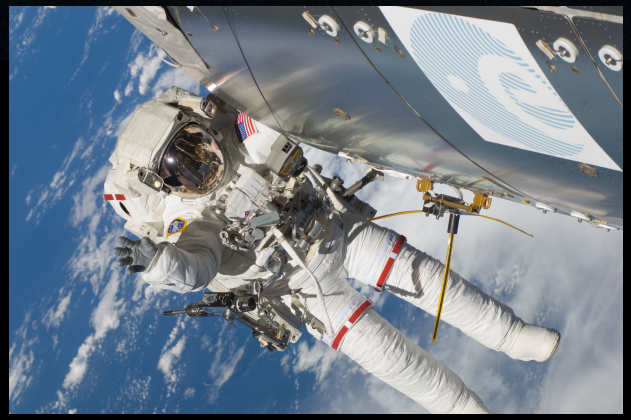
Voyage spatial et santé

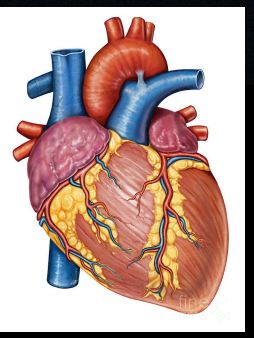
Les MODIFICATIONS de l'ORGANISME en APESANTEUR

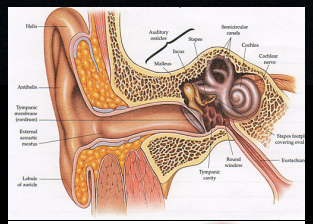
Jean François CLERVOY
Frank LEHOT

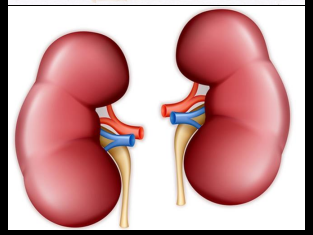


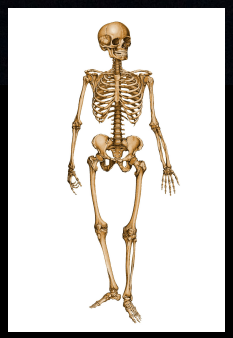
Voyage spatial et santé

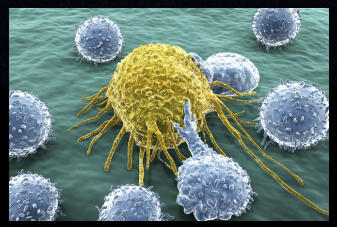
Les MODIFICATIONS de l'ORGANISME en APESANTEUR

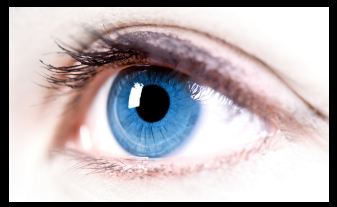


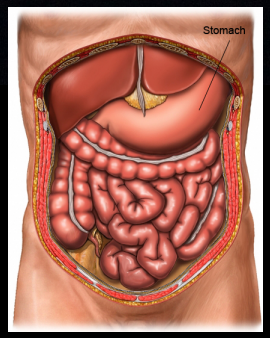




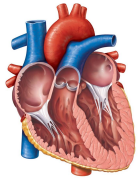








Les modifications du cœur et des vaisseaux
1. Désadaptation à la gravité terrestre

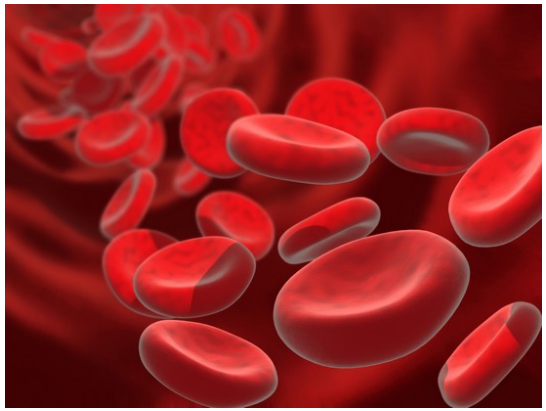


1. En 7 jours : - 2 litres

Perte de 10-15 % de plasma sanguin (H : 350-680 ml)

Destruction de 10-15 % des globules rouges (les plus jeunes)Néocytolyse

Hypovolémie Anémie

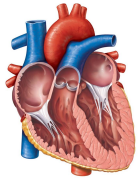


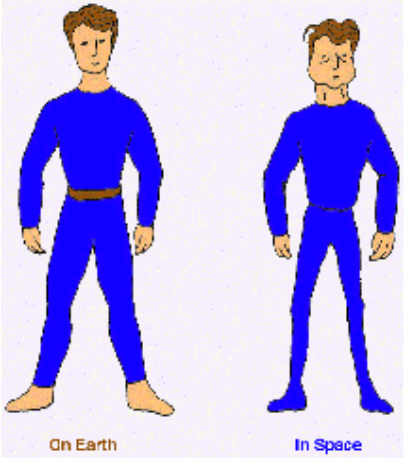
Sang 900cc LEC 1100cc
2 litres en 6-10 heures
ET pression thorax en baisse : remplissage +

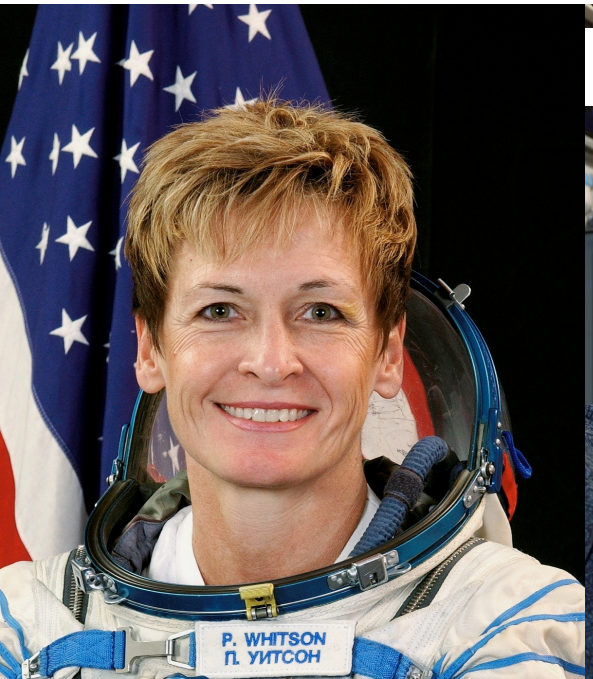
Réduction de la soif
même si pas SMS 41%
Fuite vers secteur interstitiel.

