



Le corps humain et les voyages dans l'Espace

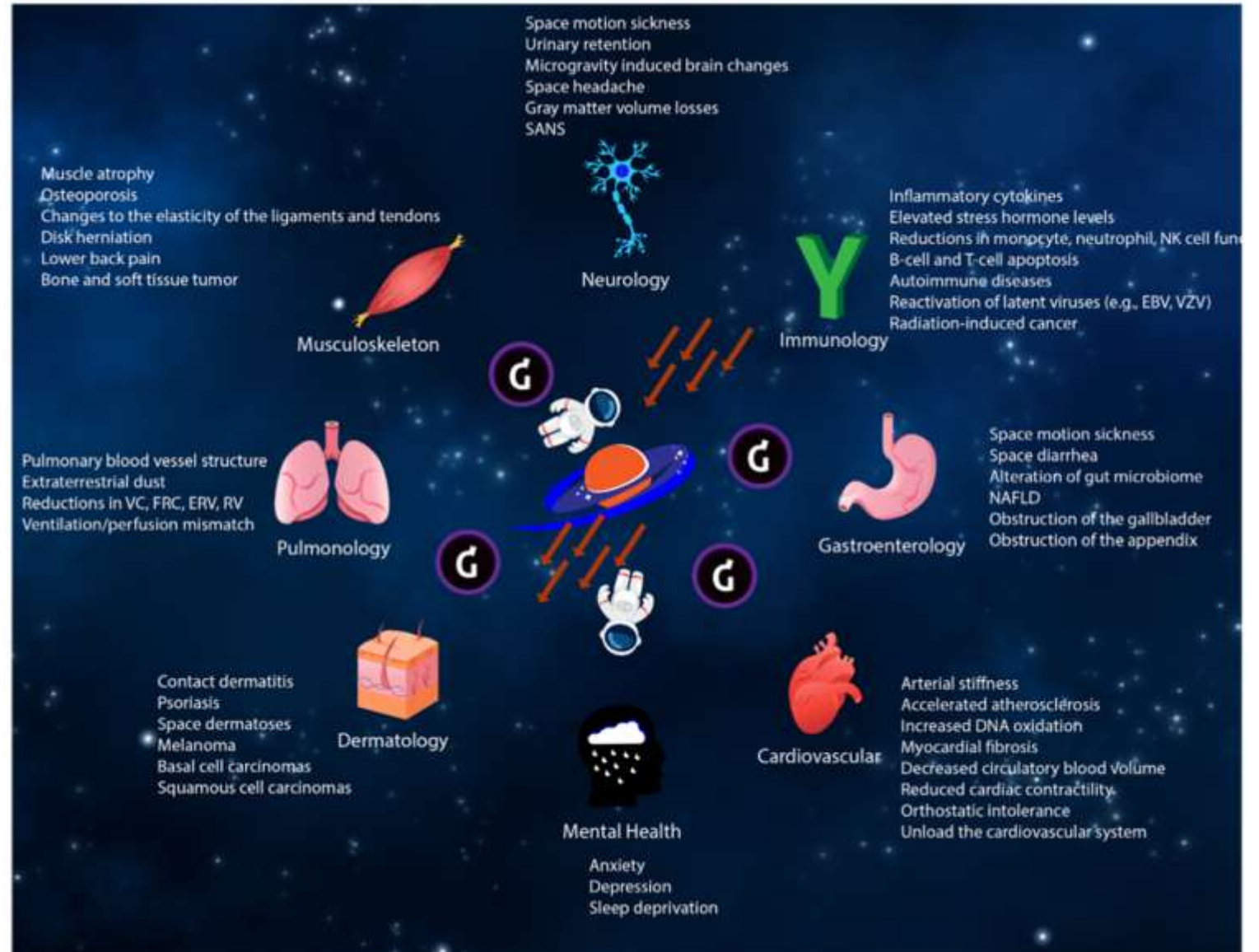
Dr Florence Lelièvre

Société Astronomique de Montgeron

10 janvier 2026

Les défis de l'espace pour l'être humain

Absence de gravité,
radiations et
confinement:
on n'est pas faits pour!



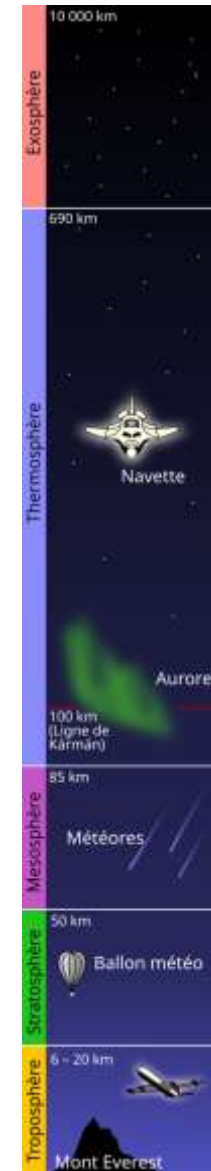


Le plan

- Définissons précisément
 - L'espace : où?
 - Apesanteur? Microgravité? Les termes
 - Vent solaire et magnétosphère
- Et voyons quelles conséquences tout ça aura sur notre organisme

Les voyages dans l'Espace

- Limite de l'Espace : ligne de Karman = 100 km au dessus du niveau de la mer
- Altitude où l'atmosphère n'est plus assez dense pour l'aéronautique classique
- 3 niveaux :
 - Suborbital
 - Orbite basse Terrestre (ex l'ISS)
 - Missions spatiales exploratoires (vers la Lune, vers Mars)

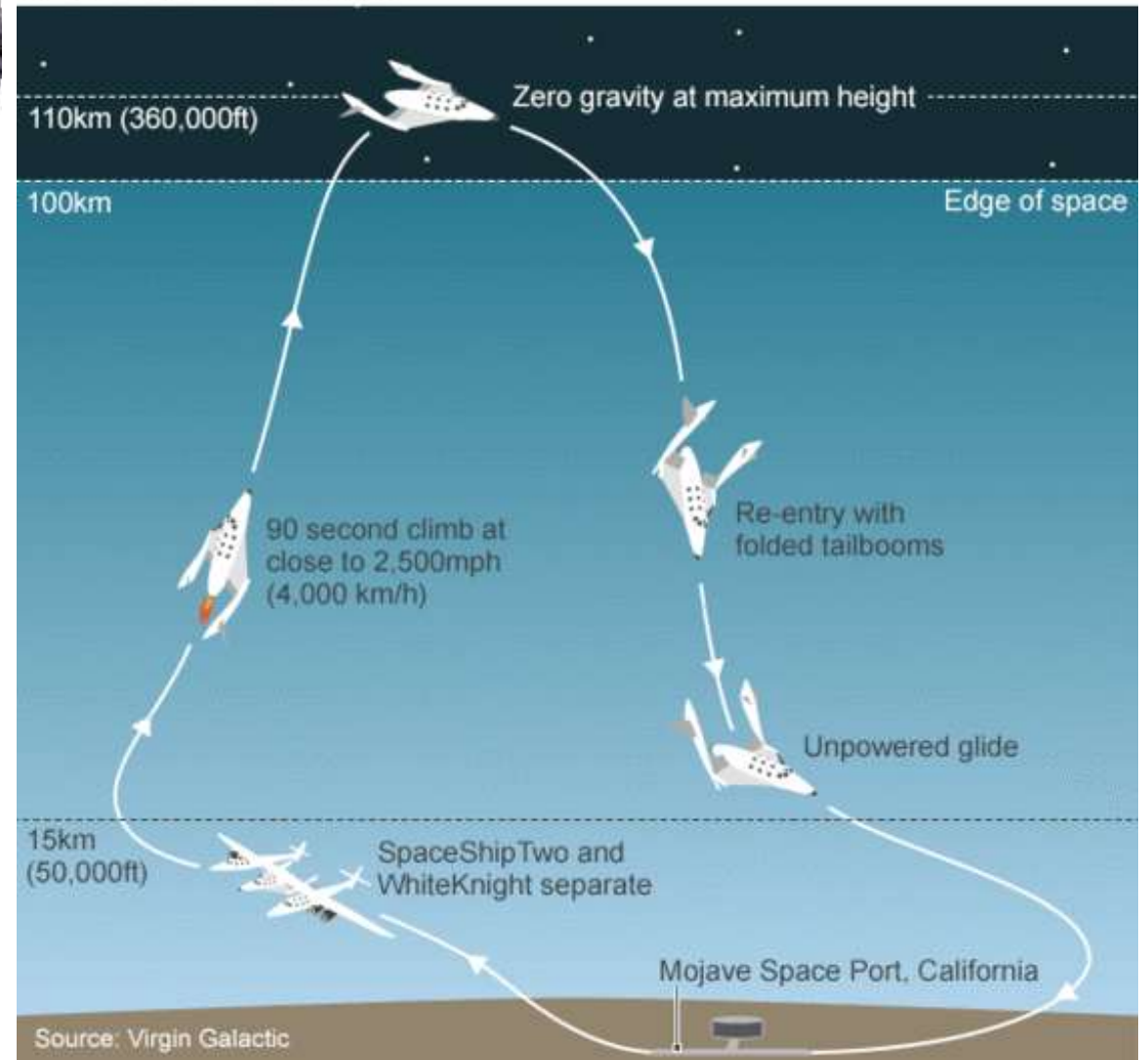


En suborbital

- Durée courte, quelques heures, avec quelques minutes d'exposition à la microgravité et à l'apesanteur
- Exposition à plusieurs G d'accélération-décélération
- La pression dans la cabine est équivalente aux vols commerciaux



SpaceShipTwo flight plan



Les effets sur la santé d'un vol suborbital sont généralement faibles vu la courte durée



Microgravité brève : Le vol suborbital entraîne quelques minutes d'apesanteur, ce qui peut provoquer des sensations de désorientation ou un léger mal des transports chez environ 70% des personnes sensibles.



Effets vestibulaires : Les phases de montée rapide avec des accélérations importantes (hypergravité) peuvent causer des conflits sensoriels au niveau de l'oreille interne, à l'origine de vertiges ou de nausées passagères.



Exposition aux radiations : L'exposition aux rayonnements cosmiques est très limitée lors d'un vol suborbital car il ne quitte pas durablement la magnétosphère terrestre et la durée est courte. La dose reçue est proche de celle d'un long vol en avion et sans effet notable sur la santé.



