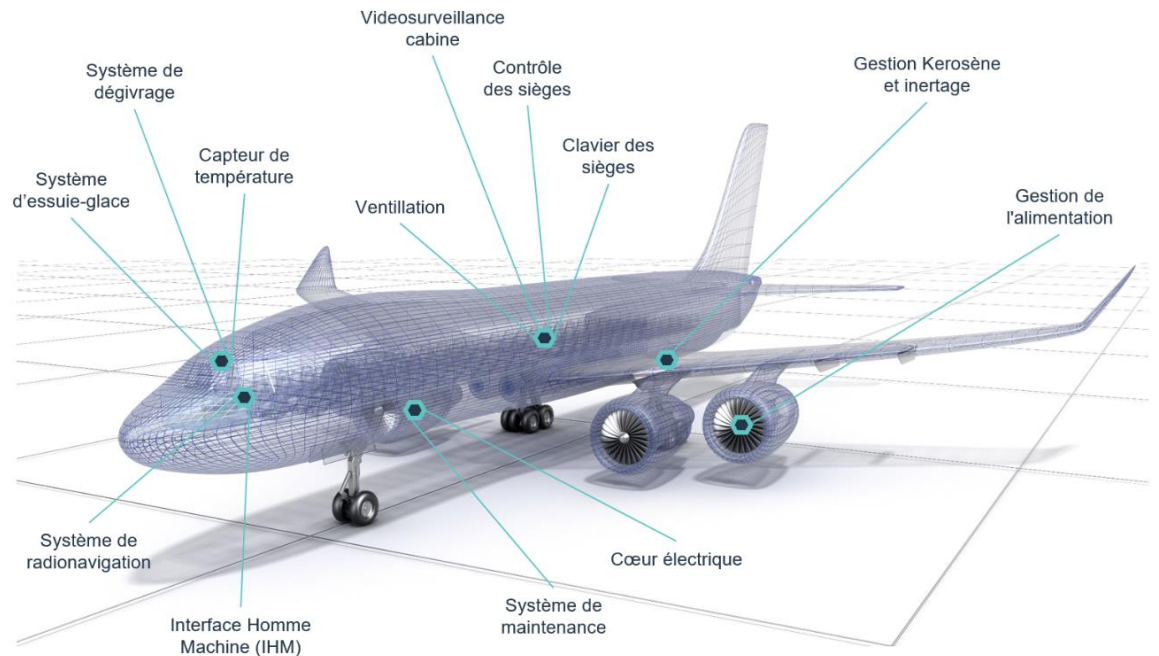


Figure 2-10 Système avionique [16]

2.4 Conclusion

Depuis les débuts de l'aéronautique, l'énergie électrique a pris une importance croissante à bord des avions. Initialement utilisée uniquement pour l'instrumentation de bord, elle s'est progressivement étendue au confort et au divertissement des passagers, comme l'éclairage, la cuisine et les appareils vidéo. L'électricité est devenue également

essentielle avec l'augmentation des équipements électroniques nécessaires au fonctionnement des avions, notamment avec l'introduction des commandes de vol électriques sur l'Airbus A320 dans les années 1980.

Aujourd'hui, l'électricité reste un axe majeur de recherche en aéronautique. Après l'introduction récente des actionneurs de commandes de vol électriques sur l'Airbus A380, de nombreux autres systèmes pourraient devenir électriques dans les prochaines années, comme le démarrage des moteurs, le dégivrage, le freinage des roues, et le conditionnement d'air. Cette électrification croissante modifie profondément le comportement global des avions en raison des interactions entre ces systèmes [5]

Ce besoin accru en énergie électrique a conduit à une évolution des standards de tension utilisés pour les réseaux à bord des avions. De la tension continue de 28 V, on est passé à la tension alternative de 115 V / 400 Hz au milieu du siècle dernier. Aujourd'hui, de nouveaux niveaux de tension sont en développement pour répondre aux puissances élevées nécessaires.[17]

Les avions les plus récents sont devenus de véritables petites centrales volantes, totalisant 1 mégawatt de puissance et parcourues par 500 kilomètres de câbles. Et elles n'ont pas le droit de tomber en panne !

Les défis de l'électrification des avions est de concevoir des systèmes électriques capables de fonctionner dans un environnement électromagnétique éventuellement perturbé, sans générer eux-mêmes de perturbations. La problématique est cruciale pour les éléments d'électronique de puissance qui fonctionnent en "tout ou rien" et engendrent de ce fait d'importantes émissions électromagnétiques.

L'autre problème est le vieillissement des cartes électroniques et des connectiques associées soumises aux contraintes du vol : Température, vibrations, environnement atmosphérique... [18].

Chapitre 3 - Sources de perturbations électro - magnétique dans les avions

3.1 Introduction

Aujourd'hui, les interférences électromagnétiques posent un problème croissant dans de nombreuses activités industrielles ainsi que dans la vie quotidienne. On peut classer ces interférences en deux catégories en fonction de leur origine : celles d'origine artificielle, telles que celles générées par les radiocommunications, les radars et les équipements électriques, et celles d'origine naturelle, comme la foudre, les rayonnements cosmiques et les décharges électrostatiques.[19]

3.2 Les sources artificielles

3.2.1 Problème lié à la compatibilité électromagnétique

3.2.1.1 Définition

L'un des principaux problèmes auxquels sont confrontés les aéronefs est la compatibilité électromagnétique.

La compatibilité électromagnétique (CEM) est l'aptitude d'un appareil ou d'un système électrique, ou électronique, à fonctionner dans son environnement électromagnétique de

façon satisfaisante, sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement [20]. L'incompatibilité provient des systèmes et structure de plus en plus complexe. Elle est prise en considération et intégrée au moment de la conception et de la fabrication des matériaux électrotechniques mais nous distinguons plusieurs sources de perturbations électromagnétiques qui ne sont pas toujours des appareils qui peuvent être réglé et qui peuvent se propager via les câbles et fils conducteurs qui transmettent les signaux ou par rayonnement sous forme d'onde. Plus la tension U et le courant I croissent plus les perturbations sont importantes, engendrant des phénomènes indésirables tel que le brouillage des ondes radio. La compatibilité électromagnétique vise donc la cohabitation de plusieurs appareils électronique dans un environnement sain. L'avion A380 comporte, par exemple, plus de 500 km de câbles, plus de 3500 connecteurs qui pourraient interférer avec d'autres systèmes s'ils sont câblés sans réaliser les études nécessaires. Il est donc essentiel de prendre en considération les effets des champs électromagnétiques qui peuvent perturber des systèmes sensibles. Sinon, des incidents de fonctionnement allant jusqu'à des détériorations de processus, des pertes d'informations ou erreurs de calcul constituent des dysfonctionnements graves aux conséquences économiques et financières très préjudiciables. [21] [5]

Du point de vue de la classification, les systèmes avioniques peuvent être divisés en deux catégories [22]:

- Les systèmes électroniques assurant les fonctions essentielles qui n'utilisent pas d'énergie radioélectrique. Ces systèmes sont conçus pour résister à des champs électriques allant jusqu'à plusieurs centaines de volts par mètre.

- Les systèmes de navigation et de communication, sensibles aux rayonnements électromagnétiques. Ces systèmes peuvent être perturbés par des émissions intentionnelles ou non, par exemple celles provenant d'équipements transportés par les passagers.

Depuis le 1er Janvier 1996, l'Europe impose une certification "électromagnétique" de tous les produits industriels ou grand public comportant des éléments électriques ou électroniques : tous les produits doivent, lors de leur première mise sur le marché, être en conformité avec les objectifs de protection de compatibilité électromagnétique (CEM) fixés par la directive Européenne [7]. Selon cette dernière, une perturbation électromagnétique (PEM) est définie comme : « tout phénomène électromagnétique susceptible de créer des troubles de fonctionnement d'un équipement. Une perturbation électromagnétique peut être un bruit électromagnétique, un signal non désiré, ou une modification du milieu de propagation lui-même» [7].

3.2.1.2 Chemin de Perturbations Électromagnétiques

Chaque équipement électrique, lors de son fonctionnement, génère des perturbations électromagnétiques, mais peut aussi présenter une sensibilité par rapport à de telles perturbations. Les perturbations se transmettent d'un système source vers une autre victime (qui pourra être aussi une source) via des chemins de perturbation par rayonnement ou par conduction. La façon avec laquelle se propagent les PEM est appelée le couplage qui, pourra favoriser (résonances) ou défavoriser (atténuations et pertes) la transmission des PEM. Il sera donc envisageable, pour réduire le risque d'avoir des PEM d'agir sur l'un des trois éléments :

- Source : de diminuer le niveau d'émission de la source de perturbation en jouant, par exemple en électronique de puissance, sur le temps de montée et/ou descente en commutation, ou sur l'amplitude d'un signal ou alors en agissant sur la topologie et sur le design du convertisseur : onduleurs de tension multiniveaux, multicellulaire. Ce choix est souvent difficile à adopter quand l'équipement est déjà réalisé.
- Couplage : la réduction des couplages s'effectue par des modifications géométriques entre la source et la victime, ou une insertion d'une barrière d'isolation EM. Par exemple, en cas de couplage rayonné, en éloignant la source de la victime en modifiant le cheminement des faisceaux de fils pour réduire la boucle de réception des perturbations. Ces remèdes sur le couplage sont simples à mettre en œuvre. Ils sont les moins onéreux et ne tombent pas en panne !
- Victime : d'augmenter l'immunité de la victime, en intégrant des filtres permettant de protéger l'équipement, ou d'utiliser des composants intrinsèquement plus robustes aux perturbations électromagnétiques.

En fonction des situations et des contraintes économiques dans les systèmes industriels, on peut donc intervenir avec une ou plusieurs stratégies.

Une bonne conception électromagnétique d'un système ou d'un sous-système doit donc permettre de garantir que :

- Les PEM produites ne dépassent pas un niveau au-delà duquel cela pourrait perturber d'autres équipements
- L'équipement possède un niveau d'immunité aux PEM qui lui permet de fonctionner sans dégradation inacceptable dans un environnement électromagnétique donné

De nos jours, la CEM peut atteindre 12 % des coûts totaux d'un produit, depuis la phase de développement jusqu'à la production [8]. Il paraît évident qu'un échec de validation, lors de la certification, entraîne des retards de production ainsi qu'un coût supplémentaire pour le constructeur. Afin d'éviter ces échecs il est nécessaire de prendre en compte les contraintes CEM au moment de la fabrication du produit.

Autrement dit, la CEM est finalement devenue un mécanisme à maîtriser pour assurer la sécurité de personnes d'un côté, et améliorer la performance des équipements électroniques avant de pouvoir les commercialiser d'un autre côté.

3.2.2 Problème lié à la communication inter-domaine

La communication inter-domaine est complètement contrôlée et ne permet pas de remontée de flux d'un niveau peu critique (par exemple le domaine des équipements des passagers) à un niveau critique (par exemple le domaine de commande). Une telle isolation assure ainsi la sécurité-immunité des applications critiques vis-à-vis des attaques, en supposant que toute information arrivant à ces applications critiques est de confiance.[23]

Au courant du mois d'avril 2008, un rapport de l'agence fédérale de l'aviation (FAA) a déclenché une vague d'articles et d'analyses essayant de corréliser le retard de livraison du Dreamliner 787 de l'avionneur américain avec des vulnérabilités supposées, mentionnées dans ce rapport. Les vulnérabilités en question seraient liées à une possible communication entre le réseau mis à disposition des passagers et les réseaux avioniques en charge de commander l'avion. Cet événement médiatique met en évidence l'ouverture des systèmes avioniques sur les systèmes informatiques et les réseaux plus classiques, généralement appelés systèmes ouverts, et souligne de nouvelles problématiques relatives à la sécurité (au

sens security ou sécurité-immunité) qui viennent s'ajouter aux contraintes de safety ou sécurité-innocuité déjà connues dans le domaine avionique. Cette importance croissante de la composante sécurité-immunité, c'est-à-dire la prise en compte d'éventuelles malveillances lors de la réalisation et de l'exploitation des systèmes embarqués critiques, est due à plusieurs facteurs : - L'utilisation accrue de composants sur étagère (COTS), matériels et logiciels : ces composants offrent à faible coût des fonctionnalités très larges, qui permettent de mettre en œuvre facilement des applications efficaces et performantes. Ils présentent des avantages importants : ils sont utilisés en grand nombre dans des contextes très différents, ce qui augmente leur maturité, beaucoup de fautes de conception ont déjà été détectées et corrigées, et leur fabrication est bien maîtrisée. Cependant, de tels composants n'ont pas été conçus pour des applications critiques, ce qui rend difficile leur certification. De plus, ces composants sur étagère sont souvent plus complexes qu'il ne serait nécessaire pour les seules applications embarquées critiques, ce qui peut les rendre plus vulnérables à des attaques. D'autre part, leur large diffusion fait qu'il est facile pour des attaquants éventuels d'en obtenir une connaissance détaillée, y compris sur leurs vulnérabilités. - L'ouverture des réseaux et des applications : dans le transport aérien, les communications numériques bord-sol se multiplient (contrôle de trafic aérien, compagnie, passagers), voire directement d'avion à avion ; on voit aussi cette tendance se généraliser dans les transports routiers et ferroviaires. Cela procure davantage d'opportunités pour un attaquant de s'introduire dans un système embarqué. - La complexité croissante des systèmes embarqués multiplie le risque d'introduire des vulnérabilités susceptibles d'être exploitées par des attaquants, d'autant plus que les méthodes de développement des applications critiques ne prennent pas forcément en compte le risque de malveillance. - Enfin, les menaces sont croissantes, en particulier avec le développement du terrorisme international, mais aussi du

hacking. Pour le transport aérien ou ferroviaire, il faut prendre en compte les malveillances éventuelles des passagers ou du personnel des compagnies, voire du personnel des constructeurs ou des équipementiers. Dans l'automobile, il faut même prendre en compte la volonté de certains propriétaires de customiser le système embarqué dans leur véhicule pour en améliorer les performances. Ce constat a déjà conduit la communauté aéronautique internationale à s'organiser afin de mettre à jour les normes existantes ou développer de nouvelles normes pour prendre en compte les problèmes de sécurité vis-à-vis des malveillances.

3.2.3 *Diaphonie d'une antenne dans un avion*

Les antennes revêtent une importance cruciale dans le domaine de l'aviation, étant essentielles pour que les pilotes maintiennent l'alignement et la position sécurisés de leurs avions. Cette fonction devient particulièrement critique en cas de visibilité réduite, telle que la nuit ou par mauvaises conditions météorologiques. Ainsi, pour garantir la sécurité des vols, il est impératif que ces antennes soient d'une fiabilité exceptionnelle. [24][25][5]

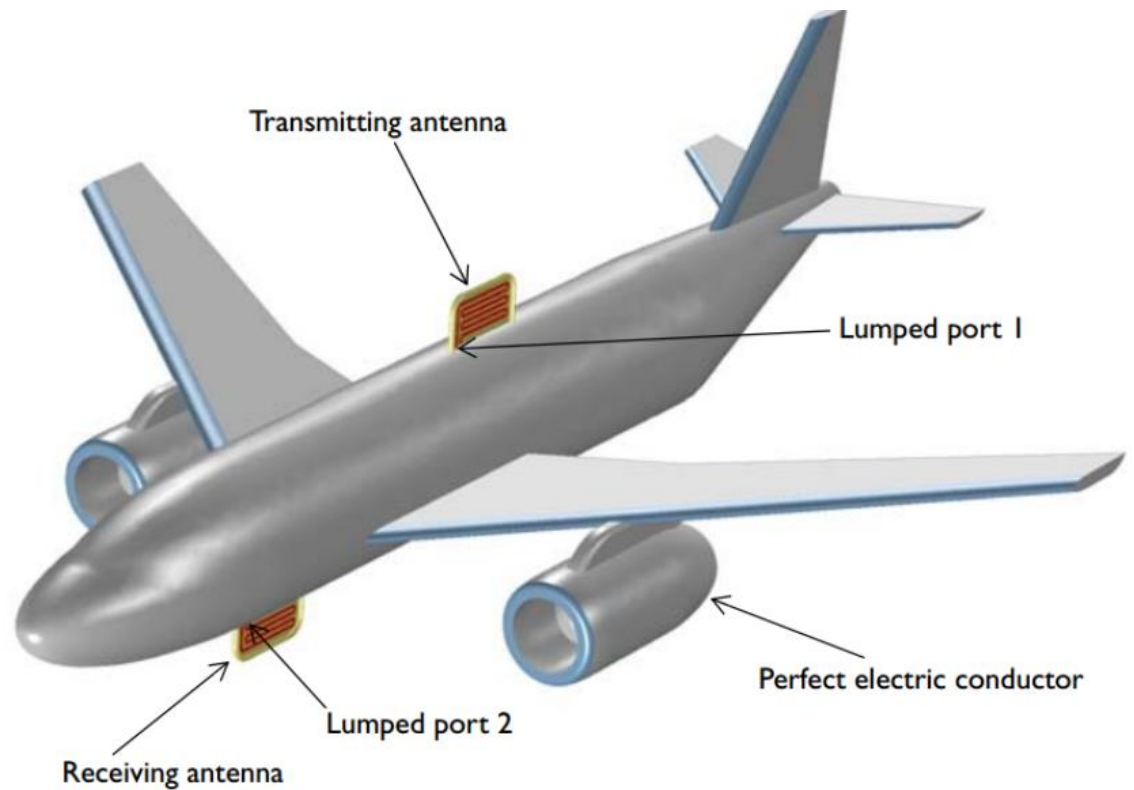


Figure 3-1 Avion avec les antennes d'émission et de réception mises en évidence, la taille des antennes est exagérée [25]

Avec la complexité croissante des systèmes de communication dans l'aviation, il est fréquent d'installer plusieurs antennes sur un même avion. Cette configuration engendre une diaphonie, également appelée interférence cosite, entre les antennes, susceptible de perturber le bon fonctionnement de l'aéronef.