Les modifications du cœur et des vaisseaux

1. Puffy face and chicken legs



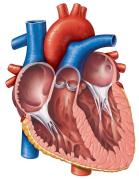


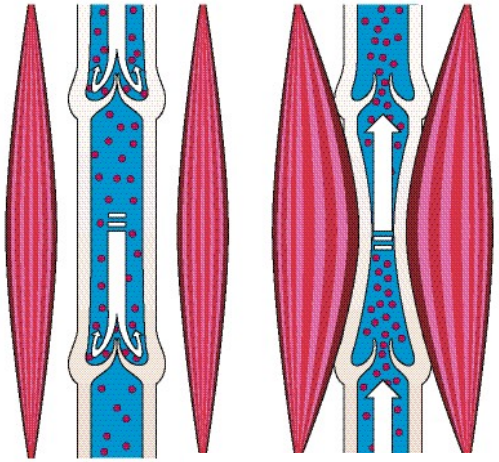


Diamètre mb inférieurs -10-30%

Les modifications du cœur et des vaisseaux

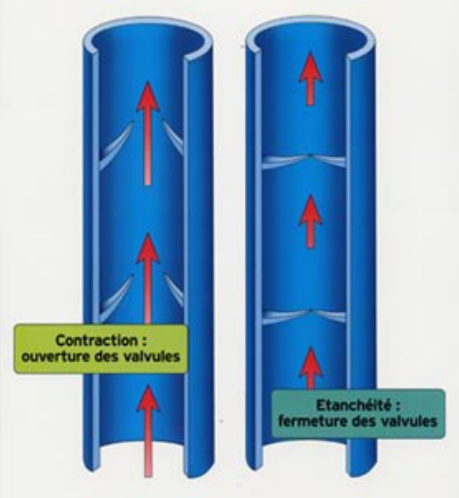
1. Désadaptation à la gravité terrestre

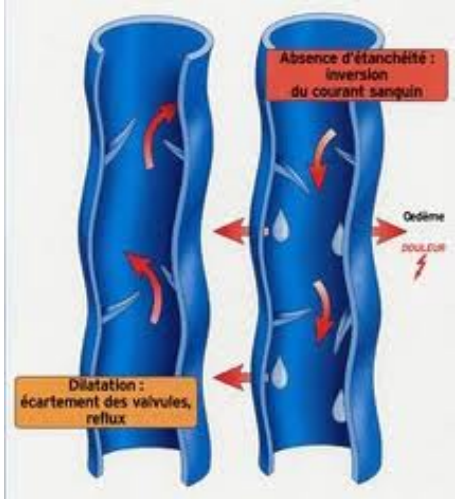


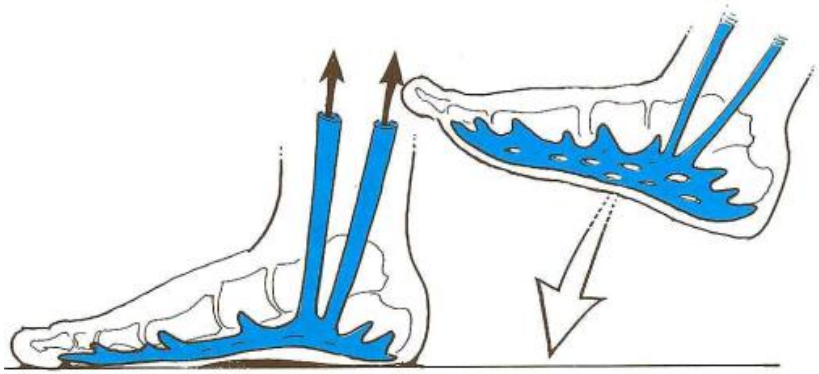


3. Le retour veineux est moins efficace.
Diminution de la pompe musculaire
Tonus veineux diminué

Au passage en position debout la contraction veineuse réflexe est diminuée

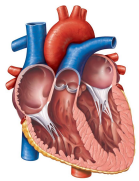


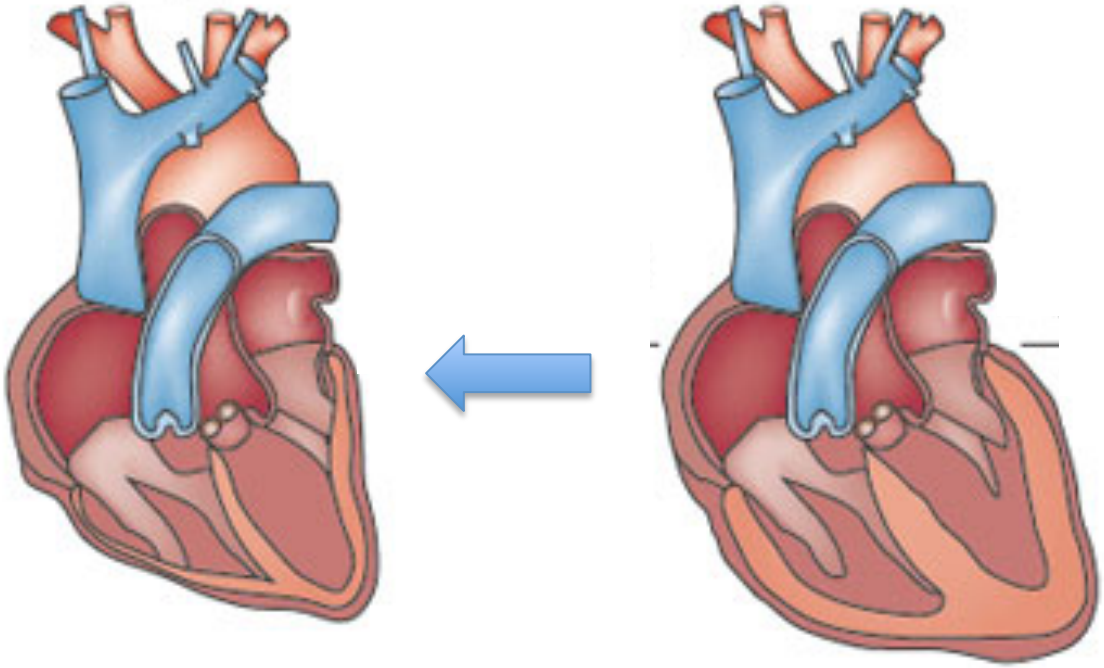




Les modifications du cœur et des vaisseaux

1. Désadaptation à la gravité terrestre





En APESANTEUR

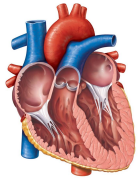
Sur TERRE

3. Après une augmentation transitoire du volume du cœur pendant 24-48h lié à l'afflux de sang vers le haut du corps,

Le volume du cœur diminue de 10 à 15 %
Le débit cardiaque baisse de 15 %

Causes :
Baisse du volume sanguin
Moins d'effort contre gravité
Moins de sollicitation physique

Les modifications du cœur et des vaisseaux
1. Désadaptation à la gravité terrestre



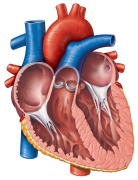
Baisse du volume sanguin
Mauvais retour veineux
Atrophie cardiaque
Anémie

→ Diminution de la capacité à l'effort
VO2 Max -15 %
Récupération 1 semaine à qqles mois selon la durée de la mission.

→ Fréquence cardiaque augmentée

→ Chutes de tension / syncopes
Vols courts : 20-30 % des astronautes. Jusqu'à 1 semaine
Vols longs : 83 % des astronautes. Jusqu'à 2 mois

Les modifications du cœur et des vaisseaux
1. Désadaptation à la gravité terrestre
Multiplier les contre-mesures



- Avant le vol : préparation physique

- Tout au long du vol : exercice physique aérobie

Limite la tachycardie et l'hypotension après le vol
Limite la baisse de la VO_2Max

- Avant le retour :

LBNP (Chibis)

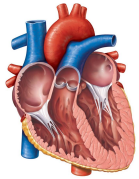
Pantalon Anti G
Tenue élastique Penguin

Fluid loading protocol
Nacl 0,9%

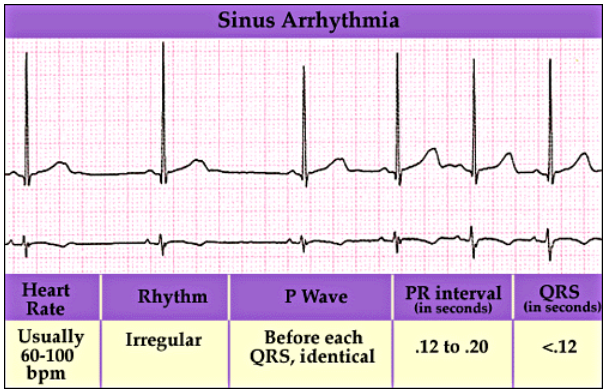
Midodrine Σ+

- Après le retour : réadaptation

Les modifications du cœur et des vaisseaux
2. L'espace favorise les troubles du rythme