Risque d'accidents physiques mineurs : En apesanteur, les chocs ou collisions entre passagers sont possibles, avec un risque accru de contusions légères



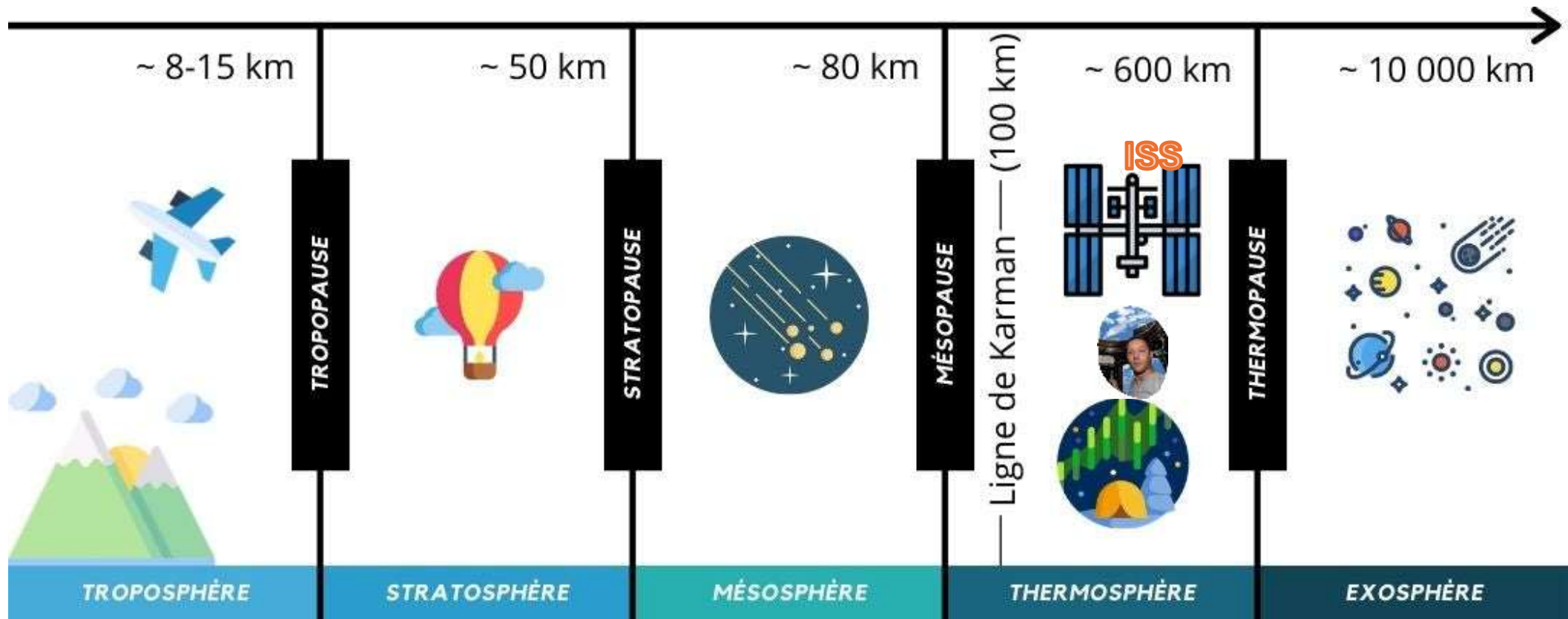
Vols suborbitaux, en résumé

Ces vols sont déconseillés pour les personnes avec des problèmes vestibulaires sévères, cardiaques ou osseux graves, du fait des accélérations et des contraintes mécaniques.

L'apesanteur très brève n'entraîne pas d'atrophie musculaire ni osseuse, ni d'altération immunitaire comme dans les vols spatiaux de longue durée.

En orbite basse

Altitude comprise entre 200–400 km. C'est là que presque toute l'exploration spatiale se passe! De Vostok 1 (URSS - 1961) à l'ISS aujourd'hui



Explorer l'Espace au-delà de la basse orbite terrestre

- Expéditions vers la Lune, Mars, les points de Lagrange et les astéroïdes
- Missions longues, lointaines et bien différentes de notre “grande” expérience des vols habités!



Microgravité ou micropesanteur ou impesanteur ?

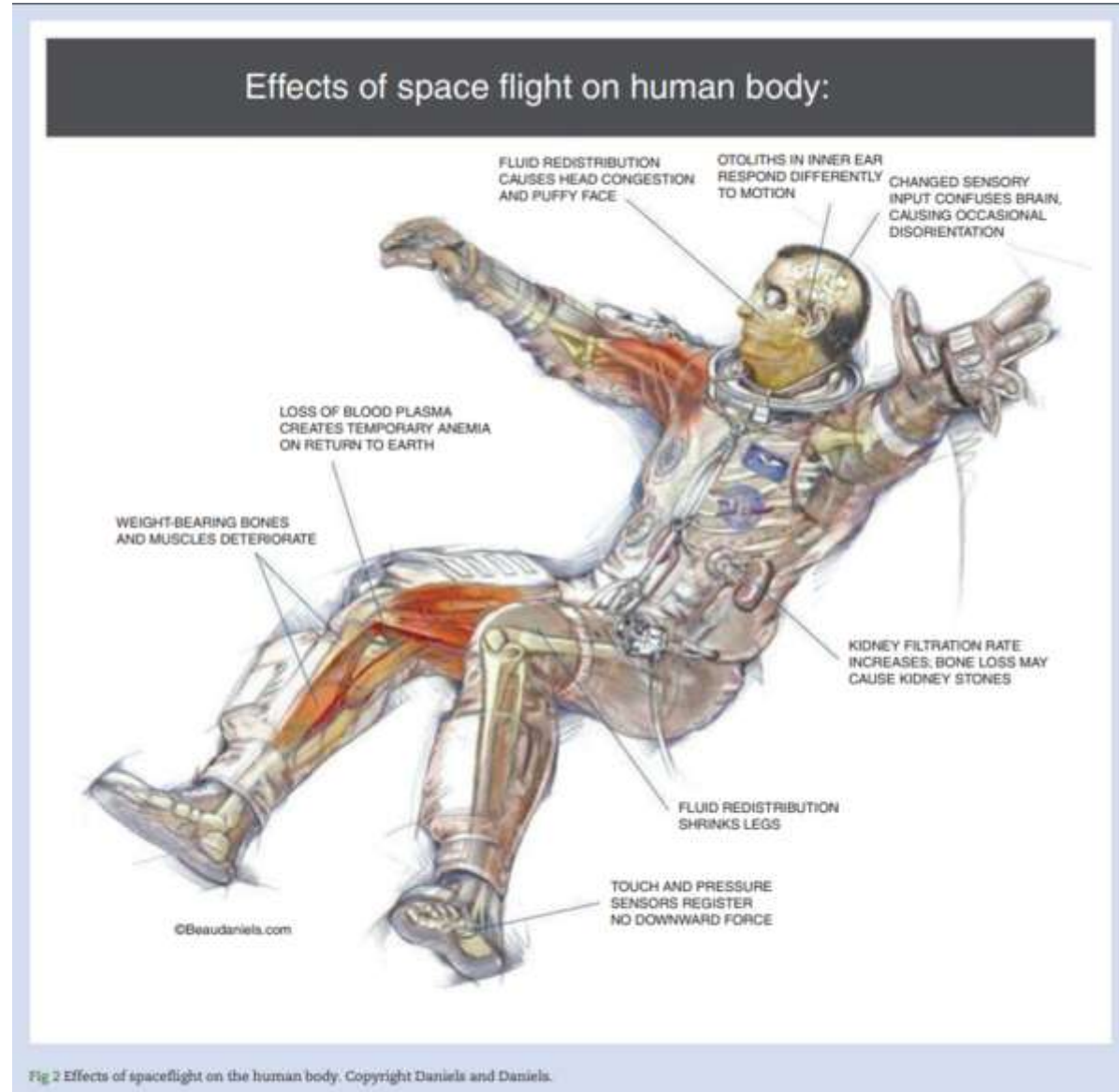
- En orbite, un spationaute subit une pesanteur très réduite, 1000 fois plus faible que la pesanteur terrestre, la **micropesanteur**
- Ce qui, en anglais, se dit **microgravity** - traduit par "microgravité" alors que ce mot EN FRANCAIS désigne la quasi-absence de force d'origine gravitationnelle (et il faut être à 200000 km de la Terre)
- Impesanteur = apesanteur (mais moins de risque de confusion!)

Microgravité ou micropesanteur ou impesanteur dans l'ISS?

- “...Construisons une tour de 400 km de haut : un homme (pesant 700 newtons au sol) verrait son poids (force d'attraction que la Terre exerce sur lui) diminuer de... 11 % s'il se pesait à son sommet.
- À 400 km la force de gravité est conséquente: c'est cette force qui retient captive autour de la Terre la station ISS
- Si les passagers essaient de se peser: leur poids est nul car leur vaisseau est en chute libre autour de la Terre.
- Alors, à 400 km, il y a de la gravité, oui, mais plus de pesanteur ! On est bien en impesanteur (ou en micropesanteur, pour les puristes), disons en "pesanteur très réduite" pour faire plaisir à tout le monde.”