3.3 Source naturelle et bio-champs

3.3.1 Les rayons cosmiques

Les rayons cosmiques sont des particules subatomiques à énergie extrêmement élevée – principalement des protons et des noyaux atomiques accompagnés d'émissions électromagnétiques – qui se déplacent dans l'espace et finissent par bombarder la surface de la Terre. Ils se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière, qui est d'environ 300 000 kilomètres par seconde.

Le champ magnétique mesuré à la surface de la Terre est la somme d'un champ d'origine interne, appelé champ magnétique terrestre et d'un champ d'origine externe conséquence du vent solaire [9]

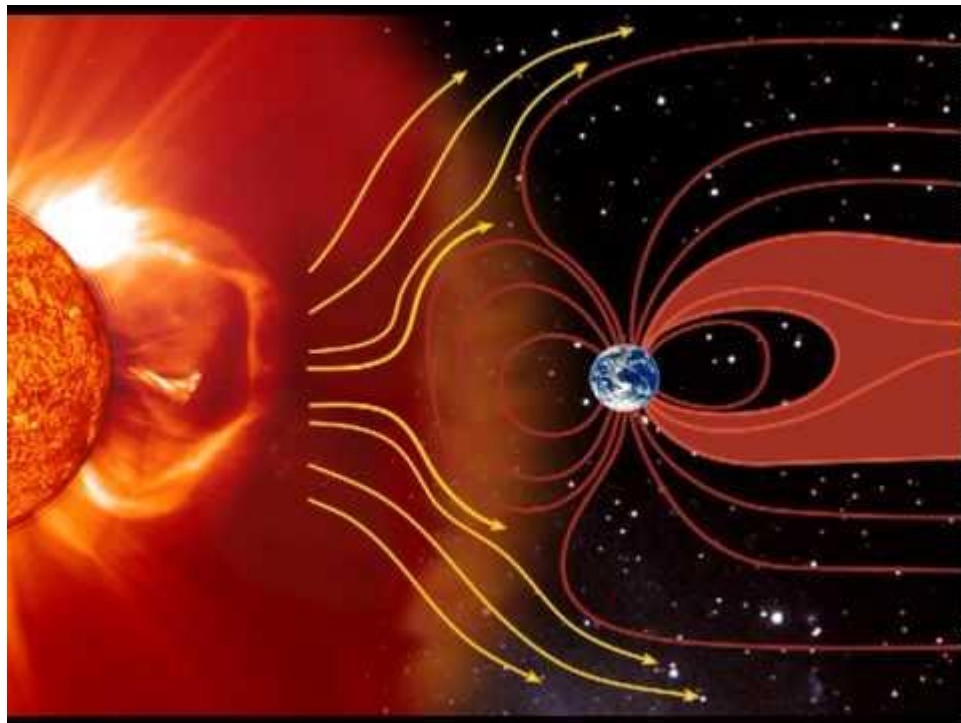


Figure 3-2 Les rayons cosmiques [26]

3.3.1.1 La découverte du rayonnement cosmique

Au début de 20^{ème} siècle, les scientifiques étaient mystifiés par le niveau de rayonnement ionisant (rayonnement de haute énergie) dans l'atmosphère. Ils ont émis l'hypothèse voulant que si la Terre était la source du rayonnement, alors l'intensité du rayonnement devrait diminuer à mesure que l'on s'éloigne de la Terre. Les premières expériences ont plutôt démontré que le niveau de rayonnement augmentait. Ce mystère a inspiré un jeune scientifique autrichien du nom de Victor Francis Hess à trouver un moyen pour mesurer avec précision le rayonnement dans l'atmosphère. [22]

La première chose qu'Hess décida de faire fut d'augmenter la précision de l'équipement de mesure. À cette époque, les scientifiques commençaient à utiliser un nouvel appareil appelé électromètre permettant de déceler les particules chargées. S'il s'assurait de la précision de son appareil, Hess pourrait se fier aux mesures obtenues.

Ensuite, il devait trouver une façon de s'élever plus haut dans l'atmosphère avec son électromètre. Il y est parvenu à l'aide d'une montgolfière. Entre 1911 et 1913, il s'est envolé à dix occasions avec son ballon de jour comme de nuit. Il a mesuré le rayonnement dans l'atmosphère à une distance pouvant atteindre 5,3 km au-dessus de la Terre.



Figure 3-3 Victor Francis Hess se préparant à s'élever dans une montgolfière

(Source : American Physical Society via Wikimedia Commons) [22]

Hess a découvert que l'intensité du rayonnement diminuait jusqu'à une **altitude** (distance au-dessus de la Terre) d'environ 1 km. L'altitude est la distance au-dessus de la surface de la planète. Ceci représente à quoi on s'attend si la Terre constitue bien la source du rayonnement. Cependant, le niveau de rayonnement augmente à des altitudes de plus de 1 km. Hess a observé que le rayonnement à 5 km de la Terre correspondait au double du rayonnement au niveau de la mer. Mais, quelle était la source du rayonnement? Pour établir si le rayonnement provenait du Soleil, Hess s'est envolé dans sa montgolfière par une nuit d'éclipse solaire. Même avec la lune bloquant la majeure partie du rayonnement du Soleil,

le niveau de rayonnement grimpait encore en altitude, donnant à penser que le rayonnement provient de l'espace. La découverte du rayonnement « cosmique » a valu à Hess de partager le prix Nobel de physique en 1936.

3.3.1.2 La relation entre le rayonnement et l'altitude

Comme Hess l'a découvert, il existe un lien entre l'altitude et le niveau de rayonnement.

Plus vous montez en altitude, plus vous êtes exposé au rayonnement. Dans un petit aéronef volant à une altitude d'environ 7,5 km (25 000 pi), votre exposition au rayonnement sera 10 fois plus forte qu'au niveau de la mer. À une altitude de 12 km (40 000 pi), soit l'altitude de croisière typique d'un avion de ligne commercial, votre exposition au rayonnement est de 40 à 50 fois plus importante que l'exposition au niveau de la mer.[8][27]

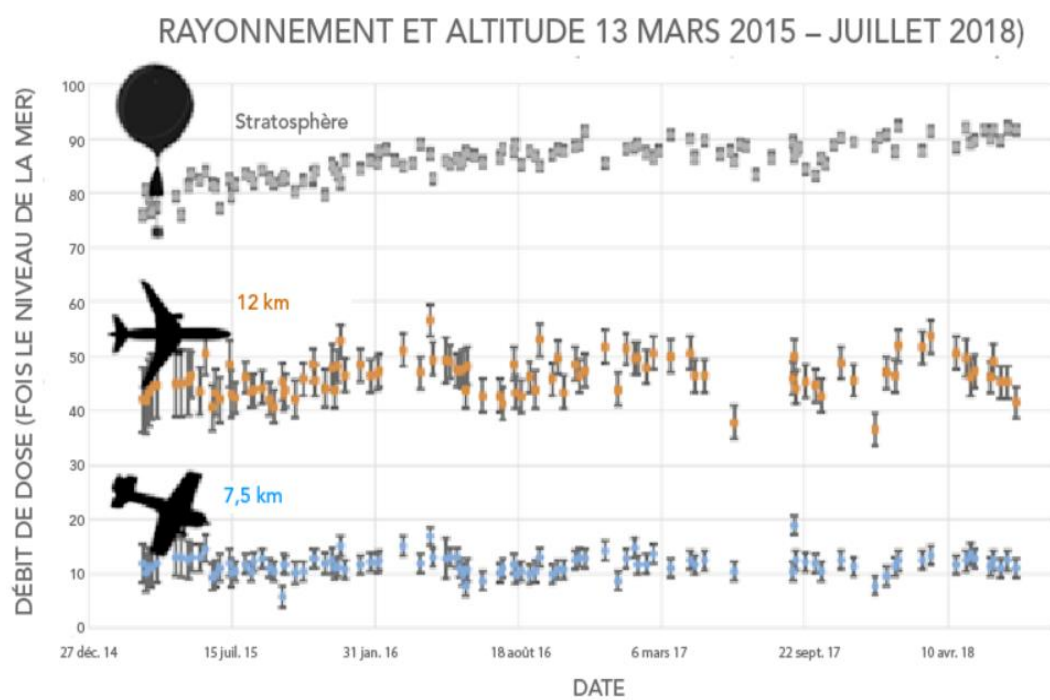


Figure 3-4 La relation entre l'altitude et l'intensité du rayonnement cosmique [27]

3.3.2 *La foudre*

La foudre se manifeste par une décharge électrique, donnant naissance à l'éclair en raison de l'échauffement de l'air. Le tonnerre, quant à lui, émerge du bruit résultant de la vibration de l'air le long de cette décharge électrique lors de sa propagation. En un laps de temps très court, l'air atteint une température de 30 000 °C, subissant des compressions et des dilatations extrêmement violentes. Ces mouvements brusques génèrent des ondes sonores responsables des claquements, grondements et roulements du tonnerre.

Un éclair peut se former à l'intérieur d'un nuage, entre deux nuages, entre un nuage et un objet tel qu'un avion, ou entre le nuage et le sol, provoquant ainsi la foudre. Divers types de décharges électriques vers le sol existent, tout comme celles qui se produisent entre nuages adjacents.

Même en ciel dégagé, des décharges peuvent parfois se produire, particulièrement dans les régions où les bases nuageuses sont élevées. Ces éclairs apparemment spontanés ont rarement un impact au sol, mais ils peuvent frapper à une distance allant jusqu'à près de 30 milles marins.

3.3.2.1 Impact de la foudre sur les avions :

Selon l'Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales (ONERA), un avion de ligne est statistiquement susceptible d'être touché par la foudre environ toutes les 1500 heures de vol, soit approximativement une fois par an. Ce phénomène est donc considéré comme fréquent pour les avions de ligne.



Figure 3-5 Impact de la foudre sur les avions [28]

En général, l'éclair frappe une partie du fuselage, l'extrémité d'une aile, ou le nez de l'appareil où se trouve l'antenne radar, puis se propage à la surface de l'avion, dont la structure est principalement constituée d'aluminium, un excellent conducteur d'électricité qui agit comme une cage de Faraday. Par la suite, l'éclair ressort de l'autre côté ou par la queue. Bien que la plupart du temps aucun incident ne se produise, l'intensité du courant lors d'une frappe de foudre peut atteindre jusqu'à 200 000 ampères, entraînant une élévation très importante de la température, pouvant "brûler" quelques rivets sur le fuselage. À l'arrivée au parking, l'équipage informe les mécaniciens qui effectuent une inspection des points d'entrée et de sortie de la foudre. Si certains rivets sont endommagés, ils seront remplacés, mais cela n'affecte pas la sécurité.

En cabine, les passagers peuvent parfois entendre un bruit (claquement) ou voir un éclair à travers le hublot, mais ils ne ressentiront rien.[29]

3.3.3 *Le champ magnétique terrestre :*

La Terre est protégée par un champ magnétique qui renvoie les particules chargées d'un pôle à l'autre, créant deux ceintures gigantesques en forme d'anneau, peuplées d'électrons et de protons énergétiques. La magnétosphère détourne les rayons cosmiques et nous protège des éruptions solaires. Parfois, le rayonnement cosmique nous atteint, sans toutefois nous nuire, tout comme d'autres rayonnements faibles auxquels nous sommes régulièrement exposés. Les personnes sont exposées à un rayonnement d'environ 3,5 millisieverts par an en moyenne. Environ la moitié de ce rayonnement provient de sources artificielles, comme la radiographie, la mammographie et la tomodensitométrie, tandis que l'autre moitié provient de sources naturelles, le rayonnement cosmique en représentant environ 10 %. Le sievert est l'unité de mesure du risque que présentent les rayonnements pour la santé : un sievert est associé, pour un individu, à une probabilité de 5,5 % de développer un cancer radio-induit au cours de la vie.

3.3.4 *Rayonnement cosmique solaire :*

Le rayonnement cosmique solaire est composé de particules chargées émises par le Soleil, qui sont essentiellement des électrons, des protons et des noyaux d'hélium. Une partie de ce rayonnement est émise de façon continue par la couronne du Soleil, c'est pourquoi les scientifiques l'appellent le « vent solaire ». Le reste résulte de phénomènes liés aux particules solaires – éclatements soudains et sporadiques de particules

électriquement chargées s'accompagnant d'émissions électromagnétiques qui se produisent lorsque les champs magnétiques à la surface du Soleil s'étirent et se tordent. Tels des élastiques, les champs magnétiques du Soleil peuvent claquer, libérant de façon soudaine une énorme quantité d'énergie et présentant un risque pour la santé des astronautes dans l'espace. Bien que rares, les fortes éruptions solaires peuvent provoquer les pannes radio et avoir des incidences sur la communication moderne et la technologie de la navigation au sol. Les rayons cosmiques peuvent être de deux types : galactiques ou solaires. Le rayonnement cosmique galactique émane des restes de supernovas, puissantes explosions se produisant au cours des dernières étapes de la vie d'énormes étoiles, qui deviennent alors des trous noirs ou sont détruites. L'énergie libérée lors de ces explosions accélère des particules chargées, les faisant sortir de notre système solaire et les rendant extrêmement pénétrantes et difficiles à stopper. En fait, les supernovas se comportent comme de gigantesques accélérateurs de particules naturels. La Terre est constamment exposée à un rayonnement cosmique galactique.