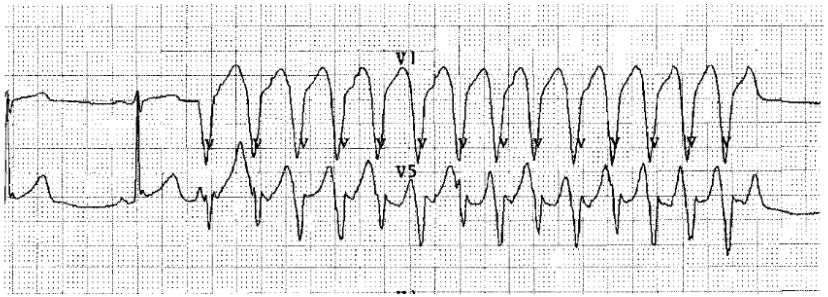


Rôle de la microgravité et des troubles ioniques



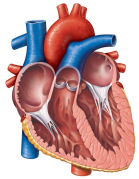
50 % lors des sorties dans l'espace

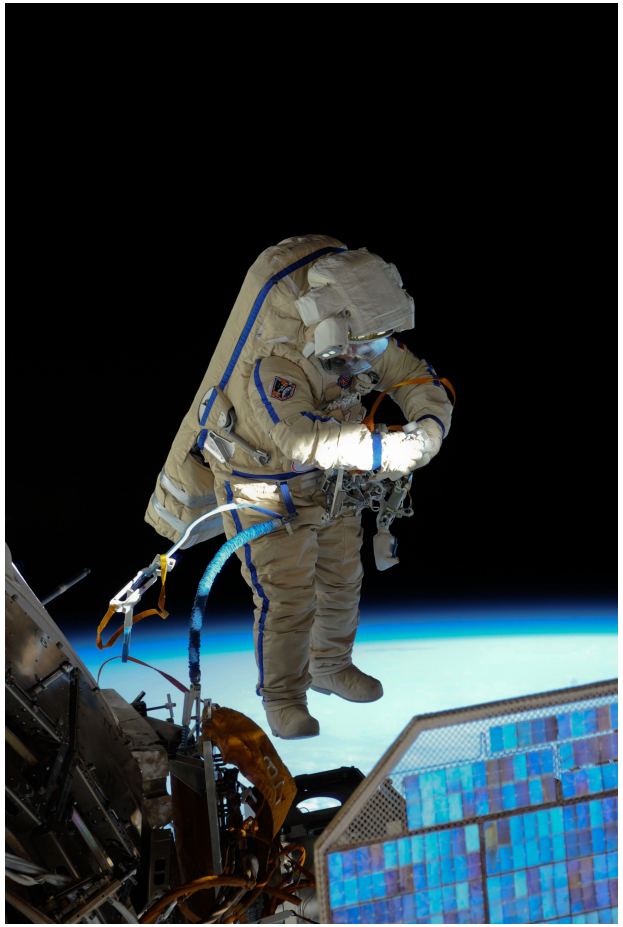
75 troubles du rythme en 10 ans (MIR)
1 mission abrégée pour arythmie (Saliout 7)



Interruption de sortie spatiale

Les modifications du cœur et des vaisseaux
2. Surveillance de l'ECG lors de certaines activités



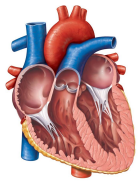


Sorties spatiales

Exercices intenses

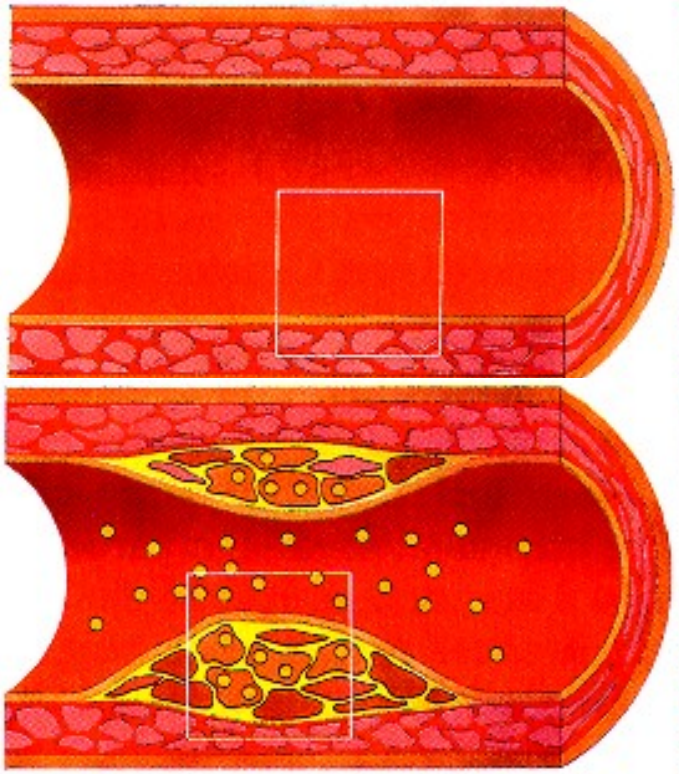
LBNP

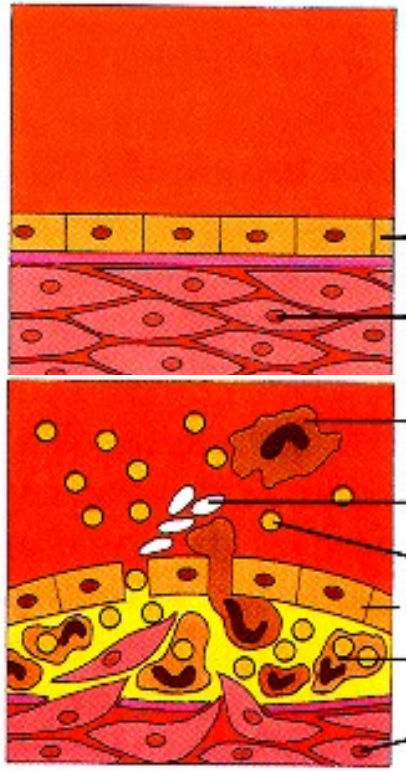
Les modifications du cœur et des vaisseaux
3. L'apesanteur : un facteur de risque cardio-vasculaire



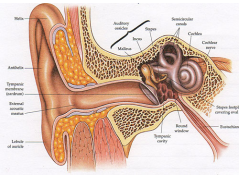
Pressions / écoulements sont modifiés

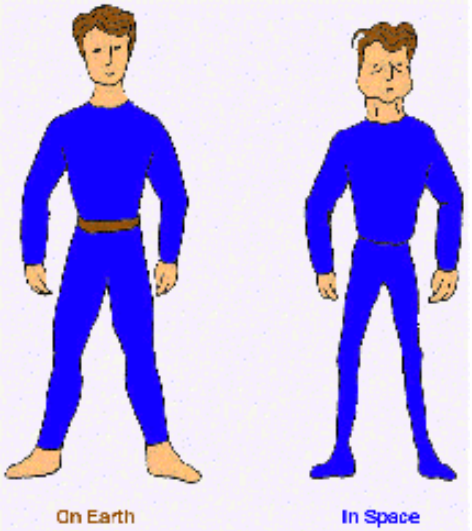
La paroi interne des vaisseaux devient plus perméable aux cellules inflammatoires, au cholestérol.
Favorise l'adhésion des plaquettes.
Favorise la vasoconstriction





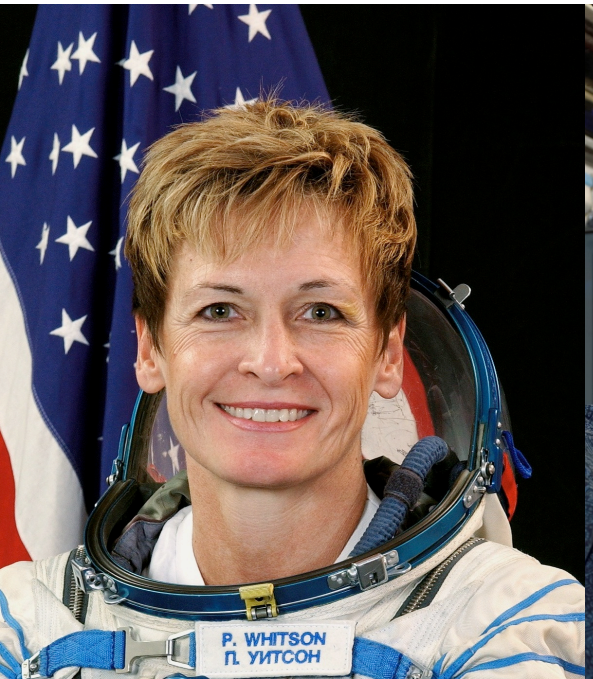
Système ORL

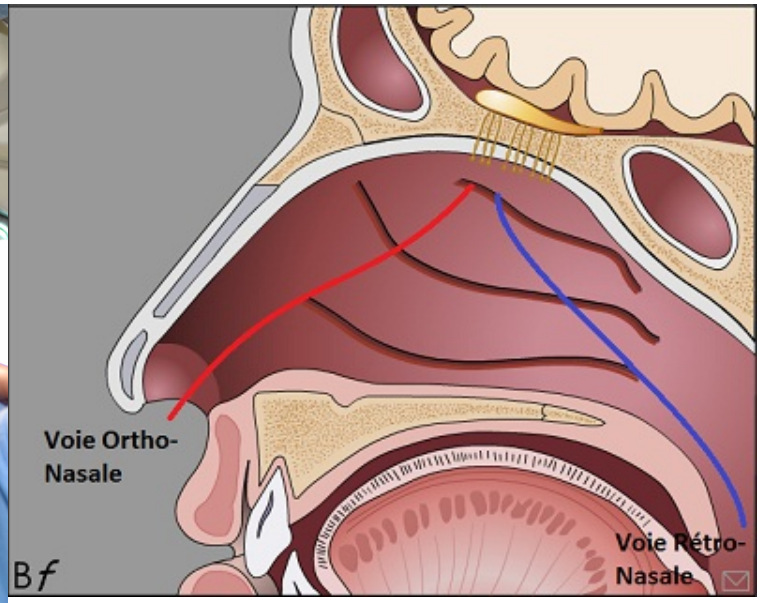




Congestion nasale «rhume de l'espace... »
Durée jusqu'à 7 jours...