- *Jean-Pierre Penot,
ancien vulgarisateur
scientifique au CNES*

L'absence de gravité sur le corps humain en résumé



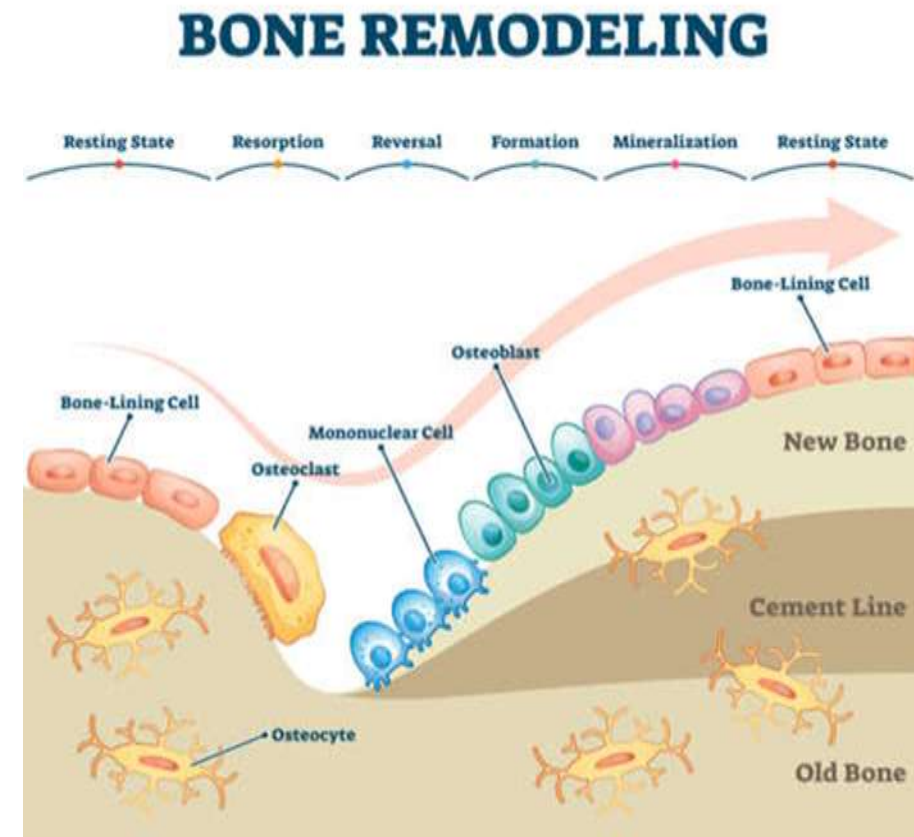
Effet de la microgravité sur le remodelage osseux : déminéralisation osseuse rapide, de l'ordre de 1 à 1.5% /mois

Diminution de la charge mécanique

réduction de la stimulation des ostéocytes, qui détectent les contraintes mécaniques

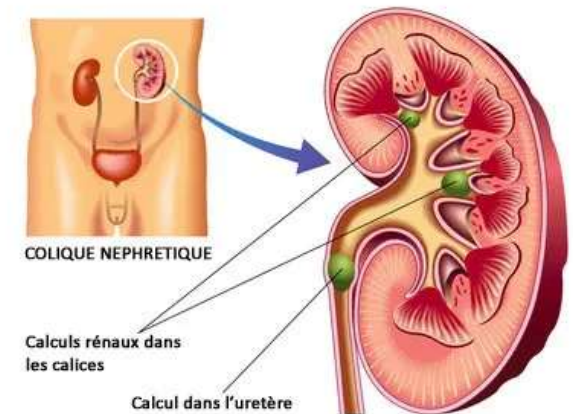
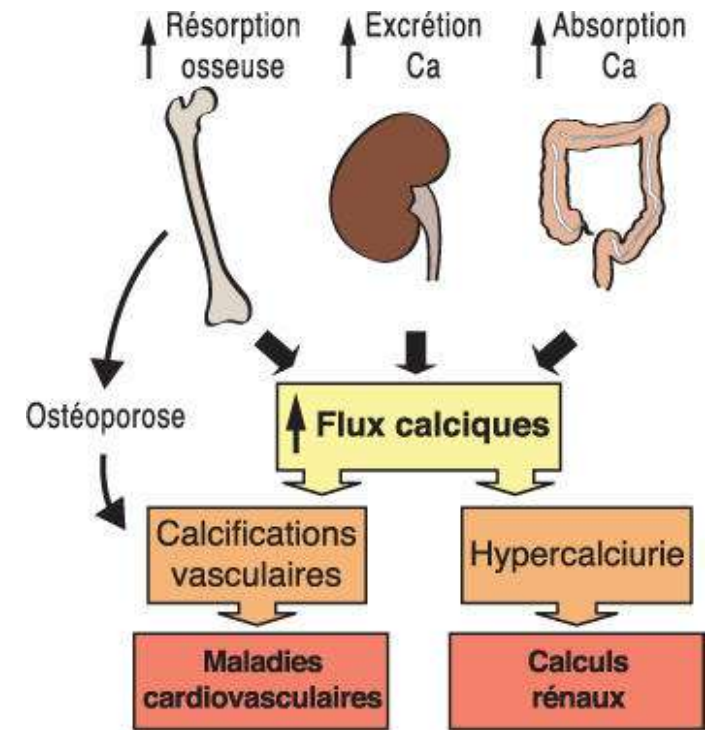
diminution de l'activité ostéoblastique (formation osseuse) et une augmentation de l'activité ostéoclastique (résorption osseuse)

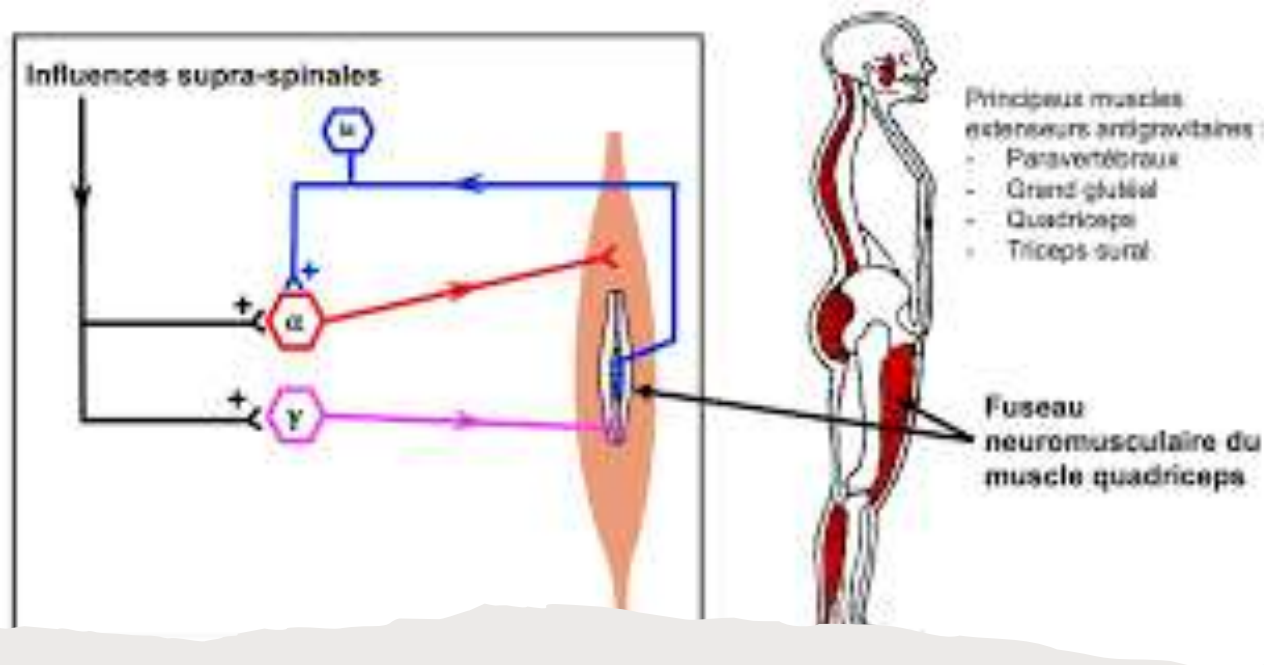
perte nette de masse osseuse, notamment dans les os porteurs (fémur, colonne).



Effet sur l'homéostasie calcique et formation de lithiase calcique = risque fréquent et sérieux pour les astronautes lors des missions longues

- La résorption osseuse augmente la libération de calcium dans le sang, induisant hypercalciurie (excès de calcium dans les urines).
- L'augmentation de calcium urinaire favorise la formation de calculs rénaux (lithiases calciques).
- La redistribution des fluides (cf + loin) est interprétée comme une hypervolémie => modifie la concentration des ions et des substances dans les urines, augmentant le risque de cristallisation.

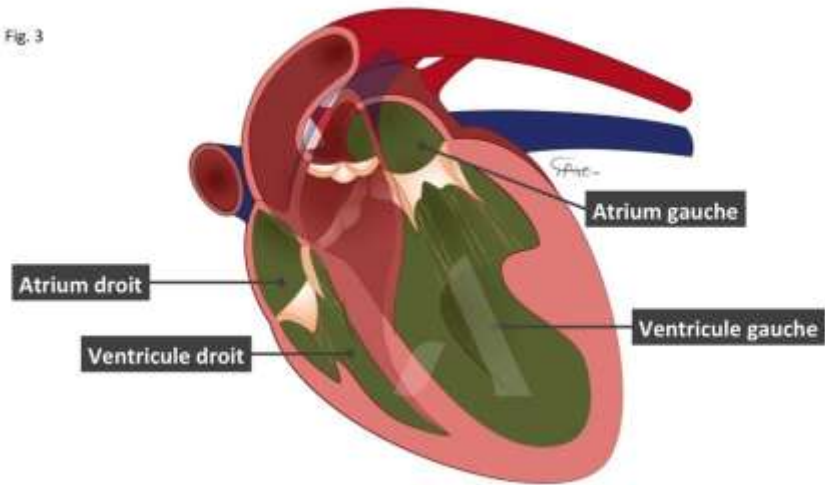




Effet de la microgravité sur le muscle squelettique : atrophie musculaire rapide, avec perte de masse musculaire de l'ordre de 5 à 10%

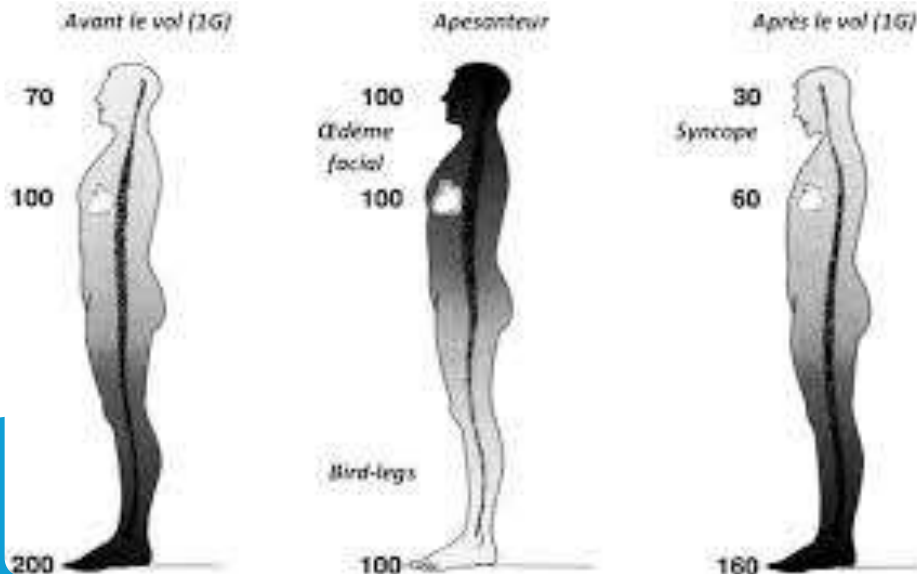
- Diminution de la charge mécanique et stimulation réduite des fibres musculaires, surtout des muscles antigravitaires (jambes, dos).
- Réduction de la force musculaire principalement aux membres inférieurs, donnant l'aspect de « jambes de poulet »
- Modifications de la composition musculaire : réduction des fibres de type 1 (endurance), changement dans la vitesse de contraction.
- Perte des réflexes posturaux et diminution du tonus musculaire des extenseurs, favorisant une posture en semi-flexion dite « attitude fœtale »

Fig. 3



Effet de la microgravité sur le cœur

- Redistribution des fluides vers la région thoraco-céphalique augmentant le retour veineux et le volume d'éjection systolique initialement.
- Diminution progressive du volume plasmatique et du volume cardiaque (8-10%), avec remodelage du muscle cardiaque.
- Diminution du débit cardiaque de repos, mais fonction contractile généralement maintenue.
- Remodelage structurel du cœur avec diminution de la masse ventriculaire gauche.
- À retour en gravité normale, risque d'intolérance orthostatique et tachycardie liée au déconditionnement cardiovasculaire.