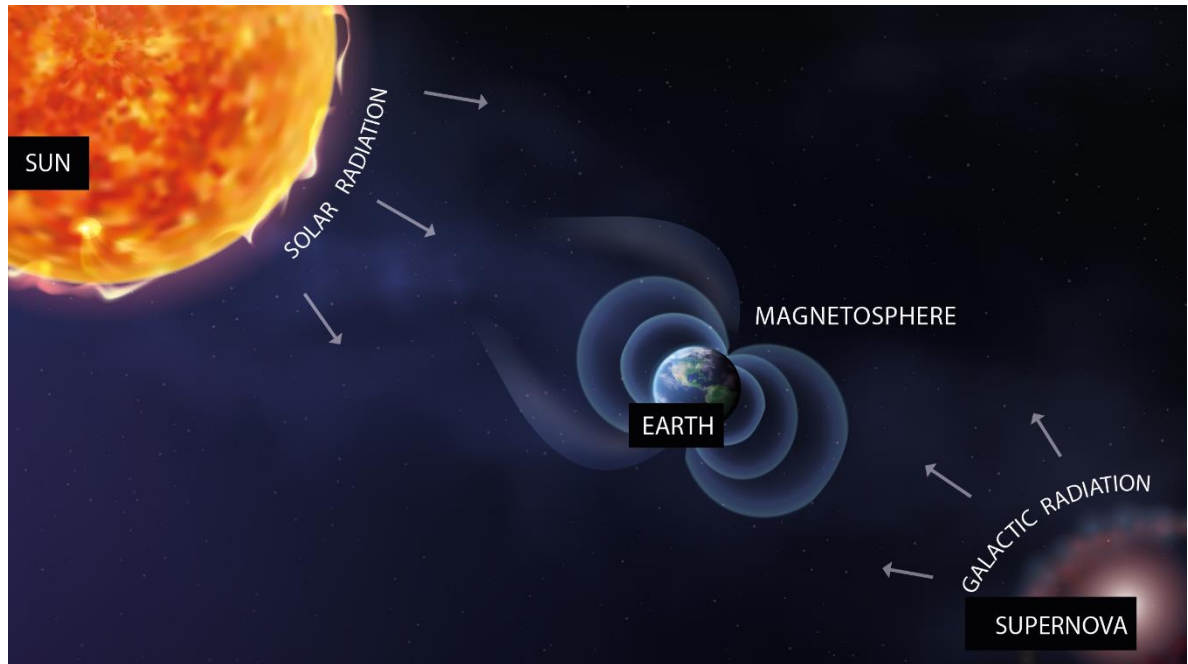


Figure 3-6 L'exposition de la terre au rayonnement cosmique (Image : L. Han/AIEA) [22]

3.4 Conclusion

L'exploration des liens entre la météorologie spatiale et l'aviation représente un domaine de recherche en développement constant. Ces dernières années, aussi bien les chercheurs que les communautés internationales se sont de plus en plus penchés sur l'impact de la météorologie spatiale sur l'industrie aéronautique. Il semble que les conditions météorologiques spatiales puissent influencer les phénomènes météorologiques terrestres tels que les orages et la foudre, entraînant ainsi des conséquences directes sur la sécurité des vols. Des analyses ont même mis en lumière la contribution potentielle des conditions de l'environnement spatial à des incidents d'aviation. On remarque également

que certains vols doivent ajuster leurs horaires, leurs itinéraires, voire réduire leur altitude de croisière pour éviter les risques associés au rayonnement lors des tempêtes magnétiques solaires. En 2011, l'association du transport aérien international (IATA) a pris conscience de l'importance de recueillir des informations sur la météorologie spatiale. Au début de 2002, l'organisation de l'aviation civile internationale (OACI) a commencé à évaluer la nécessité de fournir des informations sur la météorologie spatiale pour la navigation aérienne internationale lors des tempêtes géomagnétiques. Actuellement, l'OACI met à disposition des mises à jour en temps réel et à l'échelle mondiale sur la météorologie spatiale pour l'aviation commerciale et générale, contribuant ainsi à renforcer la sécurité des vols.

Les fluctuations exceptionnelles des champs électromagnétiques et des conditions de plasma au-dessus de la Terre lors des tempêtes solaires ont des conséquences significatives sur divers aspects de la société humaine. Les éruptions solaires (SF), les éjections de masse coronale (CME) et les particules énergétiques solaires (SEP) représentent des phénomènes météorologiques spatiaux courants (SWE). Les éruptions solaires introduisent sur Terre une augmentation substantielle du rayonnement électromagnétique à travers l'ensemble du spectre, englobant des ondes radio jusqu'aux rayons gamma. Cette intensification du rayonnement entraîne une augmentation de l'ionisation de l'atmosphère, perturbe l'ionosphère et peut causer des perturbations des communications radio, notamment pour les liaisons à haute fréquence (HF) utilisées par les avions. Les éjections de masse coronale agissent comme des nuages de plasma dense qui impactent et compriment la magnétosphère, perturbant ainsi l'environnement spatial proche de la Terre. Ces phénomènes peuvent déclencher des tempêtes géomagnétiques, avec des fluctuations

associées au champ géomagnétique mondial, affectant les communications, la navigation et la transmission d'énergie électrique. En ce qui concerne les particules énergétiques solaires, elles possèdent une énergie extrêmement élevée, certaines pouvant même pénétrer dans la troposphère. Ces particules peuvent impacter l'électronique des avions, induisant des erreurs à événement unique susceptibles d'endommager les systèmes avioniques et de réduire la marge de sécurité des systèmes aéronautiques.

En outre, les radiations ionisantes associées aux particules énergétiques solaires (SEP) peuvent également exposer les équipages et les passagers à des niveaux de radiation excessifs, en particulier près des régions polaires. Bien que la fréquence des phénomènes météorologiques spatiaux (SWE) soit étroitement liée au cycle solaire de 11 ans, il convient de souligner que les SWE peuvent survenir quotidiennement. Lorsque ces événements atteignent la Terre, leur influence persiste généralement sur une période allant de 1 à 3 jours.[30]

Chapitre 4 - Modélisation et résultats

4.1 L'outil de simulation

Ce chapitre représente deux simulations distinctes ont été faites par moi-même Afifa Amriche: la première examine l'impact des bio-champs sur les équipements électroniques à bord d'un avion volant à haute altitude, tandis que la seconde étudie l'influence des champs électromagnétiques sur le corps humain à une altitude élevée en utilisant le logiciel de simulation numérique COMSOL Multiphysics, version 6.1, licence de l'Université du Québec à Trois Rivières.

Le logiciel COMSOL Multiphysics est fondé sur la méthode des éléments finis, qui offre la capacité de modéliser une grande diversité de phénomènes physiques et d'applications en ingénierie, en mettant en avant les phénomènes couplés et les simulations multi-physiques.

4.2 Introduction à la première simulation

Dans l'espace extra-atmosphérique et d'autres environnements sont soumis à des radiations intenses, des ions à haute énergie et des protons pénètrent les matériaux et affectent les systèmes électroniques à proximité. Connus sous le nom d'effet d'événement unique (SEE), les radiations de particules peuvent entraîner des erreurs temporaires ou permanentes dans les dispositifs. Étant donné qu'une seule erreur grave met en péril une

mission spatiale, les ingénieurs aérospatiaux doivent s'assurer que tous les dispositifs électroniques critiques peuvent résister à un SEE.[31]

Un SEE est une perturbation électrique dans un circuit causée par des particules chargées, telles que des protons à haute énergie, frappant un matériau solide. L'impact de ces particules, provenant du soleil, des ceintures de radiation et des rayons cosmiques galactiques, crée des trous permettant aux électrons de se déplacer à travers le matériau. En se déplaçant, ces porteurs de charge libres se recombinent finalement avant de s'arrêter sur un nœud. Là, la charge supplémentaire provoque un changement de tension et, par conséquent, une erreur temporaire ou permanente.

Si une seule erreur grave se produit dans un système critique dans l'espace, cela pourrait signifier la fin de la mission. Par exemple, les particules hautement énergétiques produites par la tempête solaire d'Halloween en 2003 ont affecté de nombreux dispositifs à bord des engins spatiaux, y compris l'expérience sur l'environnement radiatif martien (MARIE), qui a dysfonctionné et ne s'est jamais rétabli. La raison en est que les erreurs graves peuvent être destructrices, parfois au point où l'ensemble du dispositif ou du système doit être remplacé. Heureusement, toutes les erreurs causées par les SEE ne sont pas aussi dommageables. Les erreurs temporaires ne sont généralement pas destructrices et peuvent être corrigées avec une réinitialisation de l'alimentation.

Un exemple d'erreur temporaire est une perturbation due à un événement unique, qui se produit dans deux composants clés des dispositifs électroniques numériques : la mémoire et les systèmes logiques. Ces systèmes sont essentiels aux microprocesseurs, tels que ceux des cartes mères et des instruments scientifiques à bord des engins spatiaux. Une erreur dans le microprocesseur pourrait entraîner un comportement incorrect de l'ensemble du dispositif

simplement en faisant basculer un bit de 0 à 1 ou vice versa. Avec ce type d'erreur temporaire, le système est généralement capable de continuer à fonctionner, et le problème peut être corrigé en annulant le changement.

Les erreurs permanentes, qui incluent les accrochages dus à un événement unique, les brûlures et les ruptures de grille, entraînent des effets plus durables. Par exemple, un accrochage dû à un événement unique peut entraîner un courant de fonctionnement trop élevé, provoquant un dysfonctionnement du dispositif, une perte de données et finalement, la destruction du dispositif. Ces accrochages se produisent souvent dans les circuits intégrés construits avec la technologie à oxyde métallique semi-conducteur complémentaire (CMOS), couramment utilisée pour les microcontrôleurs et microprocesseurs. Les brûlures et les ruptures de grille se produisent, par exemple, dans les MOSFET de puissance, tels que ceux des satellites météorologiques et du GPS. Ces erreurs entraînent des tensions dépassant les limites, provoquant la défaillance du dispositif.

4.2.1 Détails du modèle de simulation

Dans le modèle, des protons à haute énergie se déplacent vers un bloc de silicium solide pour des valeurs d'énergie initiales comprises entre 1 keV et 100 MeV. Une fois qu'ils frappent le matériau, les protons subissent des pertes par ionisation, qui ralentissent les particules, et un arrêt nucléaire, qui les dévie dans des directions aléatoires.

Pour capturer facilement le comportement des protons, vous pouvez tirer parti de l'interface de traçage des particules chargées. En utilisant le nœud d'interaction particule-matière, vous pouvez prendre en compte à la fois la perte d'énergie et la dispersion des

protons. De plus, vous pouvez décrire l'effet du proton sur le matériau en utilisant l'un des sous-nœuds. Par exemple, le sous-nœud de perte par ionisation traite l'interaction comme une force continue se déplaçant dans la direction opposée au mouvement de la particule, tandis que le sous-nœud d'arrêt nucléaire la traite comme une force discrète ralentissant la particule et la dévié dans une direction aléatoire.

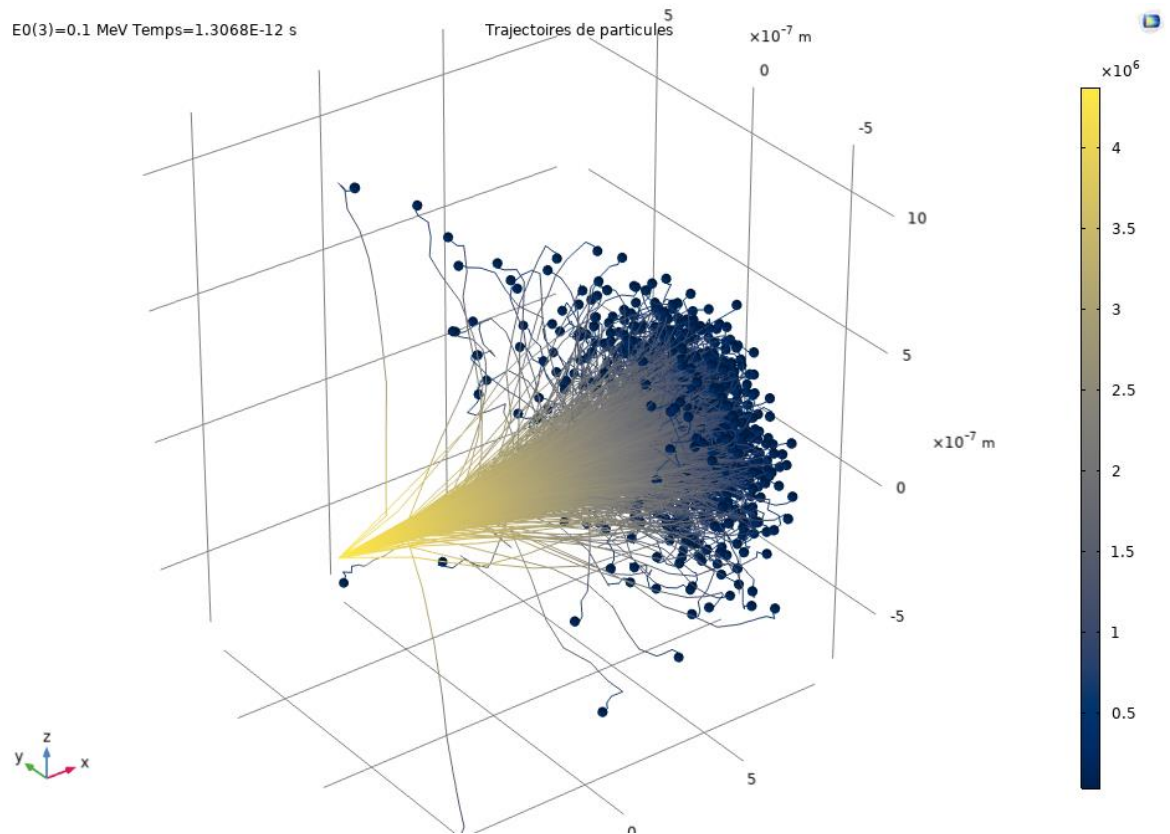


Figure 4-1 Capture d'écran du premier modèle élaboré avec COMSOL de la trajectoire de dispersion des protons hautement chargés

Ensuite, il est important de déterminer la profondeur de pénétration des particules (c'est-à-dire la portée ionique), car cela influence si elles ioniseront ou non les dispositifs électroniques à proximité et provoqueront ainsi un SEE. Pour trouver cette profondeur, deux approches peuvent être utilisées :

- 1- Utilisation d'une variable auxiliaire dépendante pour imiter l'approximation continue du ralentissement (CSDA), qui suppose que les protons ralentiront à un rythme constant.
- 2- Calcul de la portée projetée en projetant la vitesse du proton sur sa direction initiale de mouvement

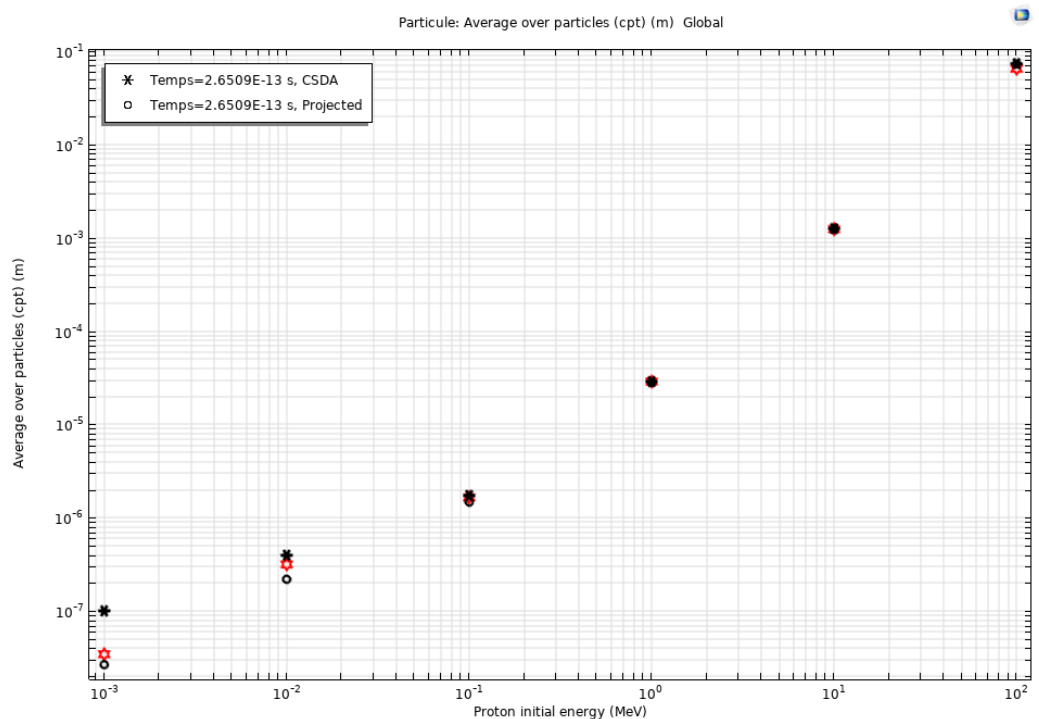


Figure 4-2 Capture d'écran du premier modèle élaboré avec COMSOL pour montrer la profondeur de la pénétration des ions

4.3 Introduction à la deuxième simulation

Un avion volant à haute altitude subit des ondes électromagnétiques dues à de nombreux facteurs. Ces ondes électromagnétiques traversent également les passagers. Ces ondes électromagnétiques, plutôt faibles en magnitude, ont néanmoins un certain effet sur les passagers. En particulier sur les organes critiques du corps humain. Certains des facteurs qui contribuent aux ondes électromagnétiques sont expliqués ci-dessous.