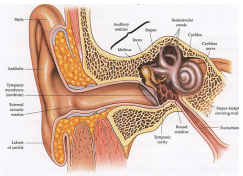
Diminution de l'odorat : nourriture épicée…





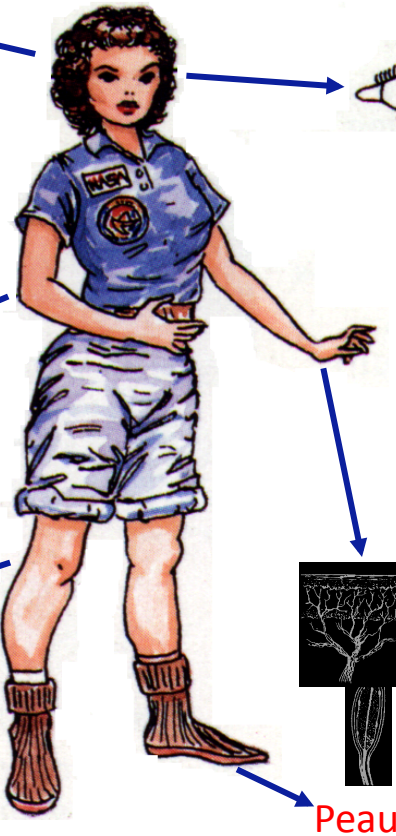
Le mal de l'espace

Conflit d'informations sensorielles

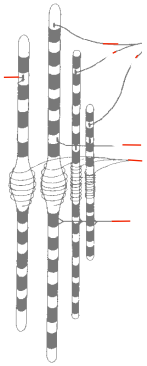


OREILLE INTERNE

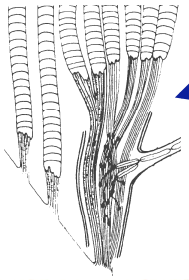
VISION



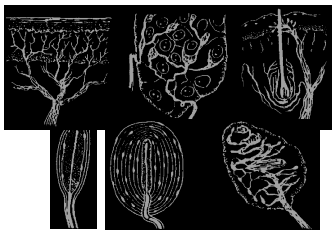
CAPTEURS DE POSITION



Muscles

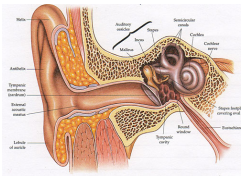


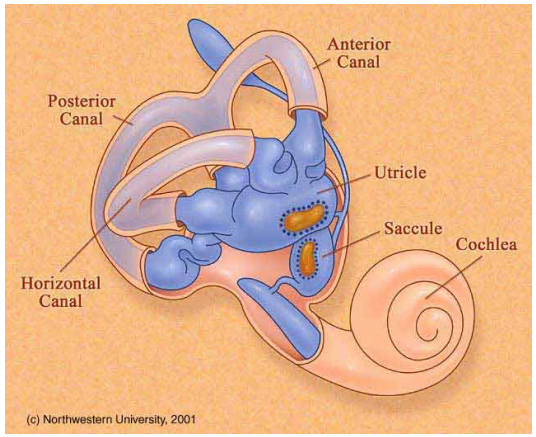
Tendons
Articulations

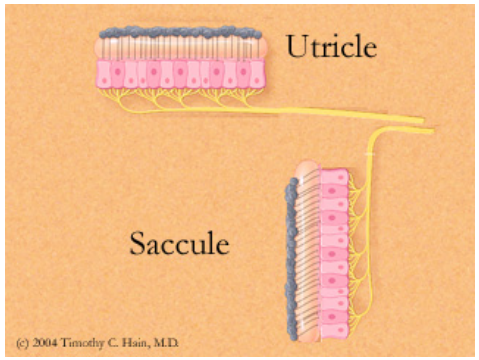


Peau

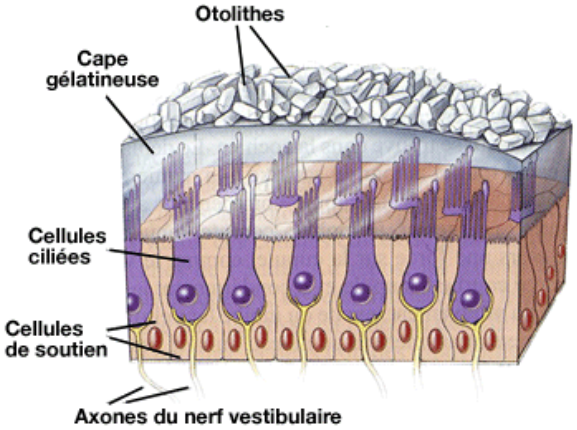
Le mal de l'espace

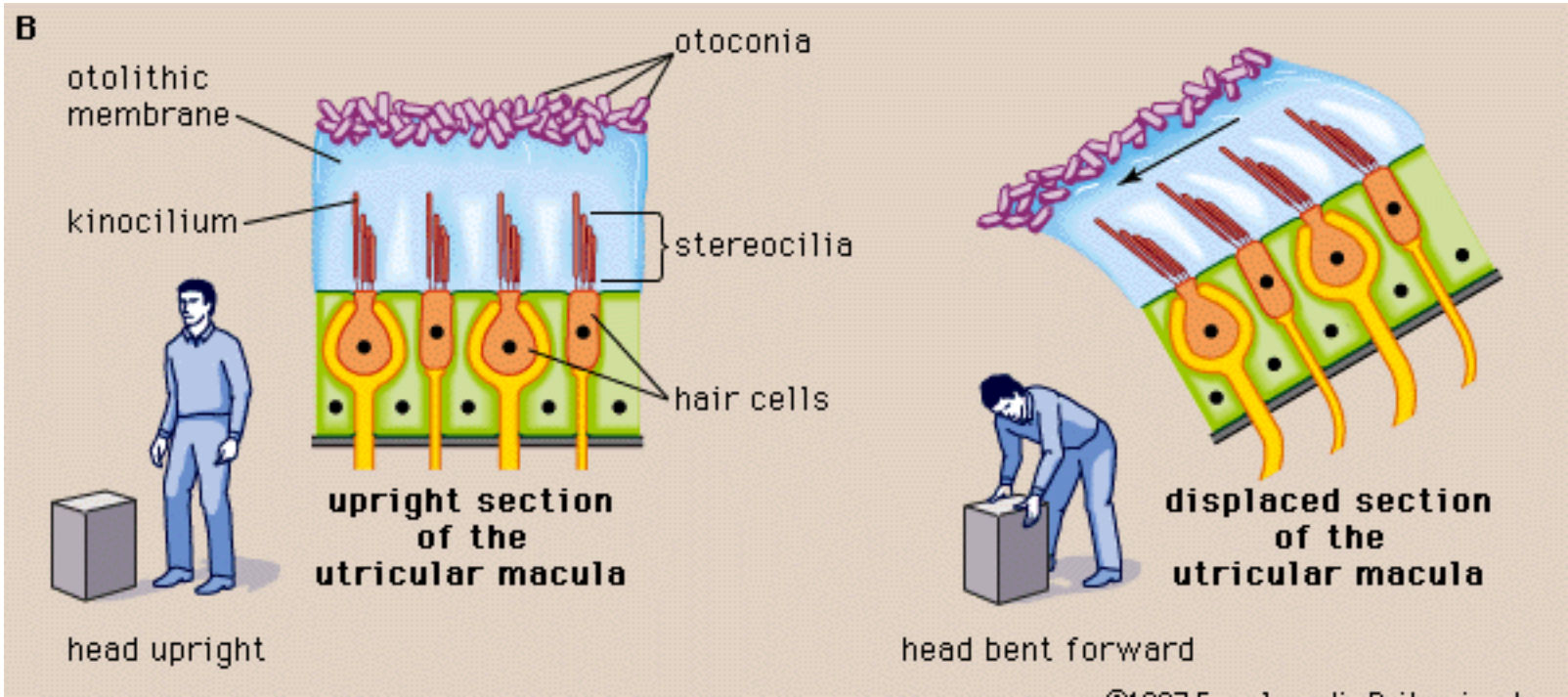




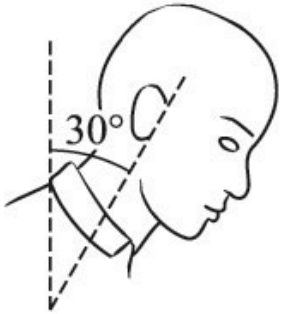


Accélérations linéaires et gravité

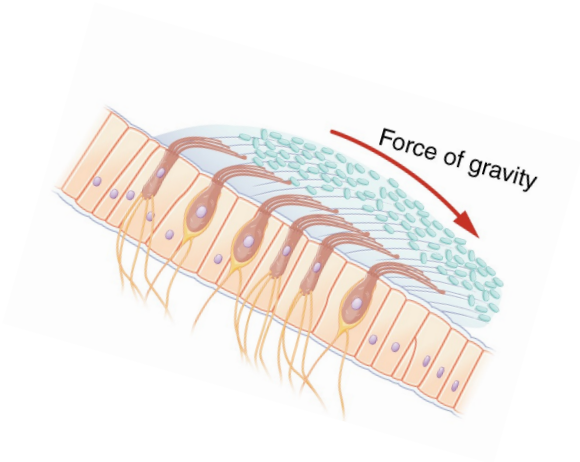




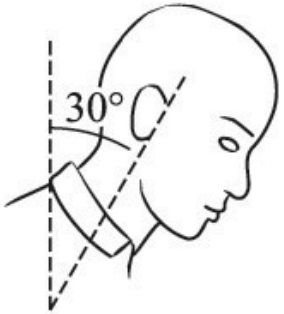
Sur TERRE



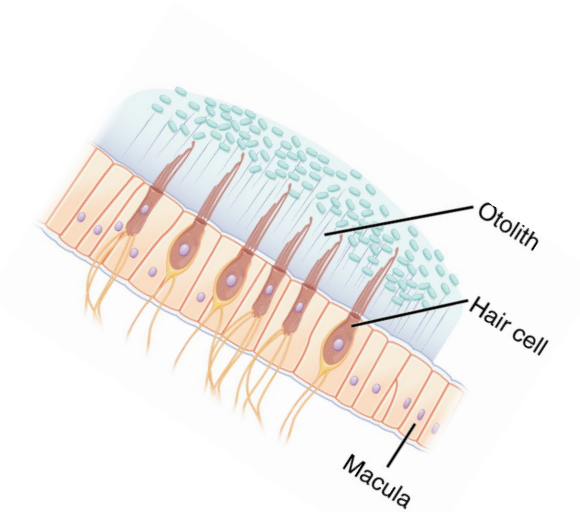
La vision et l'oreille interne signalent
l'inclinaison de la tête



En Apesanteur



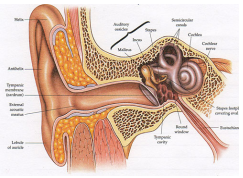
L'oreille interne ne signale
pas l'inclinaison de la tête
rapportée par la vision



IL Y A CONFLIT d'INFORMATION
DECLENCHEMENT DU MAL DE L'ESPACE

Schéma modifié D'après Gilles Clément

Le mal de l'espace



FREQUENT

2/3 des astronautes au premier vol de navette spatiale

PLUTOT IMPREVISIBLE

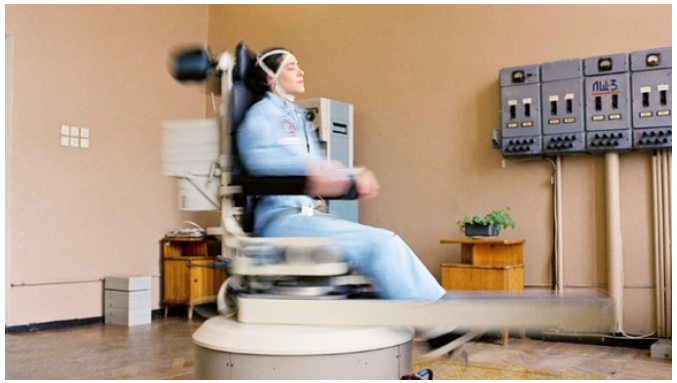
Non lié au mal des transports / âge / sexe / fonction à bord

Ni aux tests vestibulaires ou tests de provocation

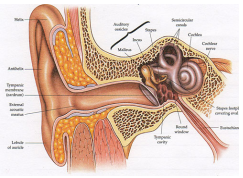
Lié à la taille des cabines et les mouvements de la tête :

Mercury Gemini =0 ? Apollo = 35 % Skylab = 60 %

Lié au mal de l'espace lors d'un vol précédent