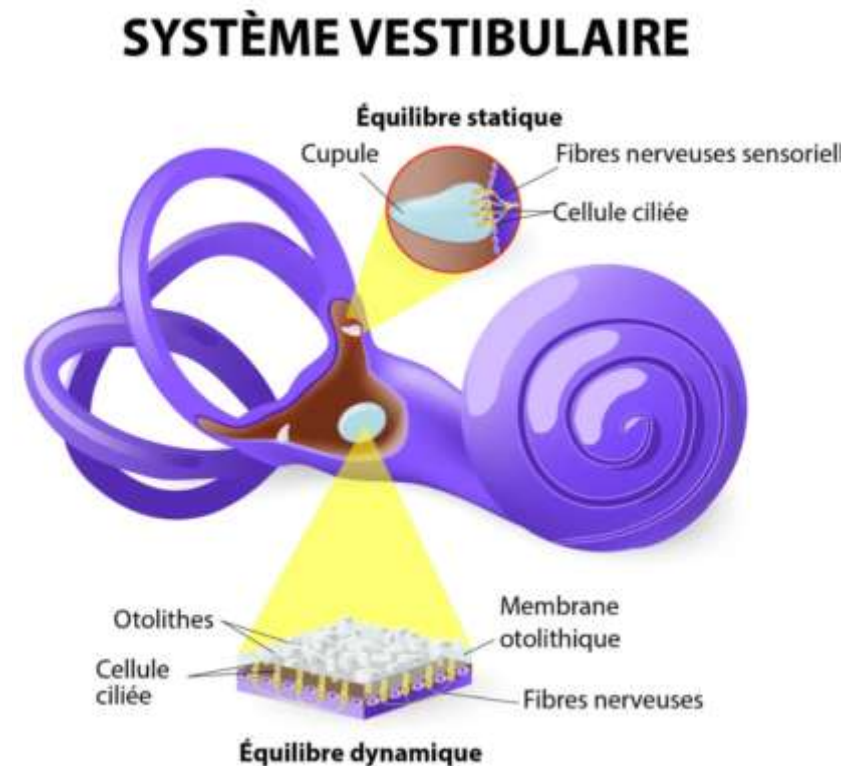


Effet microgravité sur le système sanguin

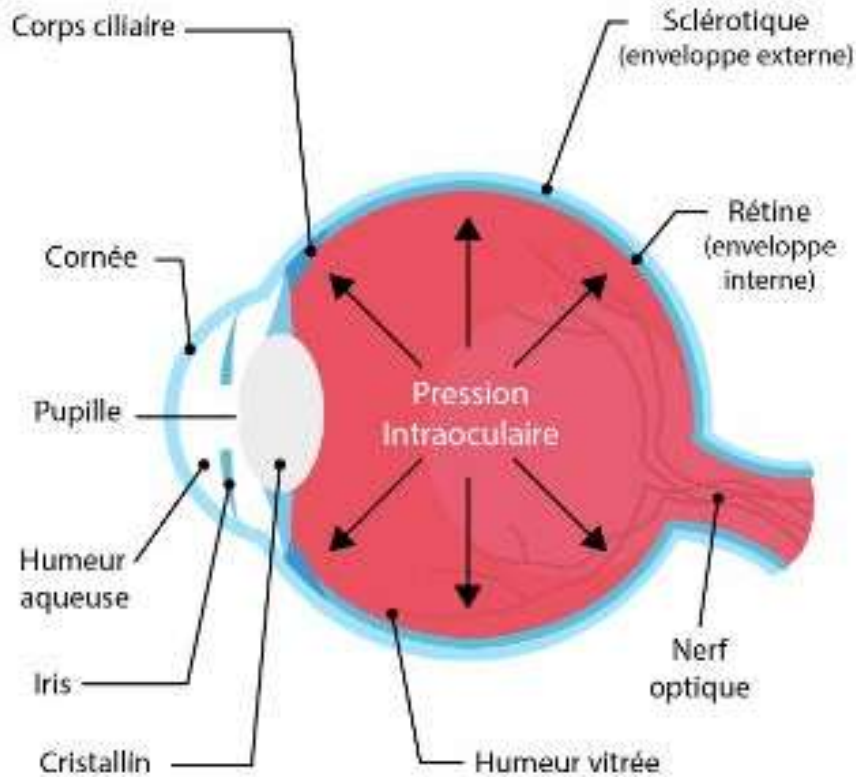
- Redistribution des liquides et hypovolémie chronique : à moyen terme, diminution du volume plasmatique total conduisant à une hypovolémie relative et à une hémococoncentration.
- Anémie spatiale fréquente liée à une diminution de la production d'érythropoïétine et à une destruction accrue des globules rouges.
- Certaines études suggèrent des altérations du système de coagulation, pouvant accroître un risque thrombotique, bien que sans consensus définitif.

Troubles sensoriels : équilibre-proprioception

- Les otolithes de l'oreille interne détectent la verticalité terrestre via la gravité = troubles d'orientation, de posture et de contrôle du mouvement
- Les signaux proprioceptifs des muscles antigravitaires (extenseurs des jambes, paravertébraux) disparaissent
- La disparition de la gravité crée un conflit entre les informations visuelles, vestibulaires (oreille interne) et proprioceptives.
- Ce conflit est responsable du « mal de l'espace », fréquent en début de mission.
- Le cerveau s'adapte en réaffectant les ressources sensorielles : priorité à la vision pour la navigation, au toucher pour les contacts, et à une proprioception "flottante" moins fiable, d'où des illusions spatiales et une coordination altérée.



Syndrome neuro-oculaire associé aux vols spatiaux = 70% des astronautes



- Redistribution des fluides corporels vers la tête, augmentation de la pression intracrânienne et pression accrue sur les structures oculaires.
 - aplatissement des globes oculaires,
 - déformation de la cornée
 - déplacement de la rétine, modifiant la focalisation optique, ce qui cause une baisse de l'acuité visuelle et une altération du champ visuel.
- Parfois: œdème du nerf optique et formation de plis rétiens (stress mécanique)
- Diminution de la rigidité oculaire, baisse de la pression intraoculaire
- Ces effets peuvent persister plusieurs mois après le retour sur Terre et posent un enjeu majeur pour les missions de longue durée, notamment vers Mars.
- Symptômes courants
 - Vision floue, troubles de la perception de profondeur
 - Difficulté à voir de près
 - Sensation de pression et inconfort oculaire

Et si on envoyait plutôt des méduses?

- Lors d'une mission NASA en 1991, 2478 polypes immatures ont été envoyés en microgravité pour observer leur développement, notamment la formation de leurs capteurs de gravité (rhopalia et statolithes)



Aspect	Humains	Méduses
Adaptation initiale	Difficulté avec perte de masse musculaire, troubles d'équilibre liés au système vestibulaire	Bonne adaptation neurosensorielle avec développement normal des organes sensoriels en microgravité
Fonctionnement en microgravité	Perturbations physiologiques complexes : muscles, os, système nerveux, système cardiovasculaire	Capables de nager et pulser normalement en microgravité après développement in situ
Effets sur le système sensoriel	Déséquilibres vestibulaires provoquant des nausées et troubles de coordination	Les statolithes (organes de gravité) se développent mais peuvent être perdus si développés sur Terre, entraînant des troubles d'orientation
Réversibilité / réadaptation	Difficultés majeures à se réadapter à la gravité terrestre (perte de masse musculaire, vertiges...)	Difficultés à s'orienter et nager sur Terre après développement en microgravité (similaire à vertige)
Complexité de l'organisme	Organisme complexe avec plusieurs systèmes affectés	Organisme plus simple avec un système sensoriel spécifique très adapté à la microgravité
Sensibilité à la microgravité	Impact physiologique étendu nécessitant des contre-mesures (exercices, médicaments)	Bonne tolérance fonctionnelle en microgravité, mais faible tolérance au retour à la gravité normale

Et si on créait de la gravité? C'est possible?