4.3.1 *Radiations solaires*

Les radiations qui tombent du soleil sur l'avion sont des radiations solaires. Ces radiations solaires ont la capacité d'exciter les électrons libres dans le métal. Ces électrons libres, lorsqu'ils se déplacent à l'intérieur du métal, créent de petites quantités de courant, ce qui produit un très petit champ magnétique dans les petites régions voisines du corps métallique. Ce champ magnétique peut être une petite source de radiations électromagnétiques.

4.3.2 *Rayonnements spatiaux*

Les radiations spatiales sont de plusieurs types, dont les particules ioniques et subatomiques qui tombent de l'espace sur la surface métallique de l'avion. Ces particules chargées créent une différence de charge en différents points du corps métallique. Bien qu'elle soit très faible, cette différence peut parfois créer une différence de potentiel qui donne lieu à un mouvement d'électrons qui finit par produire des radiations électromagnétiques dans des régions plus petites.

4.3.3 *Champ terrestre*

Le champ terrestre crée une induction magnétique sur tous les objets proches en raison de ses pôles magnétiques nord et sud. Il interagit avec tous les objets volant dans l'atmosphère terrestre. Bien que lorsque les avions volent à haute altitude, ce champ peut avoir une magnitude très faible, il ne devient jamais nul. Mathématiquement, il devient nul à l'infini. Ce champ contient des ondes électromagnétiques qui interagissent avec le corps des passagers.

4.3.4 *Charge statique*

Lorsque les avions volent, le frottement de l'air et le frottement du corps avec la piste et d'autres éléments créent une charge statique sur le corps de l'avion. Cette charge statique est importante et peut parfois atteindre des niveaux dangereusement élevés. Lorsqu'elles s'accumulent en grandes quantités, ces charges créent des tourbillons qui peuvent générer de fortes ondes électromagnétiques dans le champ proche.

4.3.5 *Effets de la foudre*

Lorsque l'avion traverse les nuages et que la foudre frappe le corps de l'avion, le courant circule à travers tout le corps de l'avion. Cela excite électroniquement l'ensemble de l'avion et le corps externe peut générer des ondes électromagnétiques. Bien que la carlingue de l'avion soit fermée de l'extérieur, on suppose qu'elle est exempte de tout champ magnétique externe en raison des effets de blindage des surfaces métalliques fermées. Cependant, lorsque les clous traversent la carlingue, la surface blindée s'échappe d'une manière ou d'une autre, et d'autres fissures et déformations peuvent également produire des radiations magnétiques dans les compartiments des passagers.

4.3.6 Appareils mobiles et signaux de télécommunication

Les appareils mobiles et les signaux de télécommunication sont également une source de rayonnements électromagnétiques dans l'habitacle des avions. Les signaux de télécommunication sont toujours électromagnétiques et sont transmis par le corps humain. Toutefois, les appareils mobiles émettent des radiations qui leur sont propres et qui sont parfois dangereuses.

4.4 Effets généraux

Jusqu'à présent, tous les effets décrits ci-dessus sont individuellement très faibles. Mais cumulativement, les effets combinés de ces effets peuvent être plus importants en raison de la superposition des ondes et des effets combinés d'intensité accrue qui peuvent être alarmants. Nous analyserons ici ces effets de manière appropriée.

4.4.1 Analyse des ondes électromagnétiques

Pour analyser les effets, nous ne pouvons pas ajouter suffisamment de sources de rayonnement, car cela risquerait de créer trop d'équations physiques et d'aboutir à un système d'équations chaotique. Nous simulons donc les effets équivalents de toutes ces sources, qui varient en fonction de certains facteurs tels que l'altitude, la vitesse de l'avion, etc.

4.4.2 Logiciel d'analyse

Pour l'analyse, nous utilisons aussi le logiciel d'analyse "COMSOL Multiphysics", qui est un ensemble complet permettant de concevoir la géométrie, d'analyser et de post-traiter les résultats.

4.4.3 Géométrie

La géométrie doit être simplifiée pour que l'analyse soit la plus efficace possible. De même que nous ne simulons que les effets équivalents de toutes les sources de rayonnements électromagnétiques, nous simulerons un fuselage avec une seule passagère à l'intérieur pour plus de simplicité, le choix de corps humain est choisi exprès d'une femelle pour montrer l'originalité de mon travail. Cette géométrie simple est représentée comme suit :

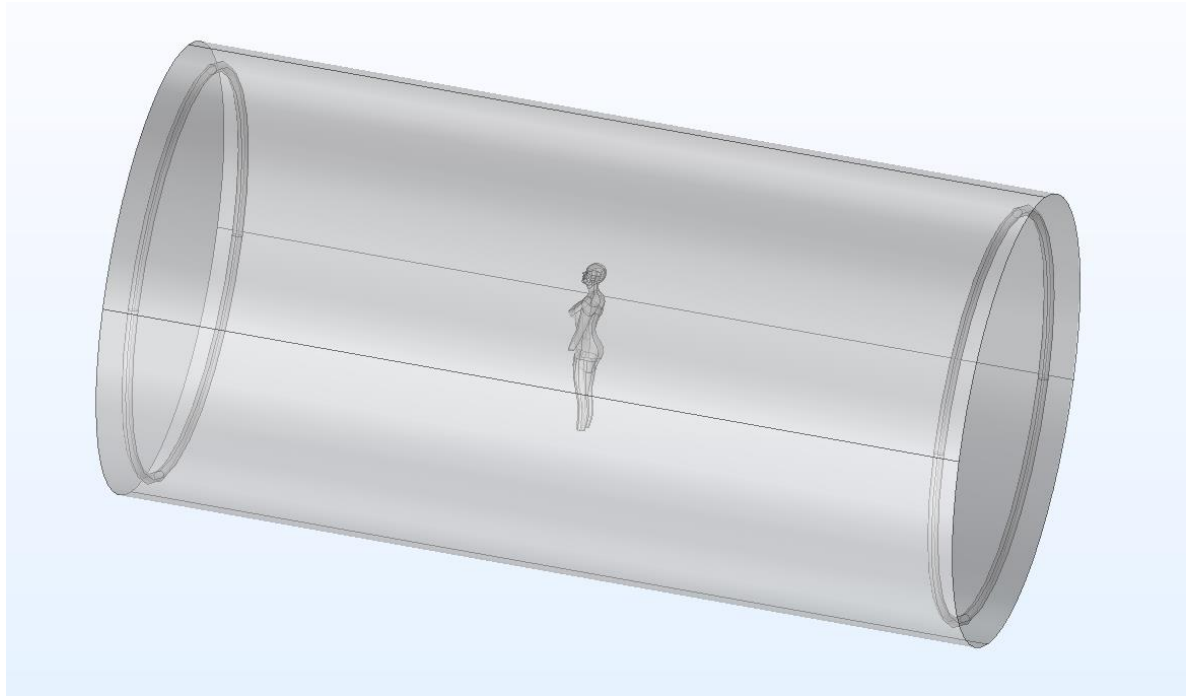


Figure 4-3 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL d'une géométrie simplifiée et justifiée d'un corps humain dans un avion

La section cylindrique est la partie du fuselage choisie pour l'analyse avec deux cloisons montrées comme structure de l'avion et une passagère est présente au milieu de l'avion. Les doigts du corps humain sont de très petites parties et ont été ignorés dans cette analyse.

4.4.4 *Discrétisation*

Pour les besoins du solveur d'éléments finis, la géométrie doit être discrétisée et un maillage doit être créé sur la géométrie 3D. La discrétisation doit être plus fine dans les régions d'intérêt et plus grossière dans les zones qui ne sont pas importantes. Pour cette analyse, les régions d'intérêt se situent près du corps humain et des cloisons. Le maillage sélectionné est illustré ci-dessous :

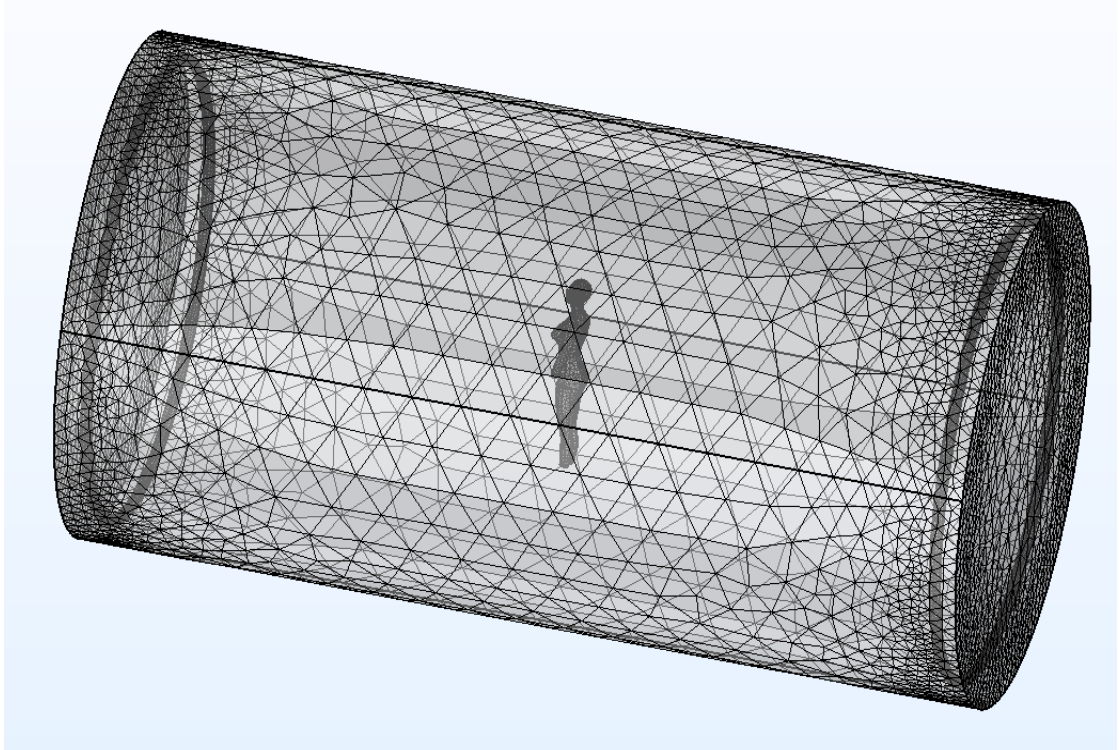


Figure 4-4 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL d'une géométrie simplifiée et maillée d'un corps humain dans un avion

4.4.5 Configuration physique

Nous avons simulé les effets combinés de tous les effets de rayonnement à deux altitudes différentes, 10 000 pieds et 50 000 pieds. Ces altitudes ont été choisies pour obtenir une différence notable entre les rayonnements électromagnétiques.

4.4.6 Résultats

L'objectif de cette étude est d'évaluer les radiations électromagnétiques sur le corps humain, les résultats seront donc traités sur le corps humain.

4.4.6.1 Flux magnétique

Les contours suivants montrent comment le flux magnétique traverse le corps humain dans un avion. Les zones les plus touchées sont clairement le cerveau, la poitrine, l'abdomen et les muscles des membres.

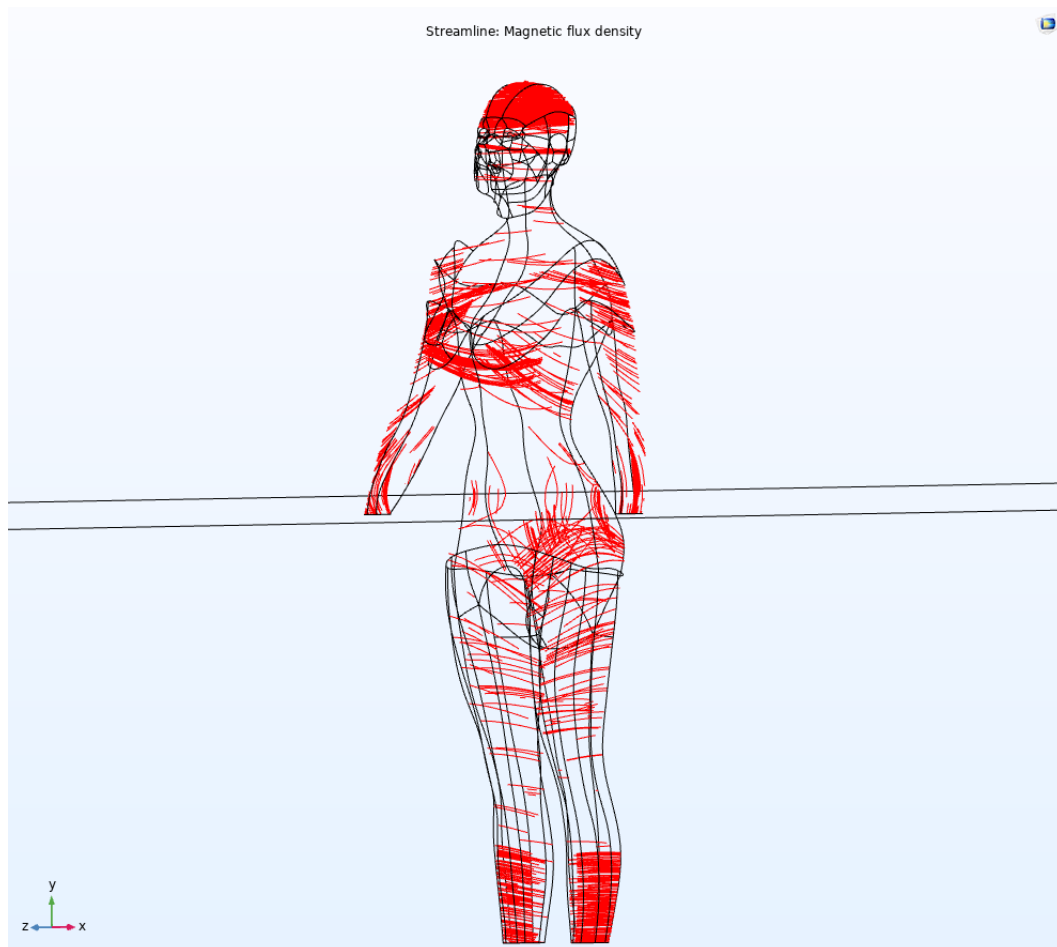


Figure 4-5 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la densité du flux magnétique à 10000ft d'altitude

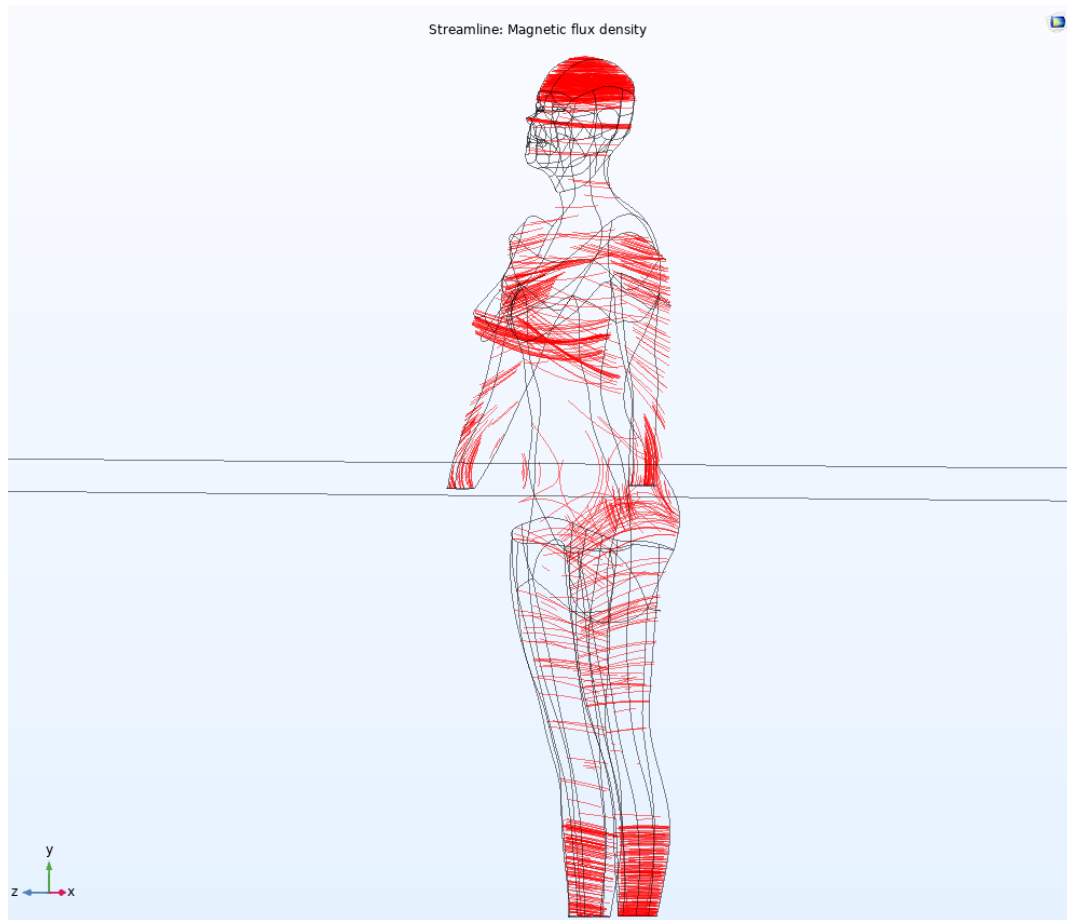


Figure 4-6 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la densité du flux magnétique à 50000ft d'altitude

4.4.6.2 Densité du flux magnétique

Les deux figures suivantes représentent la densité du flux magnétique sur la peau humaine à différentes altitudes

La figure 4-7 montre les contours de la norme de densité de flux magnétique sur le corps humain lorsqu'il est placé dans un avion complet volant à 10 000 pieds d'altitude dont la valeur maximale de la norme de densité de flux magnétique est de $2,9 \times 10^{-7}$ T, tandis que la valeur minimale de la norme de densité de flux magnétique est de $1,93 \times 10^{-9}$ T. Par

conséquent, à cette altitude, toute personne volant dans un avion subit une densité de flux magnétique sur son corps qui varie dans cette bande.