Le mal de l'espace
Symptômes durée intensité



Fatigue / Somnolence / Maux de tête / Vertiges
Nausées / vomissements parfois soudains
baisse de tension / sueurs
Sensation de malaise

Durée 48-72 h

Baisse de motivation concentration efficacité
Repli sur soi

Faible 49 %

symptômes transitoires (mouvements de la tête)

≤ 1 vomissement

Pas d'impact opérationnel < 36-48 h

Intermédiaire 36 %

Plusieurs symptômes persistants

≤ 2 vomissements

Petit impact opérationnel < 72 h

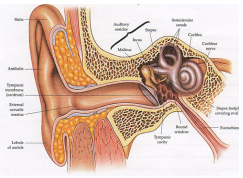
Sévère 15 %

Plusieurs symptômes persistants : malaise +

≥ 3 vomissements

Net Impact opérationnel > 72 h

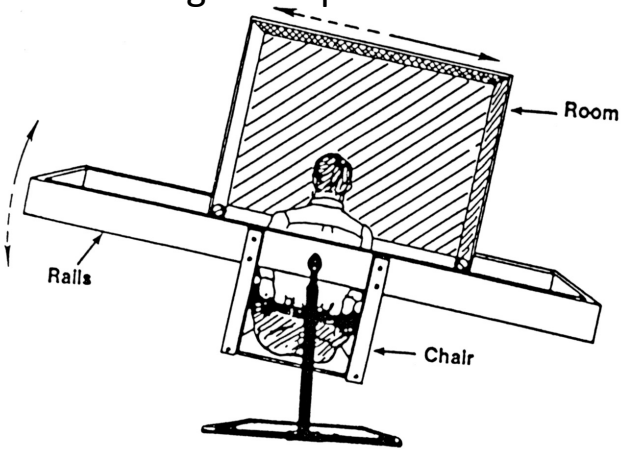
Le mal de l'espace
Prévention / traitement



Médicaments préventifs / Curatifs IM

Promethazine Scopolamine Dextroamphétamine
ScopeDex PhenDex

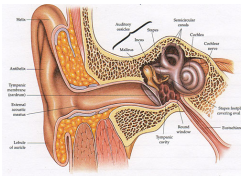
Nasa Preflight Adaptation Trainer

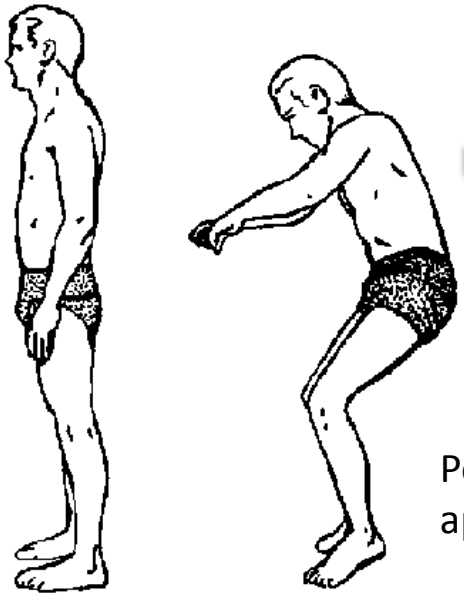


Gestes préventifs / curatifs

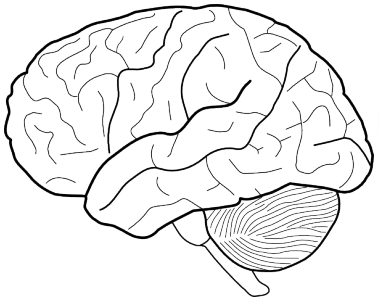
Limiter les mouvements de la tête
S'attacher fermement. Réduire l'activité.
Se concentrer sur une tâche
Garder l'orientation terrestre

Troubles de la posture et de la démarche
Troubles de l'équilibre





Posture en apesanteur

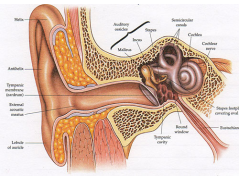


Adaptation du contrôle de la posture à l'état d'apesanteur
Réflexes, tonus musculaire

Désadaptation à la gravité Terrestre

Troubles de l'équilibre
Instabilité
Chutes

Troubles de la posture et de la locomotion
Troubles de la marche



Multifactoriel :

Limitation mouvements tête pour éviter la stimulation de l'oreille interne.