- Oui: en utilisant la rotation du vaisseau pour générer une force centrifuge simulant la gravité terrestre.
- Principes de la gravité artificielle par rotation:
 - En faisant tourner le vaisseau sur lui-même, la force centrifuge créée pousse les objets et les occupants vers l'extérieur, recréant ainsi un effet de gravité artificielle sur la paroi interne du vaisseau.
 - Le taux de rotation idéal est limité : il doit être inférieur à environ 2 tours par minute pour éviter des effets secondaires désagréables comme le mal des transports et la désorientation liée aux forces de Coriolis.
 - Pour obtenir 1 g (la gravité terrestre), il faut un grand rayon de rotation — typiquement au moins **224 mètres**



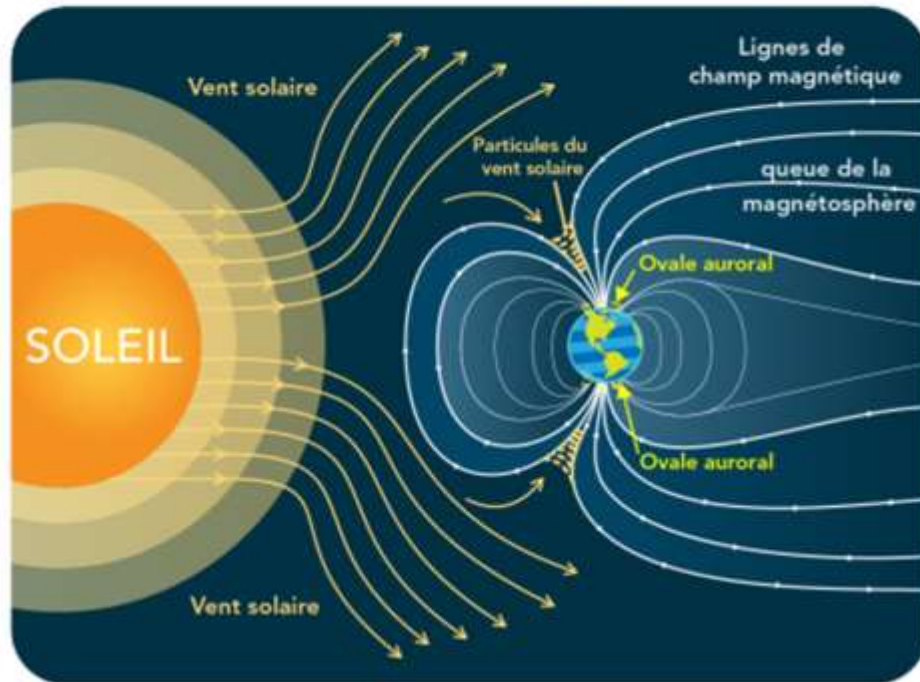
Gravitation artificielle

- Un compromis consiste à générer une gravité réduite, par exemple 0,1 g, qui nécessite un rayon plus petit (environ 22 mètres) et une rotation plus rapide.
- Autres méthodes?
- Une autre solution est d'accélérer continuellement le vaisseau sur une trajectoire rectiligne ; cette accélération produit une poussée interne équivalente à la gravité.
- La création d'une gravité par attraction gravitationnelle via un objet massif embarqué est théoriquement possible, mais irréaliste à cause des masses énormes à déplacer

Limites et défis

- Les installations à gravité artificielle sont encore à l'état expérimental et posent des problèmes d'ingénierie importants, particulièrement en ce qui concerne la taille, la masse, la vitesse de rotation et la gestion des effets secondaires.
- La création d'une gravité artificielle permanente dans de petits modules reste difficile car la rotation rapide nécessaire entraîne des effets biologiques négatifs.
- En résumé, la gravité artificielle dans un vaisseau spatial est réalisable principalement par rotation, mais cela requiert de grandes structures ou des compromis sur l'intensité de la gravité pour réduire les effets secondaires indésirables

Vent solaire et la magnétosphère



Autre problème: les rayonnements

Composantes des rayonnements spatiaux



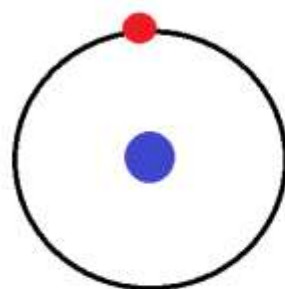
Vent solaire = Plasme de particules: modéré par le champ magnétique terrestre (magnétosphère) ; cause des aurores mais faiblement ionisant pour les astronautes protégés.



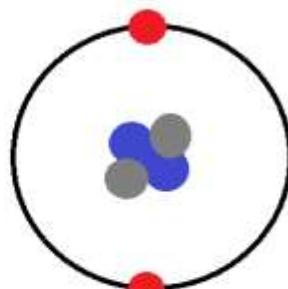
Rayonnement électromagnétique solaire : UV extrême, rayons X et gamma émis par le Soleil, absorbés en grande partie par la thermosphère mais dangereux au-delà en cas d'éruptions solaires (SPE).



Rayons cosmiques galactiques (GCR) : Protons et noyaux lourds (jusqu'au fer) d'origine extragalactique, haute énergie (GeV-TeV), pénétrants ; principale menace pour les missions longue durée (Mars).

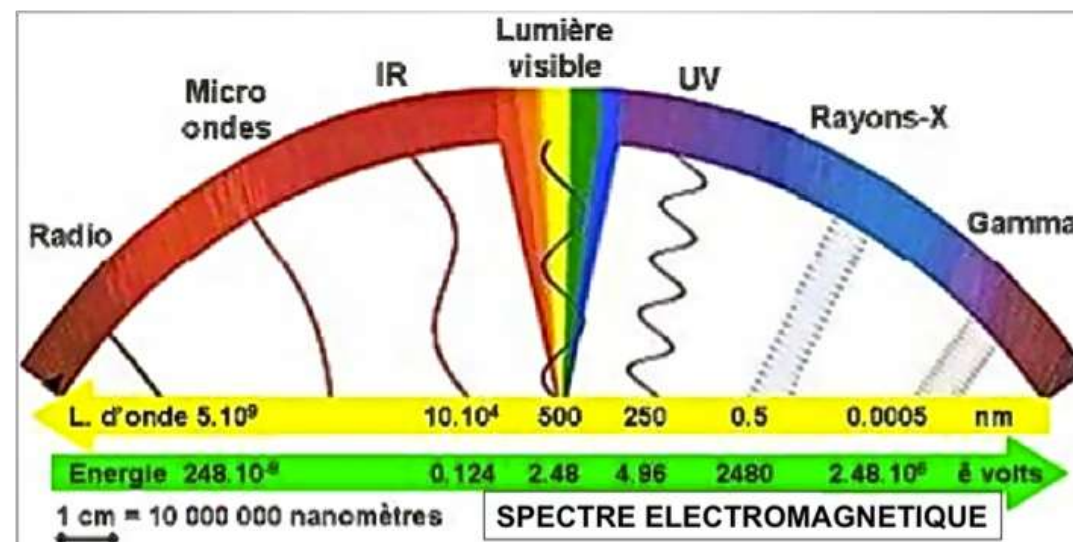


Atome d'hydrogène
Masse= 1u



Atome d'hélium
Masse= 4u

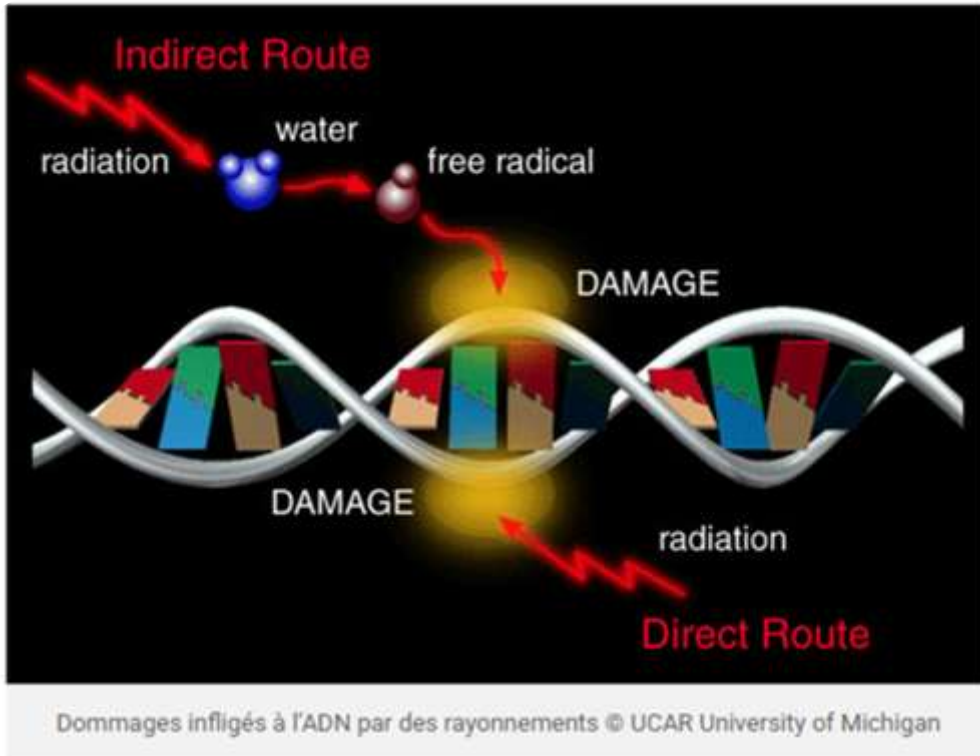
● Électron (masse minimale) ● Proton (masse ≈1u) ● Neutron (masse ≈1u)



Vent solaire : Composition du plasma

- Protons (noyaux d'hydrogène) : majorité des particules, typiquement $\geq 85\%$.
- Particules alpha (noyaux d'hélium) : autour de 10%.
- Ions plus lourds (carbone, azote, oxygène, fer, etc.) : moins de 1%.
- Se déplace à 300-800 km/s

Risques pour la santé humaine

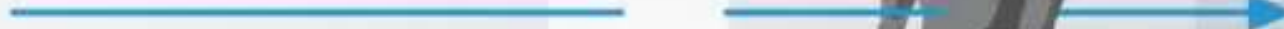


- Les protons de haute énergie, en particulier lors d'éruptions solaires majeures, peuvent pénétrer les blindages des stations orbitales et causer des dommages biologiques directs comme des lésions cellulaires ou des mutations génétiques.
- Les particules alpha et les ions plus lourds interagissent fortement avec la matière, générant des particules secondaires et des radiations ionisantes difficiles à arrêter, qui augmentent les risques de cancers et d'effets aigus du rayonnement, surtout en dehors de la magnétosphère terrestre.
- Les électrons, bien qu'en général moins dangereux biologiquement, participent à la dose totale absorbée et peuvent générer des rayons X secondaires en frappant les blindages.