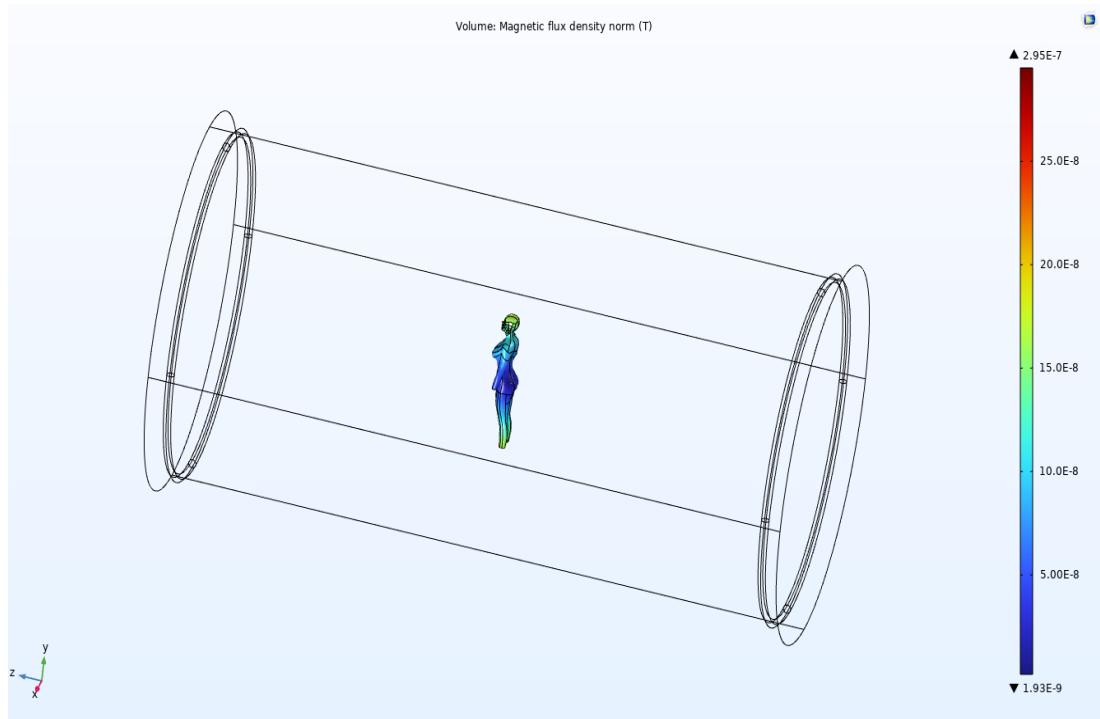


Figure 4-7 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL contours de la norme de densité de flux magnétique à 10000ft

La figure 4-8 montre les contours de la norme de densité de flux magnétique sur le corps humain lorsqu'il est placé dans un avion complet volant à 50 000 pieds d'altitude. Cette figure montre que la valeur maximale de la norme de densité de flux magnétique est de $2,95 \times 10^{-7}$ T, tandis que la valeur minimale de la norme de densité de flux magnétique est de $1,93 \times 10^{-9}$ T. Par conséquent, à cette altitude, toute personne volant dans un avion subit une densité de flux magnétique sur son corps qui varie dans cette bande. Cette situation peut sembler similaire à celle observée à 10 000 pieds, mais une analyse plus

poignée pourrait dissiper la confusion liée à l'existence d'une activité différente à différentes altitudes.

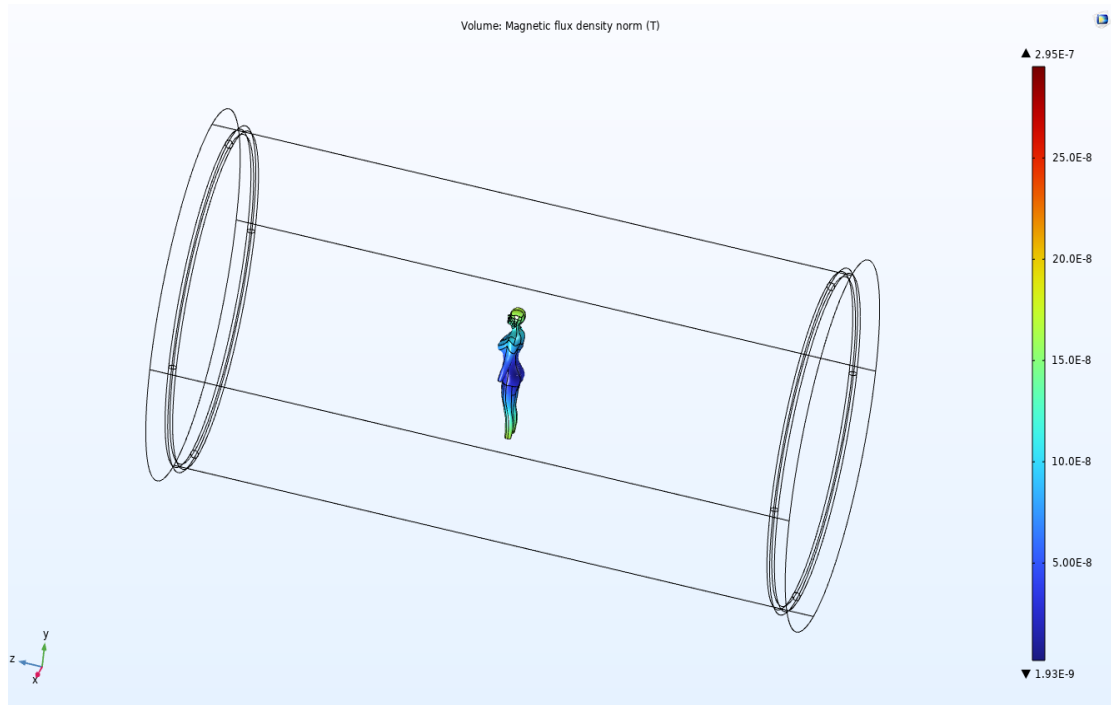


Figure 4-8 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL des contours de la norme de densité de flux magnétique à 50000ft

La figure 4-9 suivante montre les contours de la norme de densité du flux magnétique sur le corps humain à 10 000 pieds d'altitude en face. Nous pouvons clairement observer que les régions où l'activité est la plus forte sont la tête (cerveau) et les jambes. La raison est que les tourbillons circulant dans le corps de l'avion, qui produisent les radiations électromagnétiques les plus importantes, générant un champ magnétique qui affecte les parties du corps les plus proches des parois du fuselage ou, plus clairement, de la structure

métallique de l'avion. L'activité dans le cerveau atteint un maximum de 16×10^{-8} T. tandis que l'activité dans les jambes est d'environ 14×10^{-8} T. L'abdomen et les autres parties du corps ne présentent pas de fortes radiations magnétiques et se situent à un faible niveau de $1,93 \times 10^{-9}$ T. La région d'activité minimale se trouve également dans l'abdomen. Cependant, la région où l'activité est la plus élevée est celle des lèvres, avec une activité élevée de $2,95 \times 10^{-7}$ T.

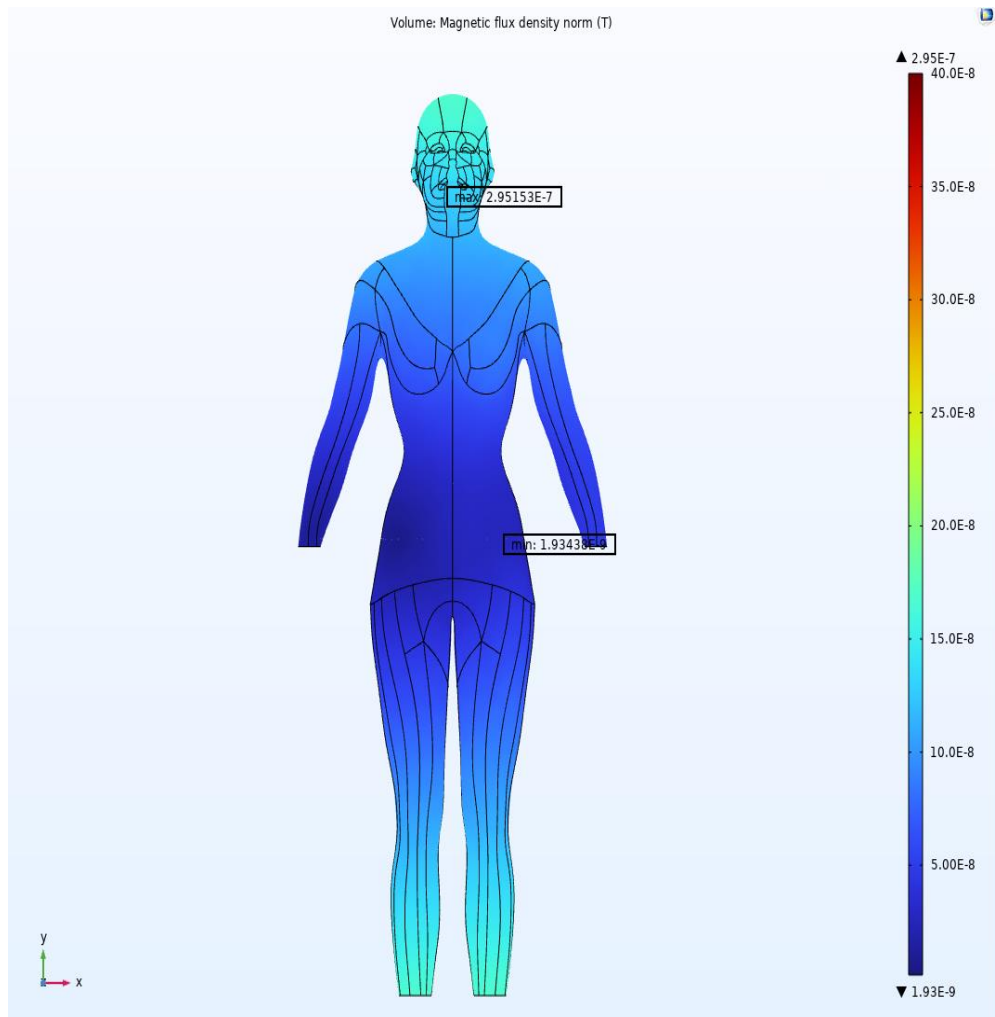


Figure 4-9 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la norme de densité du flux magnétique à 10000ft

La norme de densité de flux magnétique montrée sur le corps humain à 10 000 pieds d'altitude, vue de côté représentée par la figure 4-10 rend encore plus clairs les résultats expliqués dans la figure précédente et aucune autre explication n'est nécessaire à ce sujet. La seule conclusion à tirer ici est qu'aucune région de la vue latérale ne dépasse l'activité décrite dans la vue frontale.

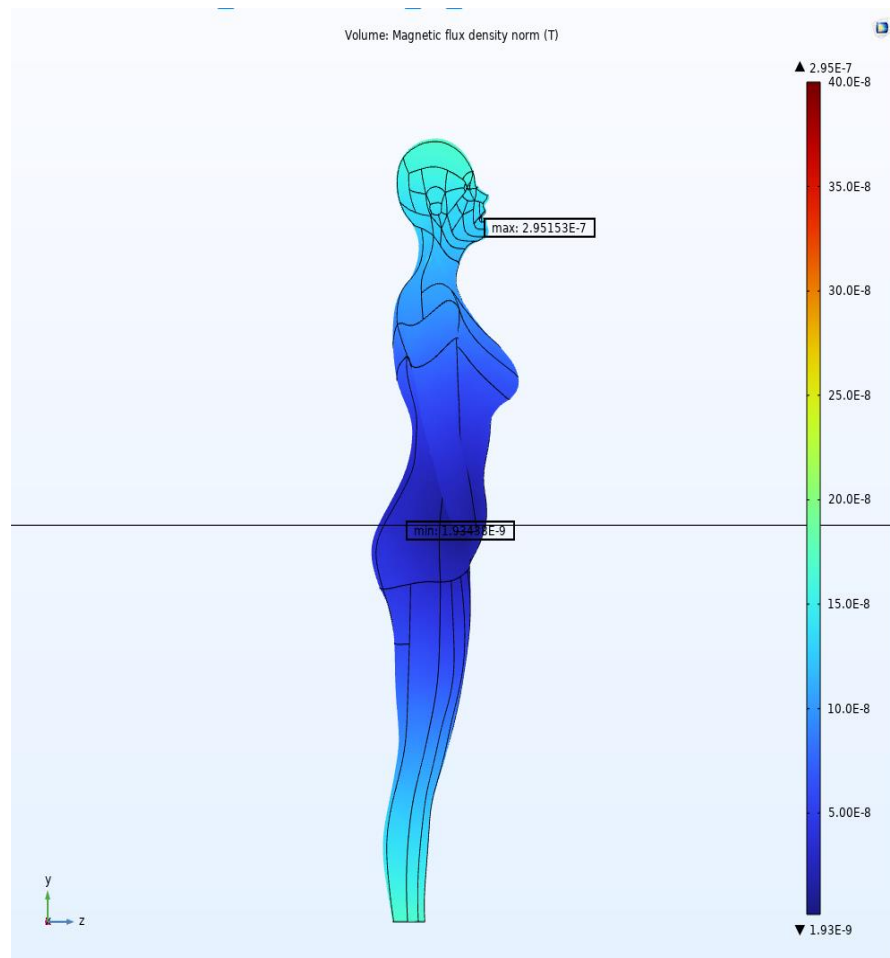


Figure 4-10 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la norme de densité du flux magnétique à 10000ft

La figure 4-11 s'agit des contours de la norme de densité du flux magnétique sur le corps humain à 50 000 pieds d'altitude vue de face. Nous pouvons clairement constater que les régions où l'activité est la plus forte sont la tête (cerveau) et les jambes. L'activité dans le cerveau atteint un maximum de 23×10^{-8} T. tandis que l'activité dans les jambes est d'environ 18×10^{-8} T. L'abdomen et les autres parties du corps ne montrent pas de forte quantité de radiations magnétiques et se situent à une faible quantité de $1,93 \times 10^{-9}$ T. La région d'activité minimale se trouve également dans l'abdomen. Cependant, la région où l'activité est la plus élevée est celle des lèvres, avec une activité élevée de $3,68 \times 10^{-7}$ T. En altitude, l'ampleur de la densité du flux magnétique a augmenté en raison de l'accroissement des effets solaires.