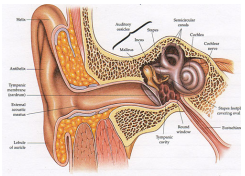
Perturbation de la stabilité du regard à la marche

Changements dans la coordination des mouvements tête-tronc / jambes

Angle de la cheville

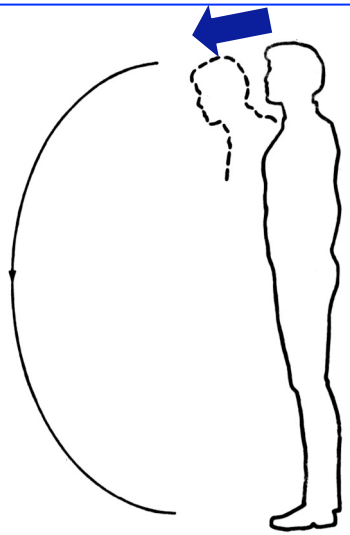
Test d'évitement d'obstacles (Urgence)
Temps nécessaire + 50 % J+1
Récupération 2 semaines

Troubles de la posture et de la locomotion

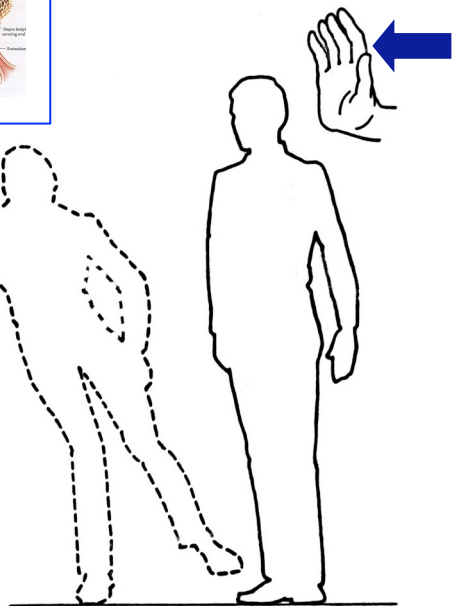


Rôle des illusions de mouvement

Se pencher produit une sensation de chute en avant



Sensation de poussée latérale en tournant

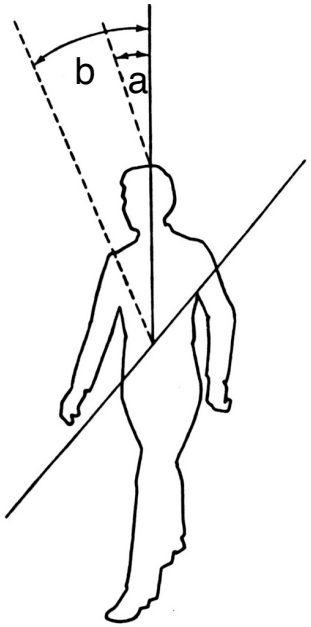


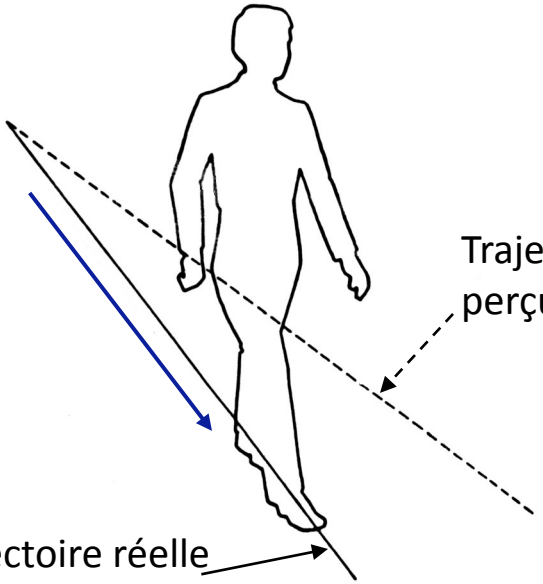
a : mouvement effectué

b : mouvement perçu

Sensation de flexion

Tête tronc exagérée





Sensation de déviation de la trajectoire en ligne droite

Les modifications musculaires en apesanteur

Hypertrophie

Atrophie

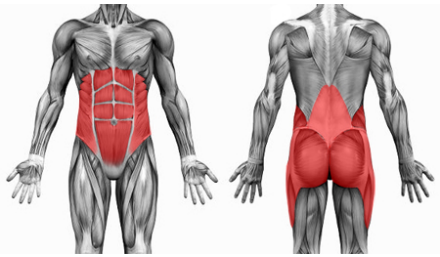
Masse et performance musculaires sont dépendantes de l'activité physique.

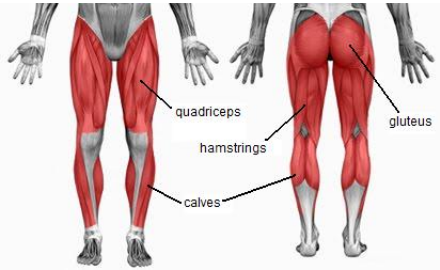
Les modifications musculaires en apesanteur
Atrophie des muscles de posture et de locomotion

ISS026E021346

ISS027E017236

Para vertébraux
Lombaires
Abdominaux
Cuisses
Mollets



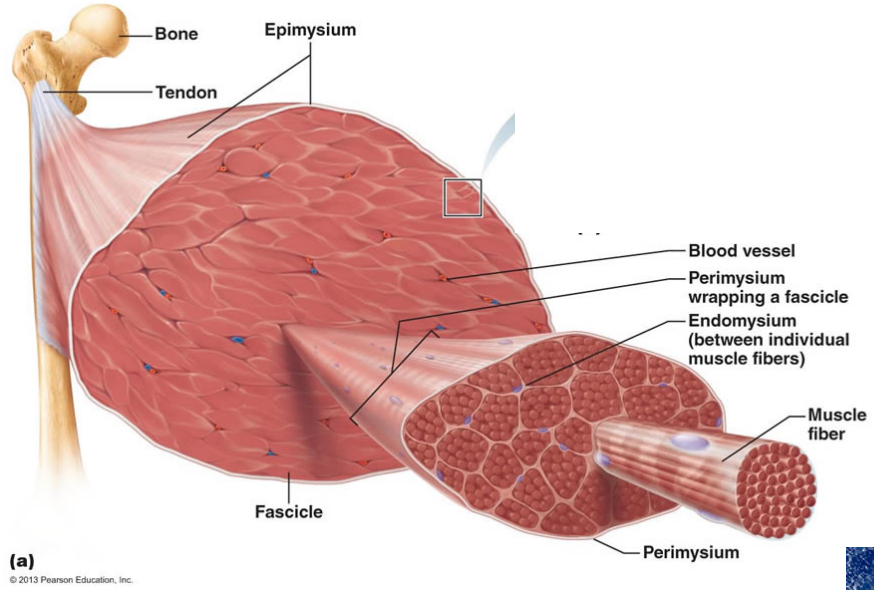


Les modifications musculaires en apesanteur
Les muscles des membres supérieurs

Atrophie moindre :

Pas d'effort de soulèvement
Mais utilisation accrue

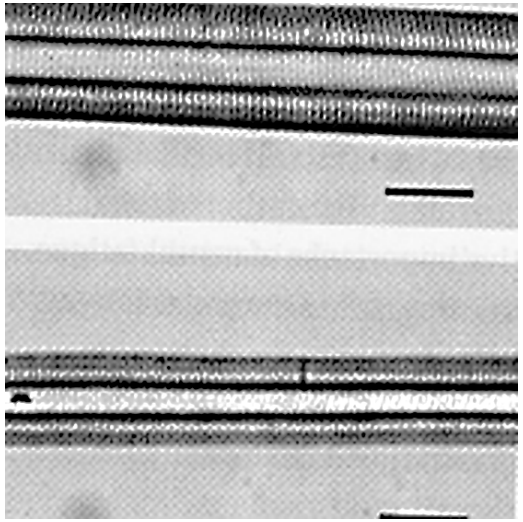
Les modifications musculaires en apesanteur
A l'échelle microscopique