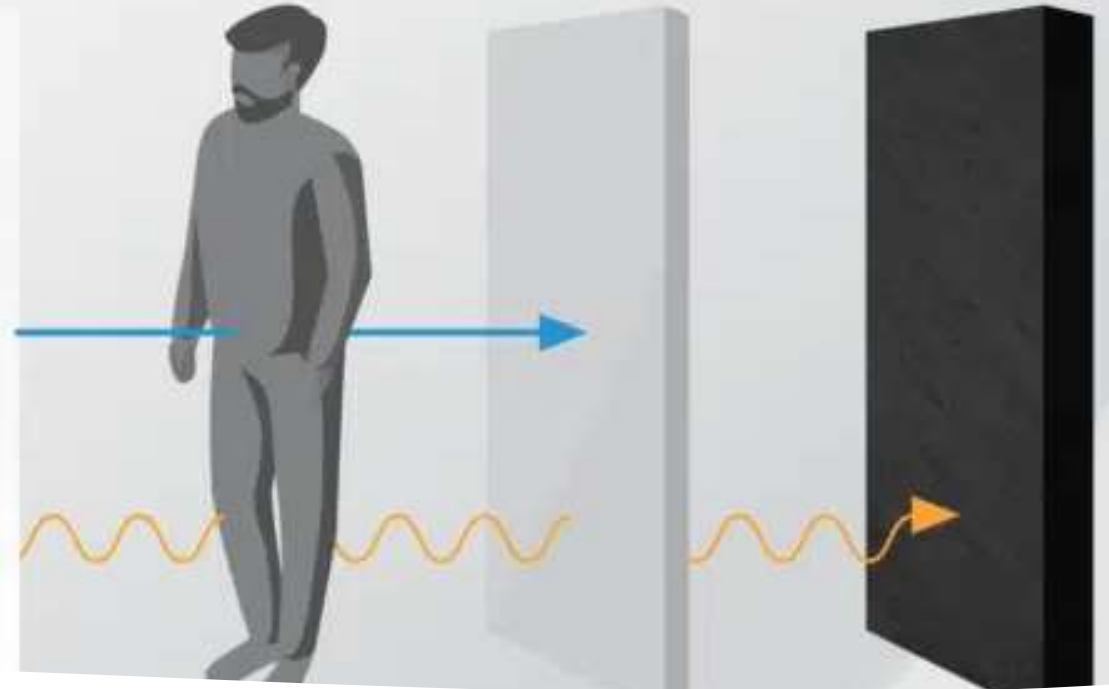
Rayonnements α



Rayonnements β^-



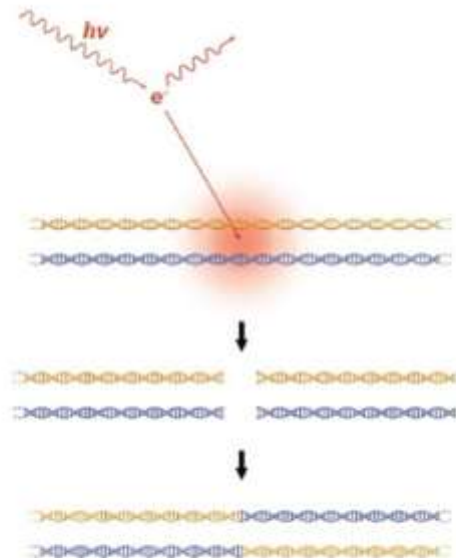
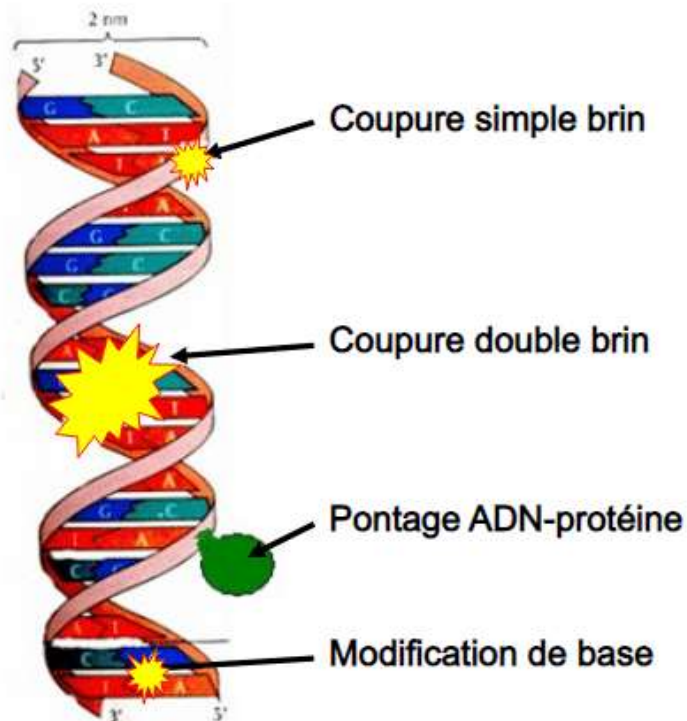
Rayonnements γ et X



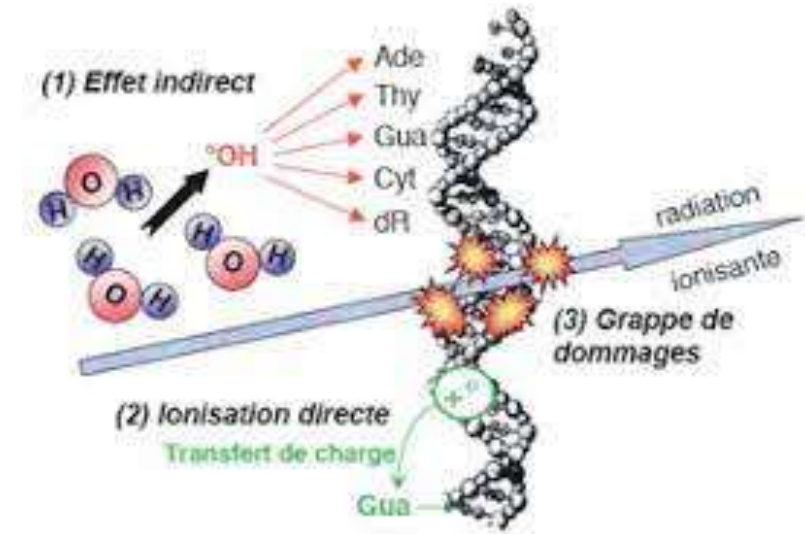
Protection et exposition

- Dans la station spatiale, les blindages protègent en grande partie contre les particules du vent solaire ordinaire ; cependant, lors de fortes éruptions solaires, les doses reçues peuvent dépasser les seuils tolérables pour l'organisme humain, nécessitant alors de se réfugier dans des modules spécialement protégés.
- Une protection efficace contre les événements extrêmes de particules solaires nécessiterait des blindages très épais, souvent supérieurs à 10 cm d'aluminium pour limiter l'exposition aiguë.

Mutations liées aux rayonnements

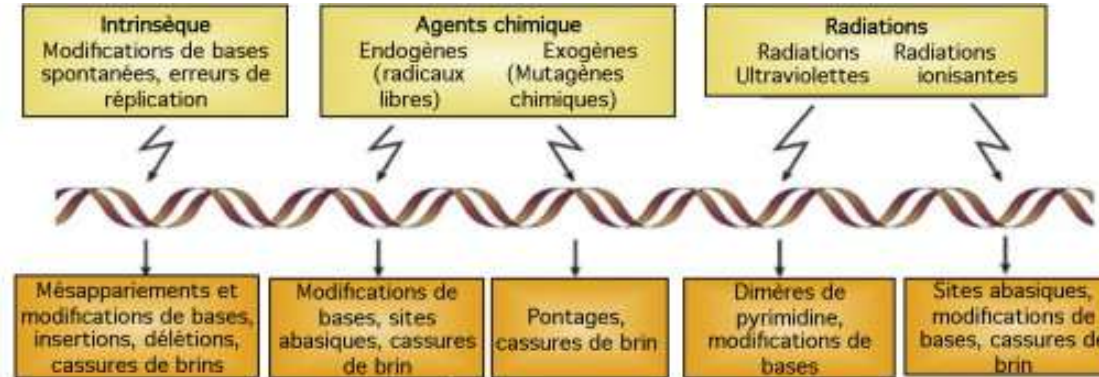


Une seule interaction photon-matière peut provoquer deux cassures double-brin de l'ADN. Leur réparation par la voie du NHEJ peut produire par accident une fusion de chromosomes, menaçant l'intégrité du génome.