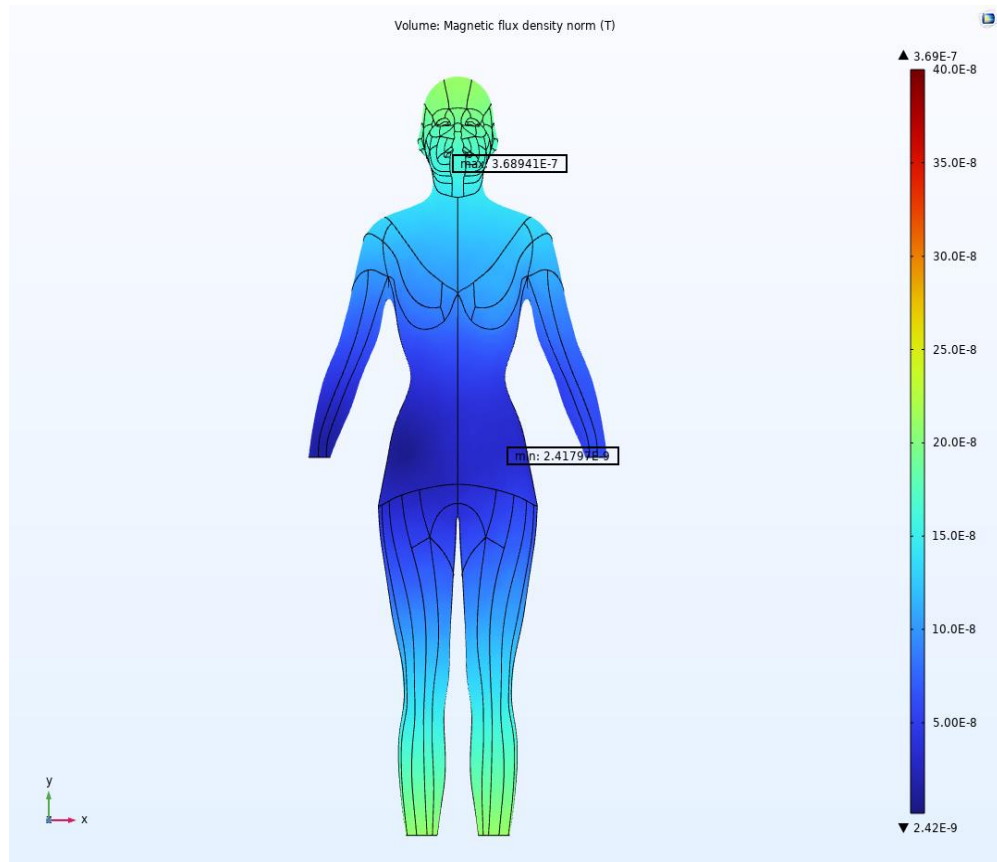


Figure 4-11 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la norme de densité du flux magnétique à 50000ft

La figure 4-12 s'agit des contours de la norme de densité de flux magnétique montrée sur le corps humain à 50 000 pieds d'altitude, vue de côté. Là encore, il n'y a pas d'autres résultats à expliquer à partir de la vue latérale. La seule conclusion à tirer ici est qu'aucune région de la vue latérale ne dépasse l'activité décrite dans la vue frontale.

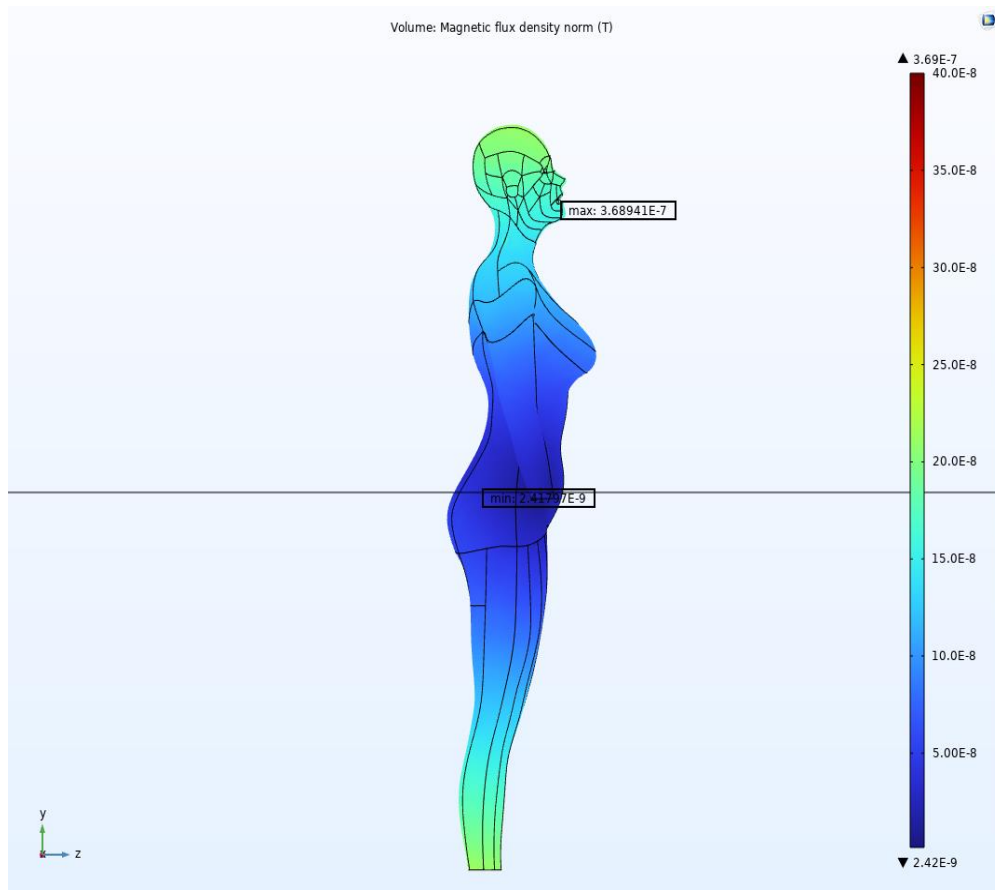


Figure 4-12 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la norme de densité du flux magnétique à 50000ft

Les contours ci-dessus montrent clairement une différence entre les deux activités d'altitude. Cependant, le modèle de rayonnement est le même aux deux altitudes car tous les autres facteurs ont été considérés comme similaires, seule la différence d'altitude est étudiée.

4.4.6.3 Densité d'énergie magnétique

En raison du passage d'ondes électromagnétiques à travers un corps, celui-ci peut recevoir l'énergie transférée par les ondes.

Voici les contours de la densité d'énergie magnétique sur le corps humain à une altitude de 10 000 pieds montrés sur les images 4-13 et 4-14. L'analyse précédente nous a déjà permis de constater que les régions où l'activité est la plus forte sont la tête (cerveau) et les jambes. L'activité dans le cerveau et les jambes s'élève cependant à un maximum de $10 \times 10^{-9} \text{ J/m}^3$, l'activité dans les jambes étant plus élevée que dans le cerveau. Cependant, l'activité dans ces deux parties se situe dans les 20 % inférieurs du domaine montré pour la magnitude de la densité d'énergie. L'abdomen et les autres parties du corps présentent une densité d'énergie magnétique plus faible, de l'ordre de $1,53 \times 10^{-12} \text{ J/m}^3$. La région d'activité minimale se trouve également dans l'abdomen. Cependant, la région où l'activité est la plus élevée est celle des lèvres, avec une activité extrêmement élevée de $4,6 \times 10^{-8} \text{ J/m}^3$. Cela peut être dû à la forme et au matériau des lèvres. De nombreuses recherches ont déjà montré que les lèvres devenaient très sèches et se déchiraient souvent pendant le vol. Cela pourrait être l'une des raisons, mais pour en être tout à fait sûr, des recherches supplémentaires sur cette partie du corps si délicate sont nécessaires.

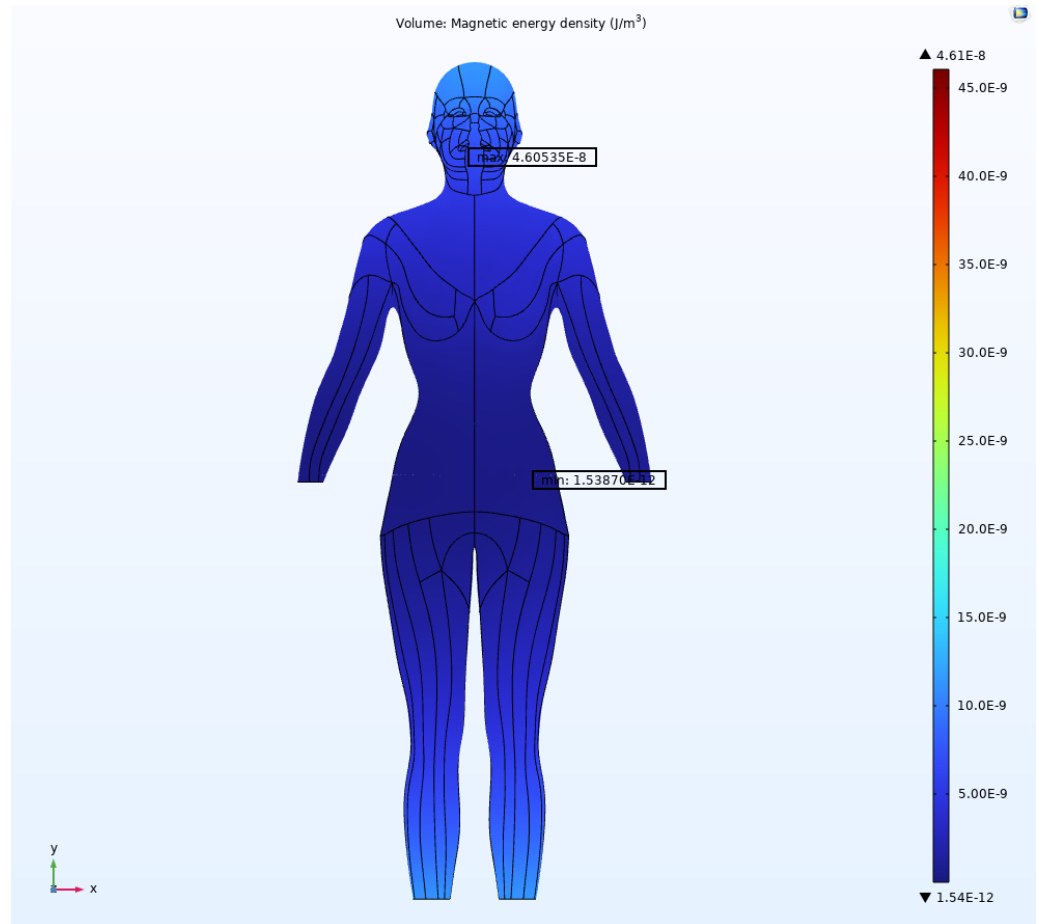


Figure 4-13 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la densité de l'énergie électromagnétique à 10000ft

Les contours de la densité d'énergie magnétique montrés sur le corps humain à 10 000 pieds d'altitude, en vue latérale. Cela rend encore plus clairs les résultats expliqués dans l'image précédente et aucune autre explication n'est nécessaire. Aucune région de la vue latérale ne dépasse l'activité décrite dans la vue frontale.

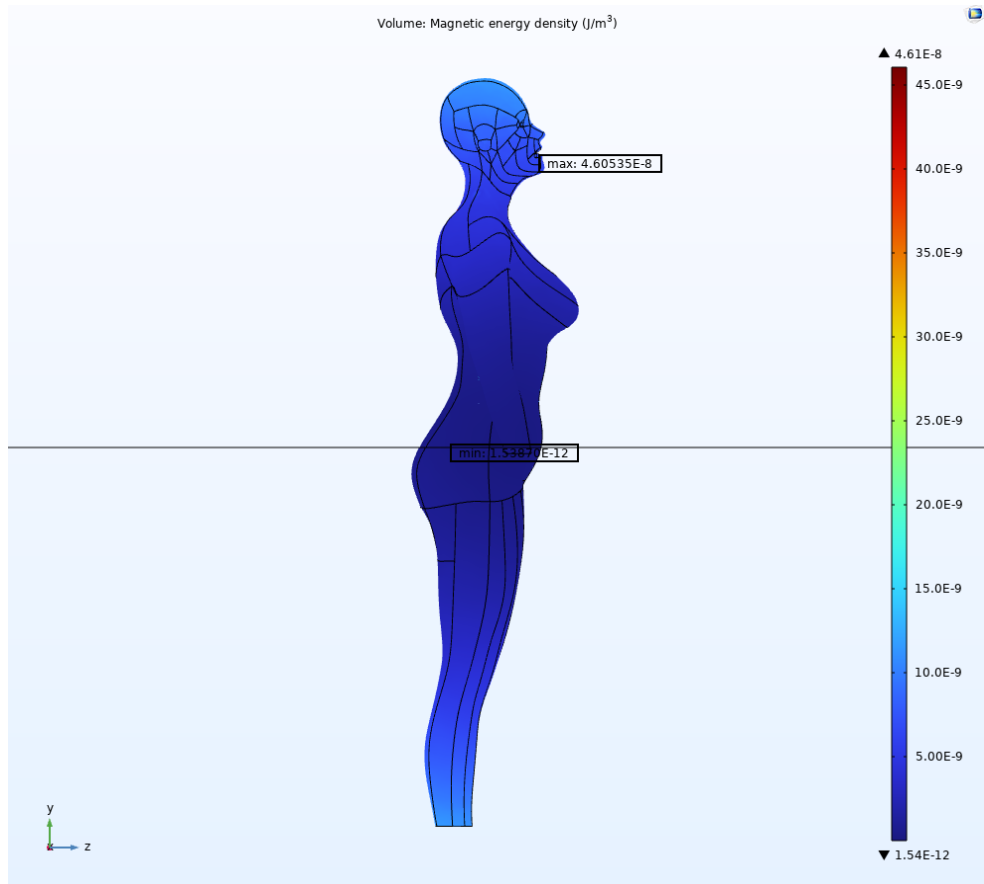


Figure 4-14 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la densité de l'énergie électromagnétique à 10000ft

La figure 4-15 suivante montre les contours de la densité d'énergie magnétique sur le corps humain à 50 000 pieds d'altitude. L'analyse précédente nous a déjà permis de constater que les régions où l'activité est la plus forte sont la tête (cerveau) et les jambes. L'activité dans le cerveau et les jambes s'élève toutefois à un maximum de $2 \times 10^{-8} \text{ J/m}^3$, l'activité dans les jambes étant plus élevée que dans le cerveau. Cependant, l'activité dans ces deux parties se situe dans les 30 % inférieurs du domaine indiqué pour la magnitude de la densité d'énergie. L'intensité globale à cette altitude est plus élevée qu'à 10 000 pieds. L'abdomen et d'autres parties du corps présentent une densité d'énergie magnétique encore

plus faible, de l'ordre de $2,4 \times 10^{-12} \text{ J/m}^3$. La région où l'activité est la plus faible se trouve également dans l'abdomen. Cependant, la région où l'activité est la plus élevée est celle des lèvres, avec une activité extrêmement élevée de $7,2 \times 10^{-8} \text{ J/m}^3$, soit presque le double de celle observée à 10 000 pieds d'altitude.