Réduction du nombre de fibres
…de leur taille…
Modification de leur type…

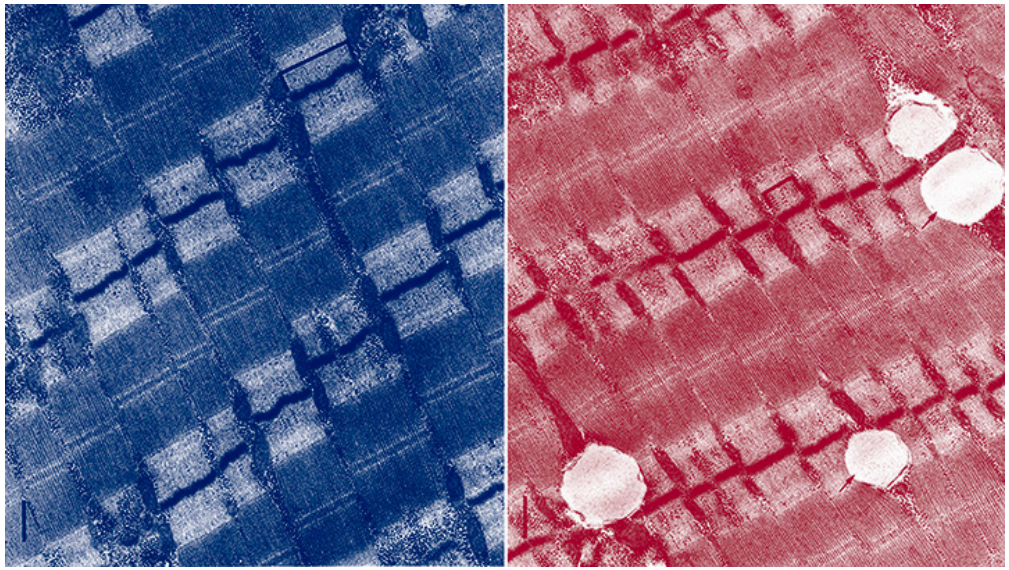
Modification de l'expression de gènes

Modifications des protéines de la contraction



5 jours

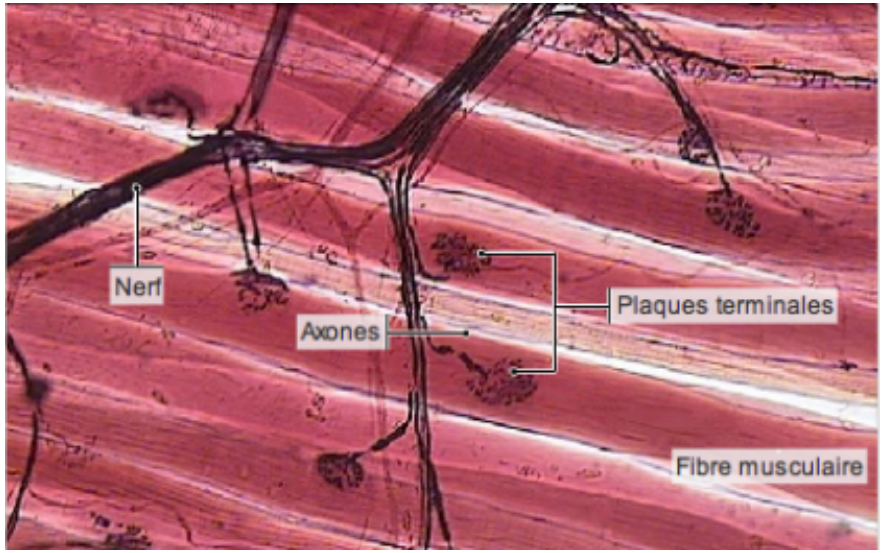
17 jours



Les modifications musculaires en apesanteur

Stabilisation
à 4 mois

- Masse
- Force plus que supposée
  (altération neuro-musculaires, de la taille et de la qualité des fibres)
- Vitesse de contraction
- Puissance maximale
- Coordination



Fatigabilité à l'effort
Sensibilité aux traumatismes

FIBRES MUSCULAIRES ROUGES
Fibres à contraction lente Type 1
(faible puissance, forte endurance)
Mitochondries Myoglobine Aérobies

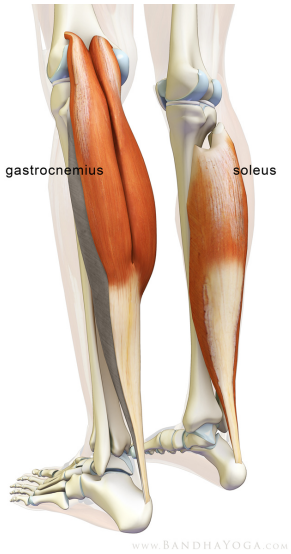
POSTURE SPORTS ENDURANCE

FIBRES MUSCULAIRES BLANCHES
Fibres à contraction rapide Type 2a 2b
(Forte puissance, faible endurance)
Glycogène Anaérobies

EXERCICES VIOLENTS

Les modifications musculaires en apesanteur
Evolution avec les contre-mesures

	Alitement	MIR	ISS
Masse musculaire	- 29 %	-17 %	- 13 % (-1 ; - 22)
Force musculaire (FM statique, dynamique, isocinétique)	- 40 %	-35 %	-25 % (-20 ; -29)
Puissance maximale			- 32 %
Fibres lentes vers rapides			12-17 %



Trappe & coll. Exercise in space : human skeletal muscle after 6 months aboard the International Space Station. 2009 J Appl Physiology

IRED

TVIS 1

CEVIS

Tapis roulant/vélo
50 min/j

+ Exercice contre résistance

Apport calorique insuffisant -17 à -23%

Les modifications musculaires en apesanteur

L'exercice musculaire. Plage horaire : 2h30/j

BD2

Colbert

CEVIS + VELO

Plage horaire pour l'exercice aérobie : 1h00 par jour

En pratique sessions de 30-45 minutes tapis roulant > vélo

Les modifications musculaires en apesanteur

L'exercice musculaire. Plage horaire : 2h30/j

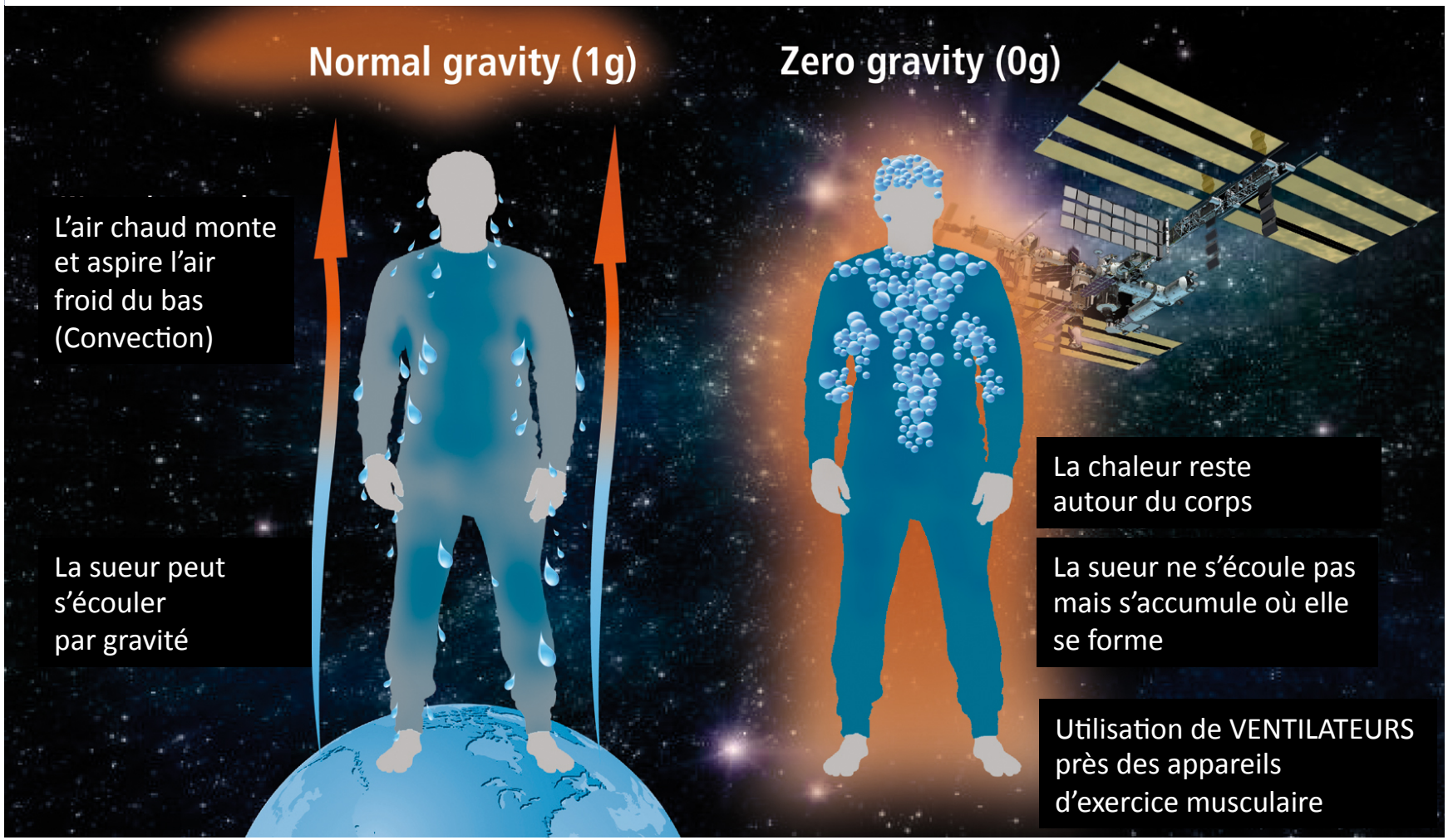
Plage horaire pour l'exercice contre résistance 1h30 par jour

ARED Advanced Resistive Exercise Device

IRED

L'exercice musculaire consomme des ressources :
Oxygène, eau, temps….