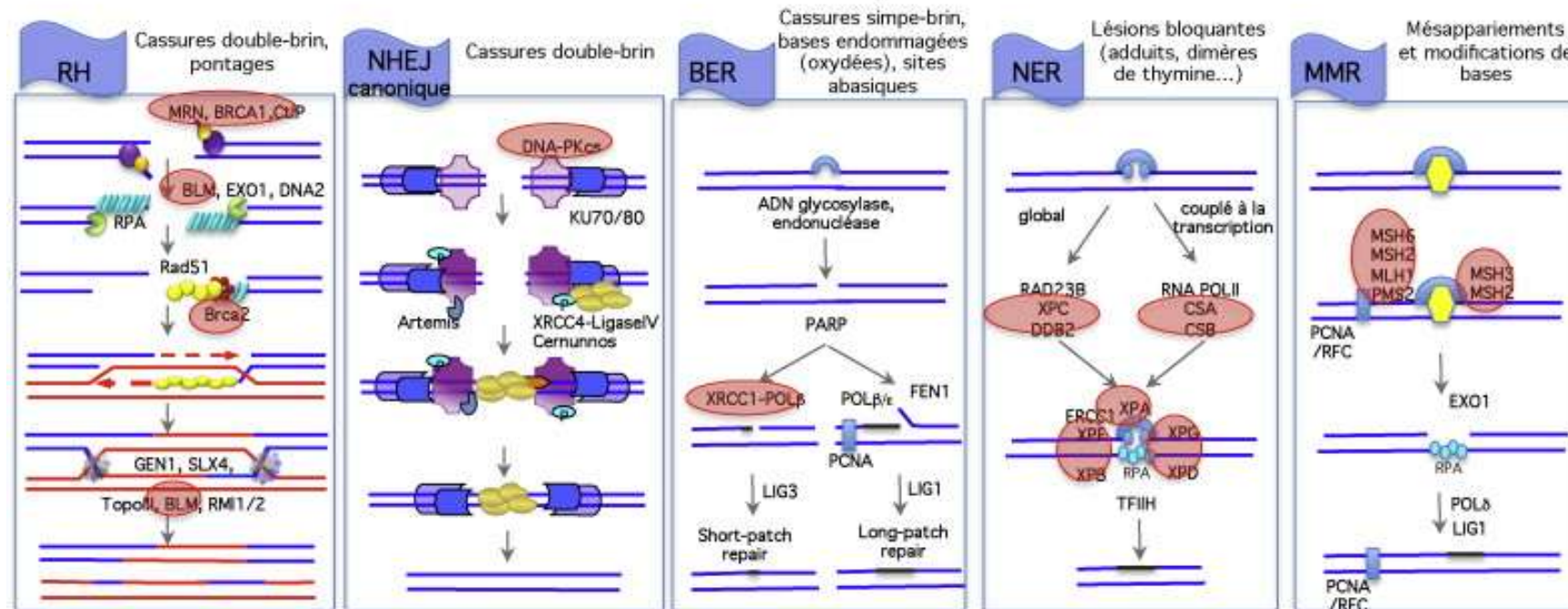


Sources des dommages

Lésions de l'ADN



Mécanismes de réparation



Réparations pas du tout facilitées par l'impesanteur

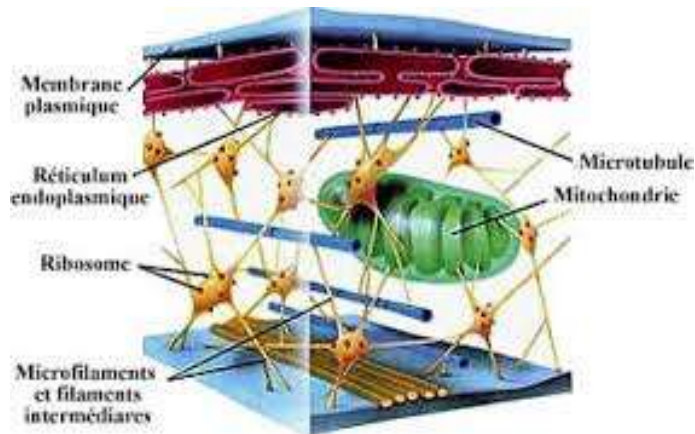
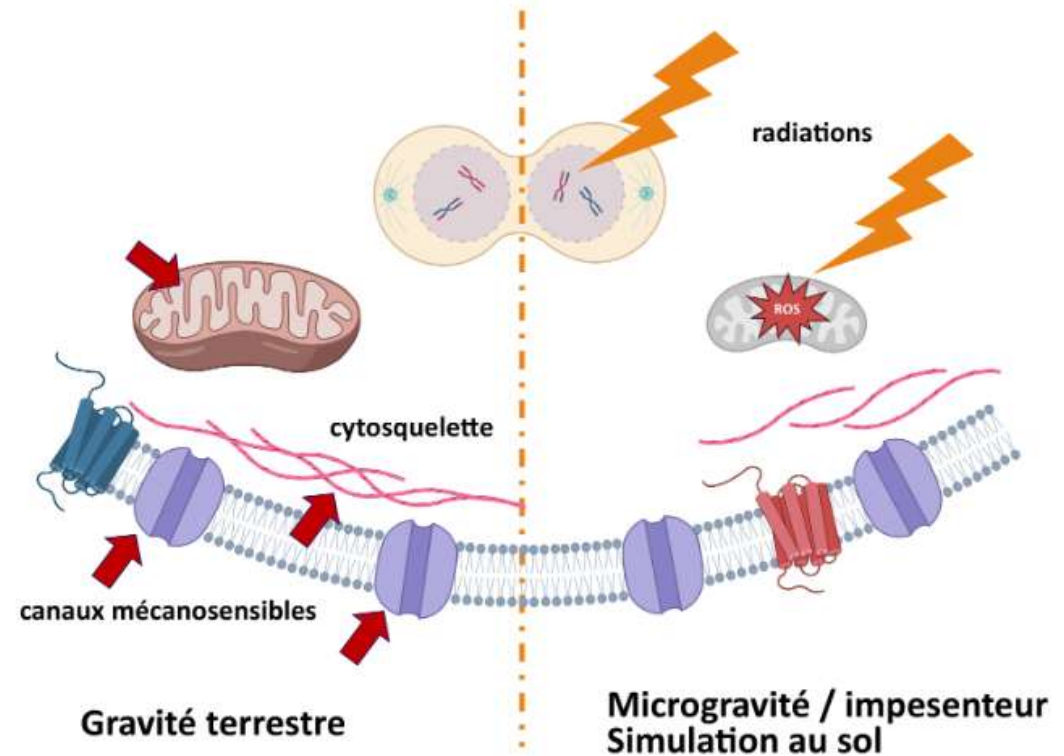
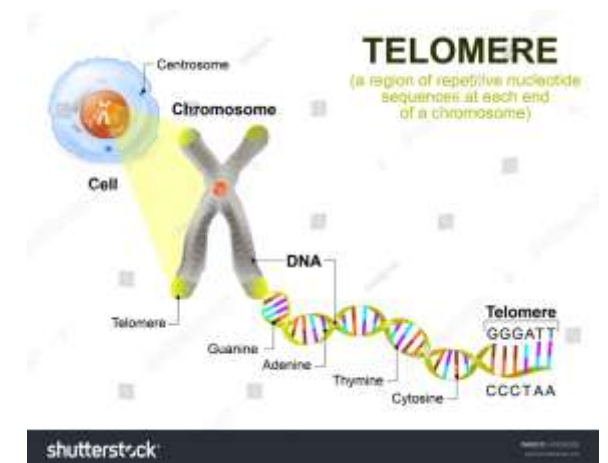
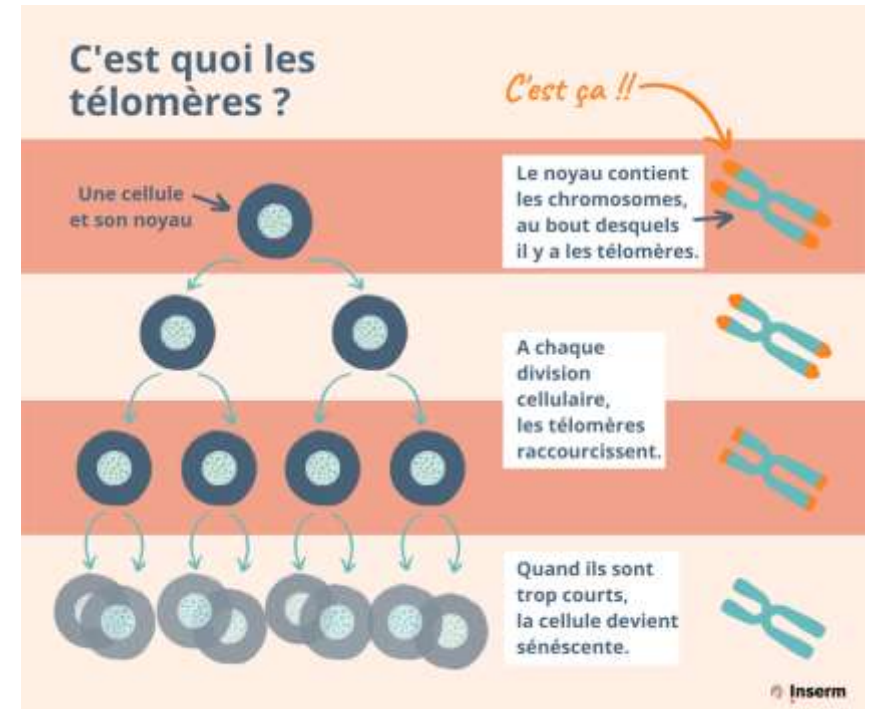


Figure 3. Altérations cellulaires induites par l'environnement spatial. Les radiations altèrent les fonctions mitochondriales, induisent des dommages à l'ADN plus ou moins bien réparés. Le changement gravitaire modifie les fonctions mitochondriales, la régénération cellulaire, la mécanotransduction, l'organisation du cytosquelette et l'expression de récepteurs et de protéines de signalisation intracellulaire.



Vieillesse cellulaire accélérée par raccourcissement et altération des télomères

- Les télomères, séquences répétitives aux extrémités des chromosomes, protègent l'ADN contre la dégradation et les fusions chromosomiques.
- Le stress oxydatif et les rayonnements induisent une déprotection des télomères, qui sont alors reconnus comme des cassures double brin.
- Ce déclenchement anormal de la réponse aux dommages à l'ADN conduit à une accélération du raccourcissement télomérique, associé à la sénescence et au vieillissement cellulaire.



Exposition aux rayonnements spatiaux: court terme

Atteintes au système nerveux central

- Les radiations provoquent une inflammation cérébrale et altèrent la structure des neurones, affectant la transmission des signaux nerveux.
- Cela entraîne des troubles cognitifs tels que déficits de mémoire, troubles de l'apprentissage, anxiété et troubles du comportement, notamment lors de missions prolongées hors de la magnétosphère terrestre.

Fragilisation du système immunitaire

- Les cellules souches hématopoïétiques, à l'origine des globules blancs et rouges, montrent une sénescence accélérée, réduisant la régénération cellulaire.
- Cette immunosuppression temporaire ou durable accroît la vulnérabilité aux infections et limite la capacité à répondre aux agressions infectieuses pendant les missions spatiales.