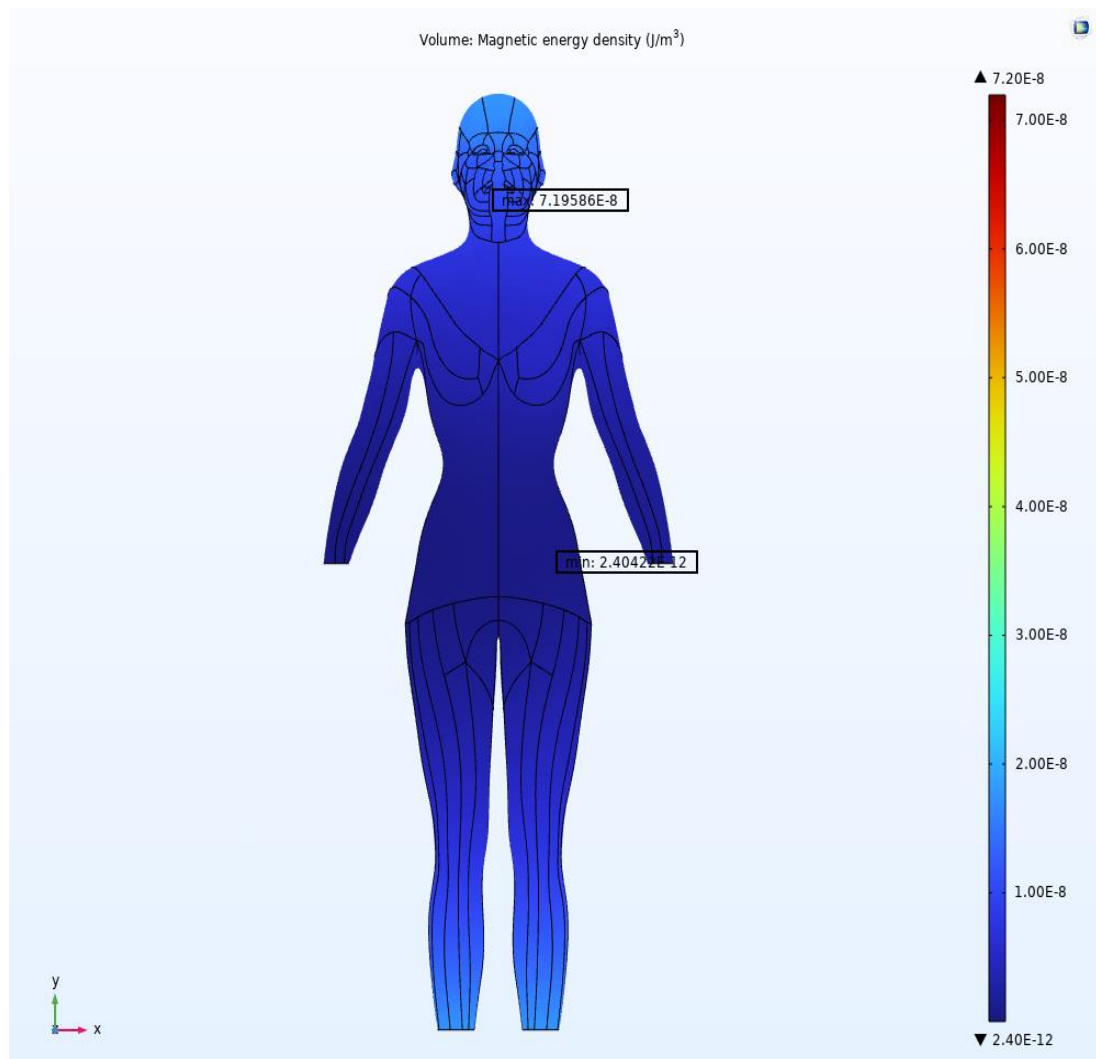


Figure 4-15 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la densité de l'énergie électromagnétique à 50000ft

Voici les contours de la densité d'énergie magnétique sur le corps humain à 50 000 pieds d'altitude, vue de côté montrés dans la figure 4-16. Cela rend encore plus clairs les résultats expliqués dans l'image précédente et aucune autre explication n'est nécessaire. Aucune région de la vue latérale ne dépasse l'activité décrite dans la vue frontale.

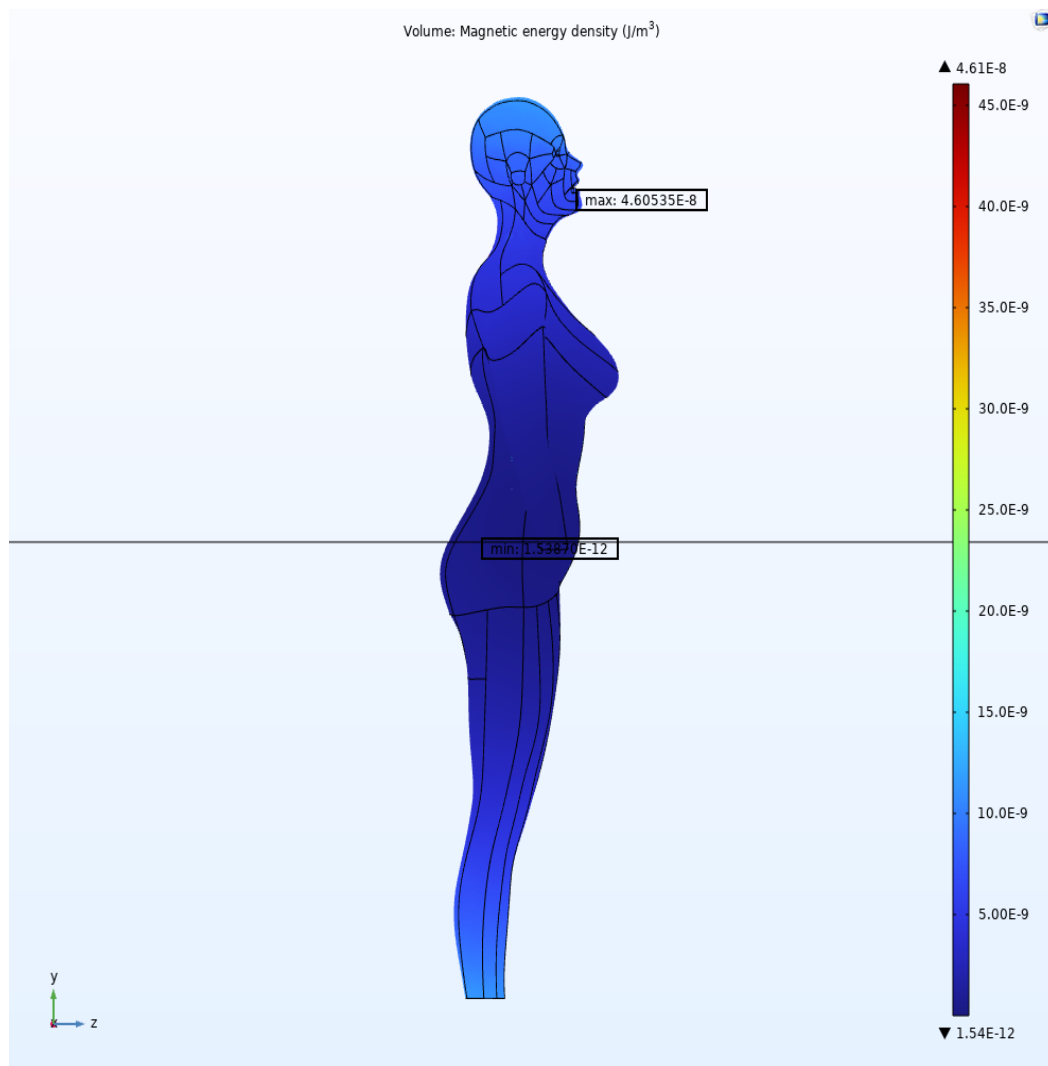


Figure 4-16 Capture d'écran du deuxième modèle élaboré avec COMSOL de la densité de l'énergie électromagnétique à 50000ft

Ces ondes peuvent sembler minimes, mais l'exposition à long terme à ces ondes peut être alarmante. Même de petites quantités de ces ondes ont un effet sur l'homme, comme l'augmentation de la température de l'oreille humaine due à l'exposition aux rayonnements et les rougeurs qui en résultent. L'exposition aux rayonnements peut également brûler la peau si un certain seuil est franchi. Le fonctionnement d'organes sensibles tels que les reins et les testicules est également affecté par ces radiations. De tels dysfonctionnements peuvent même entraîner de graves problèmes, comme la déshydratation et les troubles gastriques provoqués par une forte exposition à la chaleur pendant l'été.

4.5 Conclusion

Sur Terre, nous sommes protégés par le champ magnétique et l'atmosphère de la planète contre la majorité des particules qui composent l'environnement du rayonnement spatial. Malgré cela, chaque personne sur Terre est exposée chaque jour à de faibles niveaux de rayonnement, depuis la nourriture que nous consommons jusqu'à l'air que nous respirons. [32][33]

Dans l'espace, les astronautes sont exposés à des niveaux de rayonnement variés et accrus, différents de ceux sur Terre. Trois sources majeures contribuent à l'environnement de rayonnement spatial : les particules piégées dans le champ magnétique terrestre, les particules énergétiques solaires du Soleil et les rayons cosmiques galactiques.

Les champs électromagnétiques peuvent avoir des conséquences sur la santé de l'équipage. Leurs effets à court terme peuvent être :

- directs : échauffement des tissus biologiques, stimulation du système nerveux...
- indirects : incendie ou explosion dus à une étincelle ou à un arc électrique, dysfonctionnement de dispositifs électroniques y compris les dispositifs médicaux actifs comme les pacemakers, projection d'objets métalliques...

Ces effets peuvent malgré tout avoir des conséquences sur la sécurité des travailleurs dans certaines situations de travail.

La figure 4-17 représente les contours de la norme du champ magnétique lorsqu'un crâne est simulé dans un avion avec des radiations électromagnétiques, les radiations sont sensiblement inégales des deux côtés en fonction de la position du passager dans l'avion.

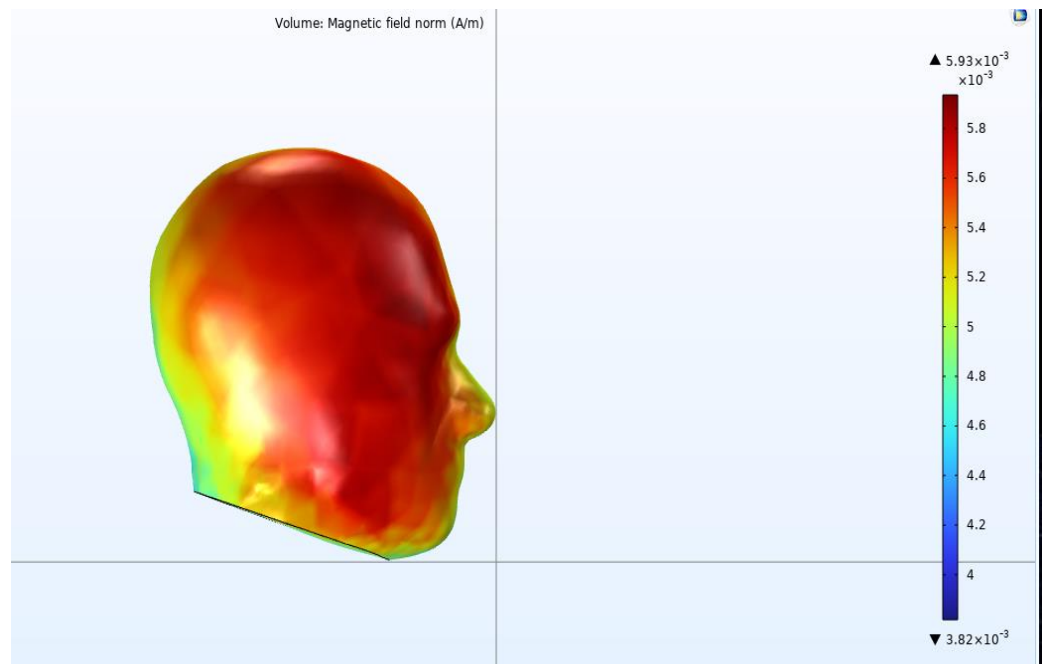


Figure 4-17 Capture d'écran de modèle élaboré avec COMSOL de la norme du champ magnétique

La norme du champ magnétique et la norme de la densité du flux magnétique formés par les ondes électromagnétiques générées dans un avion volant à haute altitude sont représentées dans les figures ci-dessus. On constate que leur ordre de grandeur est de l'ordre de 10^{-11} . Toutefois, ces faibles quantités peuvent également avoir des effets dommageables sur des organes humains essentiels tels que le cerveau, la moelle épinière et les organes reproducteurs.

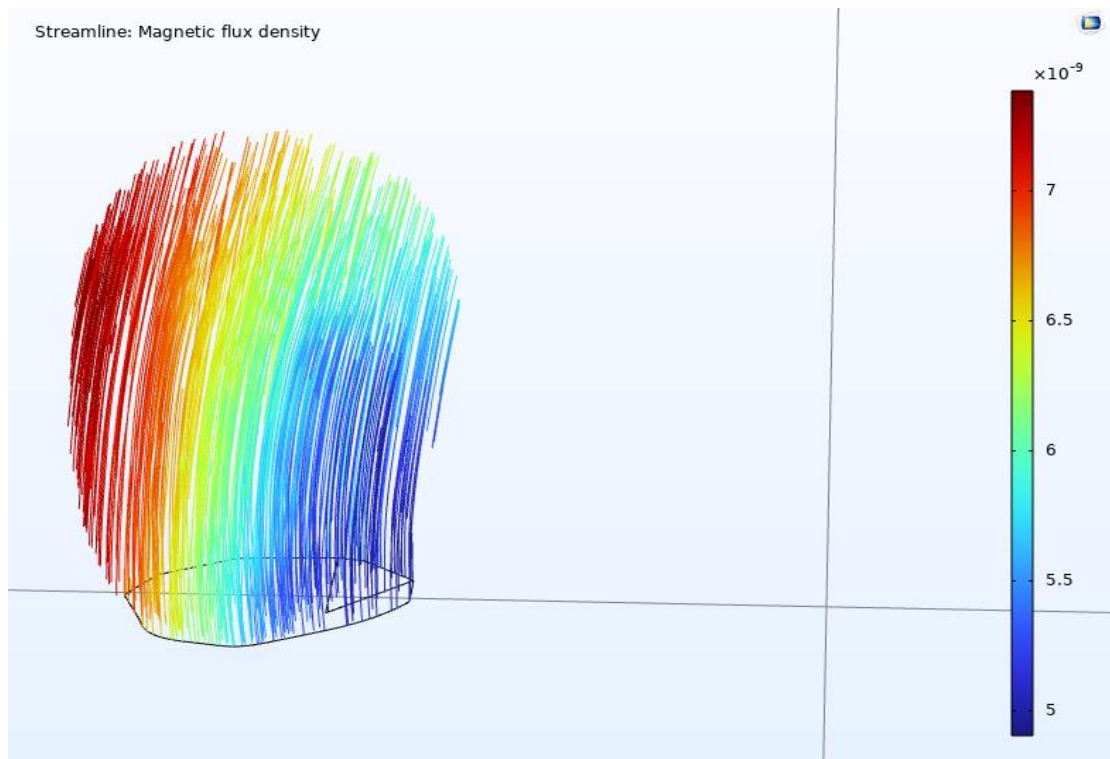


Figure 4-18 Capture d'écran de modèle élaboré avec COMSOL de la densité du flux magnétique

Un grand défi dans la réduction des risques d'exposition aux rayonnements réside dans le fait qu'il est difficile de se protéger contre certaines particules de rayonnement spatial (en particulier les rayons cosmiques galactiques). L'exposition à une augmentation des rayonnements peut être associée à des conséquences à court et à long terme sur la santé, en fonction de la quantité totale de rayonnement subie par les astronautes et de la période pendant laquelle ils subissent cette exposition.

Chapitre 5 - Conclusion

Il est largement reconnu que les composants électroniques au sein des systèmes électroniques des avions sont vulnérables aux dommages causés par les interactions hautement ionisantes des rayons cosmiques, des particules solaires et des particules secondaires générées dans l'atmosphère. Cette occurrence a été constatée à la fois au niveau du sol et à l'altitude des avions. De plus, des études ont démontré que l'intensité du champ géomagnétique terrestre influe sur la santé et les capacités cybernétiques des opérateurs humains.[34]

La NASA a identifié les problèmes de santé suivants liés aux rayonnements spatiaux comme étant des priorités de recherche élevées

1. Risque accru de cancers:

Les preuves des risques de cancer chez les humains exposés aux rayonnements sont nombreuses pour des doses supérieures à 100 millisieverts (mSv). Il existe des incertitudes concernant les doses plus faibles et le transfert des risques entre populations présentant des attributs génétiques et alimentaires différents.

L'épidémiologie humaine peut être appliquée aux expositions spatiales ; cependant, il existe des incertitudes supplémentaires liées à la qualité du rayonnement dans l'espace, alors que les doses à attendre lors des missions spatiales sont bien connues. La réduction des incertitudes dans l'évaluation des risques est nécessaire avant qu'une mission sur Mars

puisse être entreprise et a conduit à un certain nombre d'enquêtes sur la cancérogenèse et les maladies dégénératives.

Les grandes incertitudes des modèles de projection des risques ne pourront être réduites qu'en améliorant la compréhension de base des processus biologiques sous-jacents et de leur perturbation par le rayonnement spatial. Il est peu probable que le problème des risques radiologiques liés à l'exploration spatiale soit résolu par une simple contre-mesure, telle qu'un blindage ou des médicaments de radioprotection. Le risque ne pourra être compris et contrôlé que grâce à des recherches plus fondamentales dans le domaine de l'induction du cancer par les particules chargées.

2. Modifications de la fonction motrice et du comportement; troubles neurologiques :

À l'heure actuelle, il est impossible d'établir des projections fiables concernant les risques pour le système nerveux central liés à l'exposition aux rayonnements spatiaux en raison du nombre limité de données sur les effets des rayonnements élevés sur le système nerveux. Les données animales et cellulaires existantes montrent que les rayonnements de type spatial peuvent produire des effets moléculaires, structurels, fonctionnels et comportementaux à des doses comparables aux projections des missions de référence.

Si les réponses humaines ressemblent beaucoup à celles des modèles animaux, il existe une possibilité d'impacts sur les opérations de mission et/ou de changements dégénératifs tardifs. Cependant, l'importance de ces résultats en termes de performances opérationnelles des vols spatiaux ou de morbidité pour les astronautes n'a pas été expliquée.

Les simulations informatiques et les approches de biologie des systèmes peuvent être utiles pour fournir les données et les connaissances nécessaires pour évaluer la similitude entre les mécanismes de réponse des animaux et des humains. Les résultats basés sur des modèles de rongeurs devront peut-être être validés chez des espèces supérieures telles que les primates non humains.

Un programme de recherche vigoureux sera nécessaire pour résoudre ces problèmes et devra s'appuyer sur de nouvelles approches d'évaluation des risques et de validation des contre-mesures, car les propriétés uniques du SNC et ses modes de déficience sont intrinsèquement différentes de celles associées aux risques de cancer.

3. Défauts tissulaires dégénératifs tels que la cataracte, les maladies circulatoires et les maladies digestives:

L'association entre l'exposition aux rayonnements ionisants et le développement à long terme d'effets dégénératifs sur les tissus tels que les maladies cardiaques, les cataractes, les changements immunologiques et le vieillissement prématuré est bien établie pour des doses de rayonnement modérées à élevées. La majorité de ces preuves proviennent d'études épidémiologiques sur les survivants de la bombe atomique, les patients en radiothérapie et les travailleurs professionnellement exposés et sont étayées par des études en laboratoire utilisant des modèles animaux et des études sur les cataractes chez les astronautes.

Les risques de ces maladies dus à des expositions à faible débit de dose sont beaucoup plus difficiles à évaluer en raison de leur nature multifactorielle et des longues périodes de latence pendant lesquelles les animaux doivent être observés ; par conséquent, ces risques restent discutables pour l'ISS ou les missions lunaires à court terme, mais sont plus probables pour les missions lunaires ou martiennes à long terme. On n'est pas certain si les

expositions à faibles doses influencent les mêmes voies biologiques qui se sont révélées impliquées dans la progression de la maladie après des expositions aux rayonnements modérées à élevées.

Il faudra mener des recherches sur le rôle possible de l'inflammation chronique et de l'augmentation du stress oxydatif associé à l'exposition aux rayonnements spatiaux. À mesure que la durée de la mission augmente, il pourrait y avoir des risques dégénératifs sur d'autres tissus liés à des maladies digestives et à des modifications pulmonaires qui deviennent préoccupantes.

Risques de rayonnement aigu liés à un événement majeur de rayons cosmiques solaires ou galactiques :

Les effets biologiques des rayonnements spatiaux, y compris les risques de rayonnement aigu (ARS), constituent une préoccupation majeure pour les vols spatiaux habités. Les principales données actuellement disponibles proviennent d'analyses de patients médicaux et de personnes accidentellement exposées à de fortes doses de rayonnement. Des doses élevées de rayonnement peuvent provoquer un grave mal des rayons et la mort. Des doses de rayonnement plus faibles induisent des symptômes physiologiquement beaucoup plus légers, mais qui présentent des risques opérationnels qui peuvent être tout aussi graves. Les deux scénarios peuvent potentiellement affecter gravement la santé de l'équipage et/ou empêcher la réalisation des objectifs de la mission.

La NASA a établi des limites de dose à court terme pour prévenir les effets déterministes cliniquement significatifs sur la santé, y compris la dégradation des performances en vol. La radioprotection doit être assurée sous forme de blindage, de dosimétrie et de surveillance opérationnelles, ainsi que de contre-mesures biologiques lors

des voyages en dehors de la magnétosphère protectrice de la Terre. Les modèles prédictifs soutiennent l'évaluation des risques pour l'équipage, les exigences et décisions opérationnelles, ainsi que la conception efficace des abris pour véhicules afin de minimiser les expositions.

Alors que les futures missions de la NASA s'étendent à nouveau au-delà de l'orbite terrestre inférieure et maintenant pour des durées plus longues, il est raisonnable de craindre qu'un système immunitaire compromis en raison de doses élevées sur la peau provenant d'un événement de particules solaires puisse entraîner des risques accrus. Des données de recherche spécifiques à l'environnement des vols spatiaux sont en cours de compilation pour quantifier l'ampleur de ce risque accru et pour développer des modèles prédictifs et des stratégies de protection appropriés. En outre, des contre-mesures biologiques cliniquement pertinentes sont en cours d'identification et de validation pour les vols spatiaux [35]

Pour atténuer les perturbations d'origine artificielle, des actions peuvent être entreprises à deux niveaux. D'une part, au niveau de la source de la perturbation, en limitant les émissions électromagnétiques indésirables dès la conception du système responsable. D'autre part, au niveau du système affecté, en renforçant sa résistance aux perturbations extérieures.

Malheureusement, en ce qui concerne les perturbations d'origine naturelle, il est généralement impossible d'exercer une influence sur la source. Dans ces cas, la seule solution est de protéger les systèmes menacés. C'est pourquoi une connaissance précise des caractéristiques de la perturbation est essentielle pour mettre en place une protection efficace des systèmes vulnérables.

Tableau 1 Comparaisons des mesures du taux d'équivalence de dose du

rayonnement cosmique galactique (GCR) effectuées par les compteurs proportionnels à l'équivalent tissulaire cosmique galactique (GCR) sur plusieurs missions de la navette spatiale et de Mir avec les calculs du code HZETRN avec un modèle GCR (NCRP, 2006). Les calculs effectués avec un modèle GCR (NCRP, 2006).

Mission	Année	Altitude (Km)	Blindage	Taux d'équivalence de dose	
				Mesures	Calculs
STS-57	1993	298	Payload bay	0.442	0.434
MIR-18	1995	390		0.461	0.526
STS-81	1997	400	12-inch poly	0.290	0.297
STS-89	1998	393	3-inch A1	0.445	0.488

Le blindage des engins spatiaux est très important pour réduire les doses, mais il est difficile pour de nombreuses raisons, telles que les limitations de poids et les problèmes de stabilité et de sécurité.

Il est bien connu que les matériaux ayant un nombre atomique élevé, comme le plomb, sont efficaces pour le blindage des installations nucléaires.

Toutefois, la situation est différente dans l'espace, car le rayonnement cosmique de haute énergie produit de nombreuses particules secondaires à l'intérieur des matériaux de protection, en particulier dans les matériaux à numéro atomique élevé.

En général les matériaux composites présentent certains avantages par rapport aux autres matériaux. Ils présentent une rigidité plus élevée, d'excellentes caractéristiques mécaniques, et d'excellentes résistances à la fatigue et à la corrosion. Un autre avantage des matériaux composites est qu'ils ne favorisent pas la propagation des dommages lors de choc par exemple. Ce type de matériaux apporte aussi une grande souplesse au niveau de la conception.

Néanmoins ces matériaux présentent certains inconvénients :

- résistance limitée aux chocs
- mauvaise conductivité électrique
- tenue limitée aux températures élevées
- sensibilité au vieillissement en milieux humide

Garantir la sécurité dans le secteur des aérien est une question cruciale qui exige des efforts considérables. Si les opérateurs portent une part importante de la responsabilité, les gouvernements des pays sont également très concernés par les risques associés, en raison de la vitesse élevée des avions, les cabines et les charges considérables qu'ils transportent. De plus, dans le domaine des transports publics, le moindre dysfonctionnement peut prendre des proportions considérables. [36]

Bibliographie

- [1] H. Tarhini, “Étude de la susceptibilité des cartes des circuits imprimés face aux agressions électromagnétiques de Fortes Puissances,” vol. 9, no. 0 5, p. 1 vol. (169 p.), 2008 (accessed Jan. 24, 2024).
- [2] D. U. Qu et al., “Université du québec mémoire présenté,” 2017 (accessed Feb. 07, 2023).
- [3] “Tout savoir sur l’histoire et l’évolution de l’aviation.” <https://www.aviation-ancienne.fr/la-merveilleuse-histoire-de-laviation/> (accessed Mar. 14, 2024).
- [4] F. Ferber, L’aviation - ses débuts : son développement. Berger-Levrault, 1908 (accessed May. 21, 2024).
- [5] “Aviation History: Six Periods.” <https://chatgpt.com/share/edeb719b-0e8a-4946-a788-6b828bbebf80> (accessed Jul. 15, 2024).
- [6] F. Ferber, L’aviation : ses débuts : son développement : de crête à crête, de ville à ville, de continent à continent. Berger-Levrault, 1908 (accessed May. 21, 2024).
- [7] A. de Baillencourt-Courcol, L’époque héroïque de l’aviation en Haute-Loire. Le Puy-en-Velay: Cahiers de la Haute-Loire, 1967 (accessed May. 21, 2024).

- [8] B. Marck, “Le rêve de vol: mythes, légendes et utopies,” p. 209, 2006 (accessed May. 21, 2024).
- [9] “Composante de base d’un aeronef - 514 Mots | Etudier.” <https://www.etudier.com/dissertations/Composante-De-Base-d’Un-Aeronef/323932.html> (accessed Mar. 27, 2023).
- [10] “▷ Avión blanco PNG Imagenes gratis 2024 | PNG Universe.” https://www.pnguniverse.com/transporte/avion-blanco/#google_vignette (accessed Apr. 30, 2024).
- [11] “Lutte contre les feux de forêts : Kamel Beldjoud annonce l’acquisition prochaine d’avions anti-incendies - Times Algérie.” <https://www.timesalgerie.com/lutte-contre-les-feux-de-forets-kamel-beldjoud-annonce-lacquisition-prochaine-davions-anti-incendies/> (accessed Aug. 21, 2024).
- [12] “Dassault Mirage 2000N - France - Armée de l’air | Photo d’aviation n° 1427298 | Airliners.net.” <https://www.airliners.net/photo/France-Air-Force/Dassault-Mirage-2000N/1427298> (accessed Aug. 21, 2024).
- [13] S. Propulsif, “Systeme propulsif,” pp. 79–99 (accessed Feb. 07, 2023).
- [14] “Safran : 100e livraison d’un ensemble propulsif de l’A320neo.” <https://www.boursier.com/actions/actualites/news/safran-100e-livraison-d-un-ensemble-propulsif-de-l-a320neo-723888.html?rss> (accessed Apr. 30, 2024).
- [15] N. Lallbeeharry, “Réseaux d ’ énergie embarqués dans les systèmes de transport : communication et diagnostic passif par Courant Porteur en Ligne (CPL) Navish

Lallbeeharry To cite this version: HAL Id: tel-03624173 Réseaux d ' énergie Embarqués dans les Systèmes de Tran,” 2022 (accessed Feb. 07, 2023).

- [16] “lacroixelectronics_avionics_visuel_applications_fr.png (1581×945).”
https://www.lacroix-electronics.de/wp-content/uploads/sites/3/2019/03/lacroixelectronics_avionics_visuel_applications_fr.png (accessed Apr. 30, 2024).
- [17] O. Langlois, E. Foch, X. Roboam, and H. Piquet, “L’avion plus électrique : vers une nouvelle génération de réseaux de bord,” Accessed: May 30, 2024. [Online]. Available: <https://hal.science/hal-02537793> .
- [18] “Les défis de l’électrification des avions | CNRS Le journal.”
<https://lejournal.cnrs.fr/articles/les-defis-de-lelectrification-des-avions> (accessed May 30, 2024).
- [19] A. Jazzar, A. Jazzar, and A. Université, “Modélisation électromagnétique d ’ un choc de foudre en aéronautique To cite this version : HAL Id : tel-00789991 Modélisation Electromagnétique d ’ un Choc de Foudre en Aéronautique,” 2013 (accessed Jan. 25, 2024).
- [20] “? Compatibilité électromagnétique : définition et explications.”
<https://www.techno-science.net/definition/3262.html> (accessed Jan. 19, 2024).
- [21] H. Cheaito, “Modélisation CEM des Équipements Aéronautiques: aide à la qualification de l’essai BCI,” Thèse Dr. Ec. Cent. Lyon, pp. 1–161, 2017 (accessed Feb. 07, 2023).

- [22] “Rayonnement cosmique : pourquoi nous ne devrions pas nous inquiéter | AIEA.”
<https://www.iaea.org/fr/newscenter/news/rayonnement-cosmique-pourquoi-nous-ne-devrions-pas-nous-inquieter-en-anglais> (accessed Jun. 25, 2022).
- [23] Y. Laarouchi, “Sécurités (immunité et innocuité) des architectures ouvertes à niveaux de criticité multiples: application en avionique,” 2009, [Online]. Available: <http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00468923/> (accessed Jan. 04, 2024).
- [24] “Simulating Antenna Crosstalk on an Airplane | COMSOL Blog.”
<https://www.comsol.com/blogs/simulating-antenna-crosstalk-on-an-airplane/?setlang=1> (accessed Nov. 22, 2023).
- [25] “Simulation de diaphonie d’antenne sur un avion | Blog COMSOL.”
<https://www.comsol.com/blogs/simulating-antenna-crosstalk-on-an-airplane/?setlang=1> (accessed Apr. 30, 2024).
- [26] “hqdefault.jpg (480×360).” <https://i.ytimg.com/vi/OOZBb6o9NQ0/hqdefault.jpg>
(accessed Apr. 30, 2024).
- [27] “Rayonnement cosmique et aviation - Parlons sciences.”
<https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/rayonnement-cosmique-et-aviation> (accessed Apr. 30, 2024).
- [28] “Mission | ONERA.” <https://www.onera.fr/fr/aeronautique> (accessed Apr. 30, 2024).
- [29] “Foudre, éclair, tonnerre expliqués.” <https://chatgpt.com/share/9d0a8089-ee0e-4ea7-8f22-0789ba6a2467> (accessed Jul. 15, 2024).

- [30] Y. Wang et al., “Additional flight delays and magnetospheric–ionospheric disturbances during solar storms,” *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–8, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-30424-2 (accessed Jan. 12, 2024).
- [31] A. C. Mendes Prado et al., “Simulation of cosmic radiation transport inside aircraft for safety applications,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 56, no. 5, pp. 3462–3475, 2020, doi: 10.1109/TAES.2020.2985304 (accessed Mar. 14, 2024).
- [32] “Rayonnement cosmique : pourquoi nous ne devrions pas nous inquiéter | AIEA.” <https://www.iaea.org/fr/newscenter/news/rayonnement-cosmique-pourquoi-nous-ne-devrions-pas-nous-inquieter> (accessed May 17, 2024).
- [33] “Rayonnement spatial - NASA.” <https://www.nasa.gov/hrp/radiation/> (accessed May 17, 2024).
- [34] “Aviation accidents and incidents - Wikipedia,” vol. 067, no. November 2003, pp. 30–34, 2012, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Aviation_accidents_and_incidents (accessed Jan. 12, 2024).
- [35] “Risques liés aux rayonnements spatiaux - NASA.” <https://www.nasa.gov/hrp/radiation/space-radiation-risks/> (accessed May 21, 2024).
- [36] L. SADOUDI, “Étude Et Développement D’Une Plateforme De Communication Pour Les Réseaux De Capteurs Acoustiques Sans Fil : Application Au Contrôle-Santé Des Rails Par Corrélation Du Bruit Ambiant,” 2016, [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01416564%0Ahttp://files/2140/Sadoudi> - 2016 -

Étude et développement d'une plateforme de communi.pdf%0Ahttp://files/2141/tel-01416564.html (accessed Jan. 09, 2024).