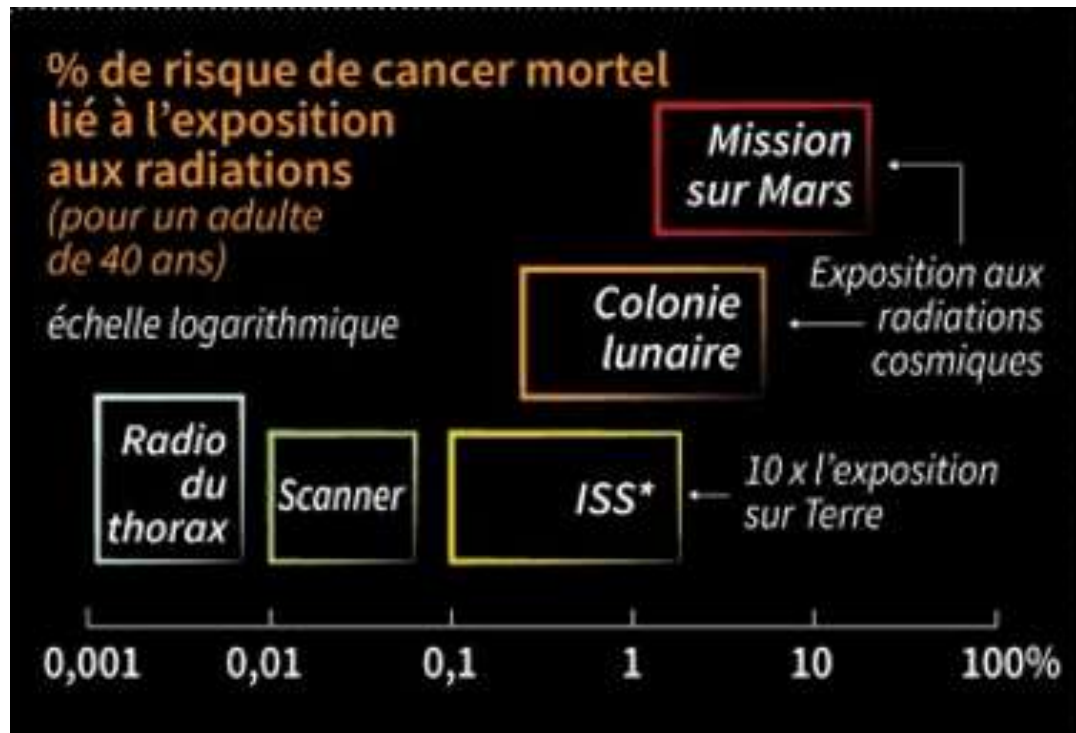


Exposition aux rayonnements spatiaux à +/- long terme

- Cataracte
- Vieillessement accéléré par stress oxydatif du système cardiovasculaire notamment
 - Les radiations ionisantes de l'espace causent des lésions à l'ADN, des cassures double brin, et un raccourcissement des télomères, signe de vieillissement cellulaire accéléré.
 - Ces dommages activent des réponses inflammatoires prolongées dans le tissu vasculaire, favorisant l'athérosclérose et la dysfonction endothéliale.
 - La production excessive de radicaux libres et le stress oxydatif épuisent les défenses antioxydantes des cellules endothéliales, aggravant le vieillissement mitochondrial et l'apoptose cellulaire
- Risques de cancer :
 - les radiations ionisantes de haute énergie peuvent induire des dommages complexes à l'ADN difficiles à réparer, ce qui entraîne une instabilité génétique favorisant la cancérogenèse
 - risque accru de cancers, notamment des cancers hématologiques, cutanés et des organes internes, lié à l'exposition prolongée aux rayons cosmiques et aux particules solaires
- Risque de stérilité / transmission de mutations aux générations suivantes

Voyages lointains?

- Risque élevé d'exposition cumulative lors de missions longues (plus de 700-800 mSv pour un aller-retour + séjour sur Mars)



Environnement	Dose typique (mSv/jour)	Radiations principales
Terre (sol)	~0.014	Presque aucune
ISS (LEO)	~0.7–1	rayons cosmiques galactiques RCG, particules solaires PS
Lune (surface)	~1.3–1.4	RCG, PS, neutrons secondaires (interaction avec regolithe)
Transit vers Mars	1.8–2	RCG, pics de PS
Mars (surface)	~0.7	RCG, PS, quelques neutrons secondaires

Y a-t-il des différences observées entre hommes et femmes?

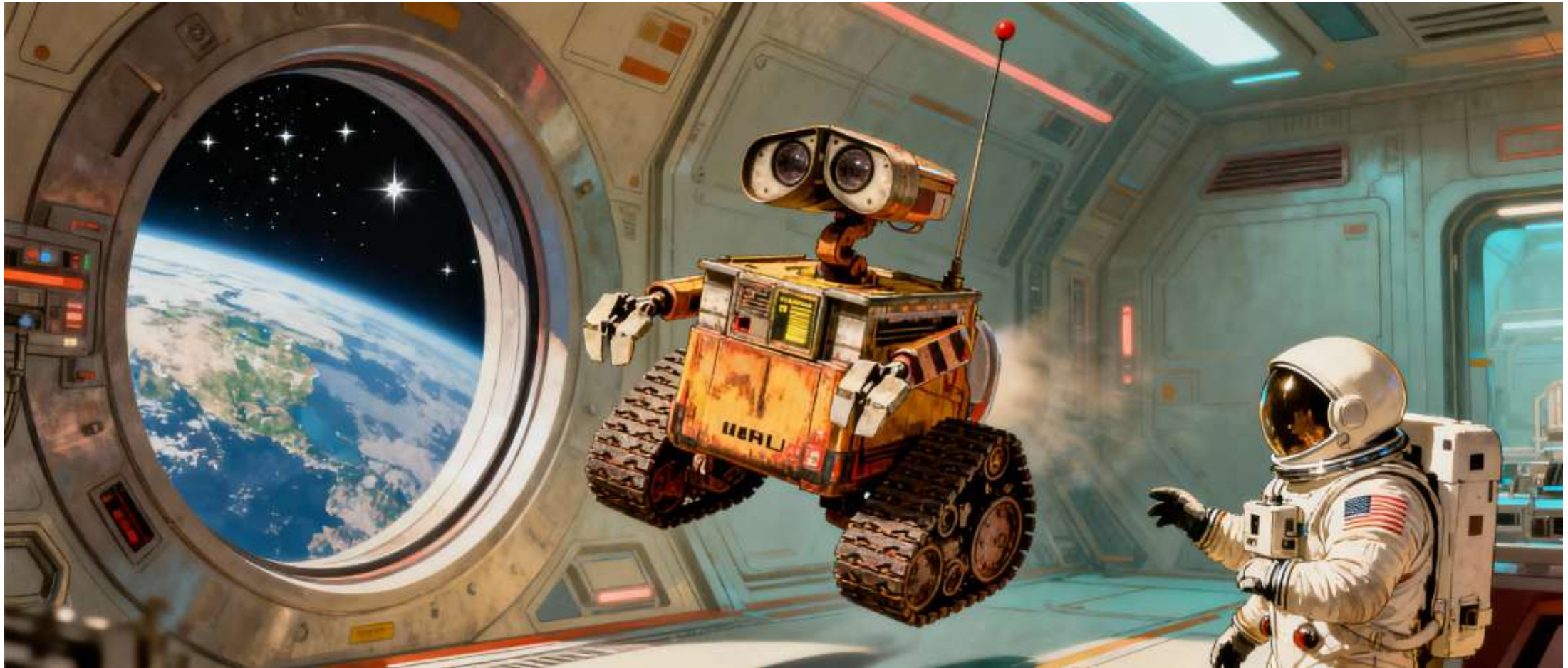
85% d'hommes à ce jour



Avantages par
sexe en
microgravité:
souligne la
complémentarité
pour les missions
mixtes

Aspect de santé	Hommes supportent mieux	Femmes supportent mieux
Rayonnements cosmiques	Plus grande tolérance avant risque cancérigène ; missions plus longues autorisées	
Densité osseuse/musculaire	Maintien absolu plus élevé grâce à masse initiale supérieure malgré pertes relatives	Récupération post-vol plus rapide de la force musculaire
Changements oculaires (VIIP)		Moins de modifications oculaires et cérébrales marquées
Performances cognitives		Meilleure résistance aux déficits (mémoire, anxiété) face aux rayonnements
Immunité/infections		Réponses cellulaires B plus robustes ; moins de susceptibilité globale
Sommeil		Efficacité et latence améliorées ; moins de fatigue
Mal des transports		Adaptation plus rapide après phase initiale

Y a-t-il un intérêt à envoyer des humains dans l'espace plutôt que des robots?

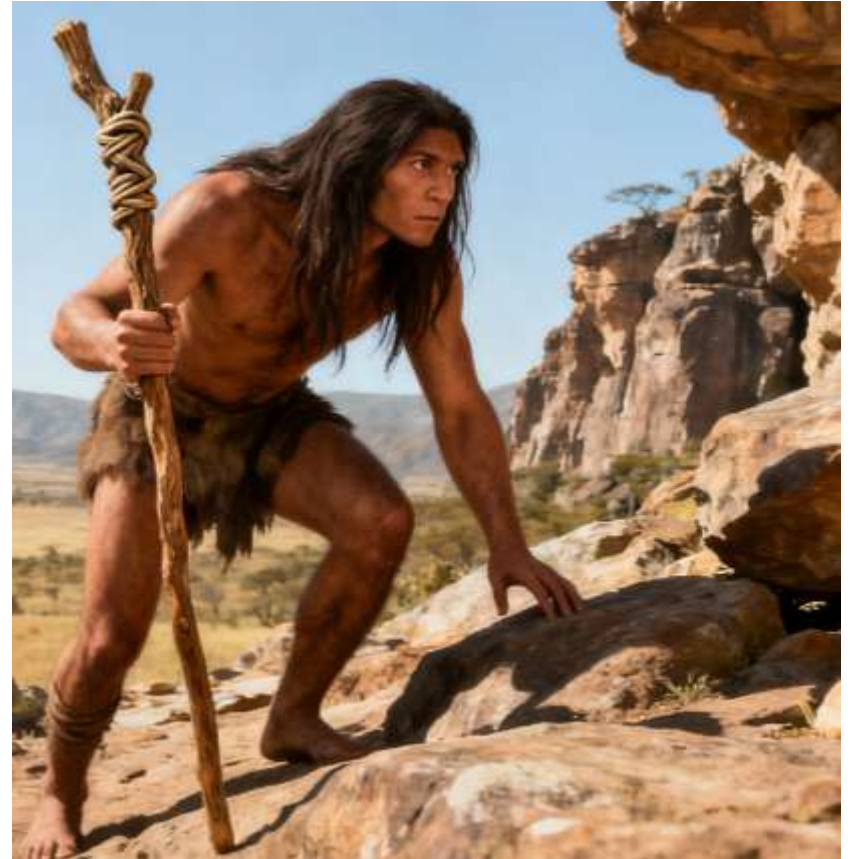


Exploration spatiale: humains ou robots?

Aspect	Missions robotisées	Missions humaines
Coût	Faible (quelques Md\$ pour décennies d'opérations)	Élevé (centaines Md\$ pour allers-retours courts)
Risques humains	Nul (pas de vies en jeu)	Élevés (rayonnements, microgravité, accidents 1/100 vols)
Durée/Portée	Illimitée (ex. : Voyager 47 ans)	Limitée (6-12 mois max ISS ; Mars 2-3 ans)
Maintenance	Autonome ou télécommandée	Nécessite habitats, nourriture, recyclage complexes
Adaptabilité	IA pour décisions rapides ?	Supérieure pour improvisation mais limitée physiologiquement

Mais pourquoi y aller? Quelques pistes de psychologie évolutionniste

- Les Homo sapiens ont colonisé la planète via un "instinct d'exploration" inné, conduits par la curiosité et la recherche de ressources, comme les migrations hors d'Afrique vers des environnements hostiles (glaciers, déserts).
- Ce trait adaptatif, sélectionné par l'évolution, favorise la dispersion et l'innovation malgré risques (famine, prédateurs), avec de la **dopamine** libérée lors de découvertes novatrices.
- Curiosité et néoténie : les enfants humains explorent plus que primates trait conservé à l'âge adulte
- Recherche statut/social : les explorateurs gagnent en prestige = reproduction accrue ; la NASA sélectionne les profils à haut "need for achievement".
- Tolérance risque : biais cognitif sous-estimant dangers, comme migrations océaniques préhistoriques.





Merci pour votre attention!