Déplacement de la sueur et de la chaleur sur Terre et dans l'espace



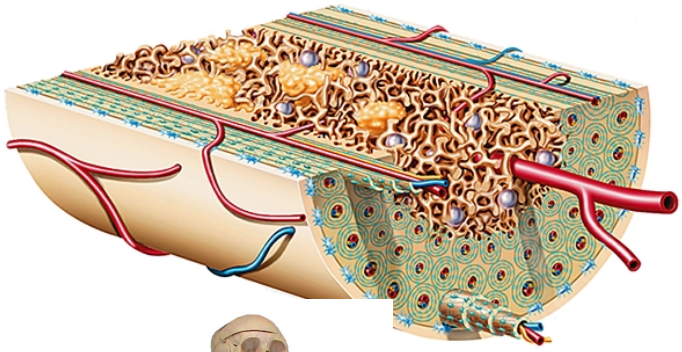
Les modifications musculaires en apesanteur
Récupération après vol

Programme de musculation

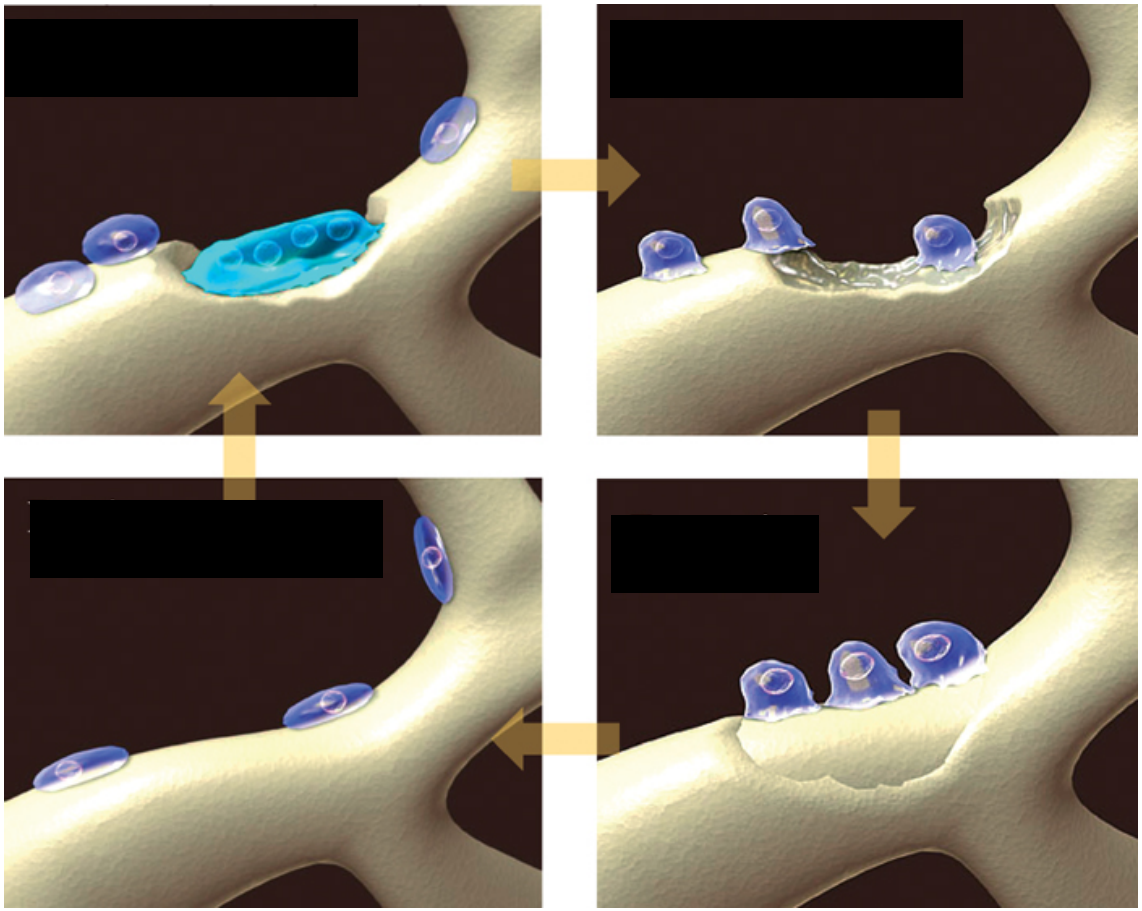
Délai de récupération masse et force musculaire : 1 à 2 mois

Les modifications osseuses en apesanteur

L'os est vivant !!!



Renouvellement 10 % par an
Equilibre construction / destruction

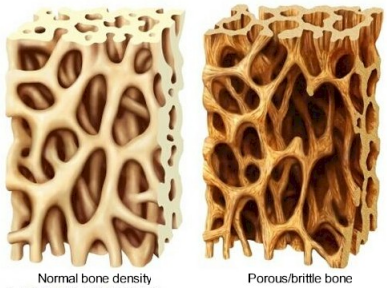


Les modifications osseuses en apesanteur

Facteurs de construction et de destruction osseuse

TOUTES LES CONTRAINTES

Calories
Protéines
Calcium
Vit D



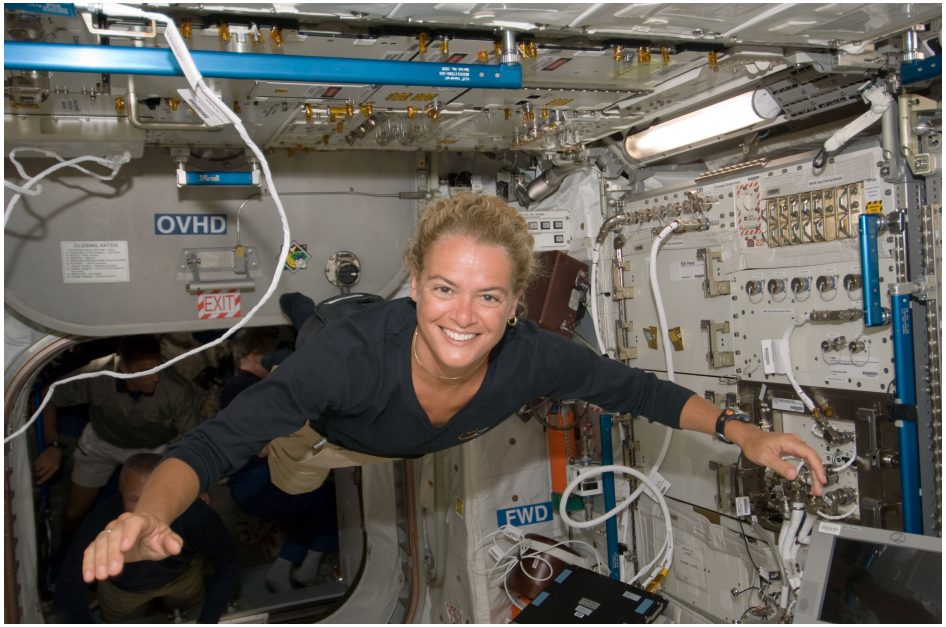
Manque d'activité / alitement

Apports nutritifs insuffisants
Tabac Alcool
Manque d'ensoleillement
Baisse des oestrogènes
Hormones PTH
Certains médicaments
Maladies inflammatoires, endocriniennes, etc…

VOYAGE SPATIAL

Les modifications osseuses en apesanteur
Les os porteurs (antigravitaires) sont les plus atteints

La perte osseuse est proportionnelle à la perte de charge.



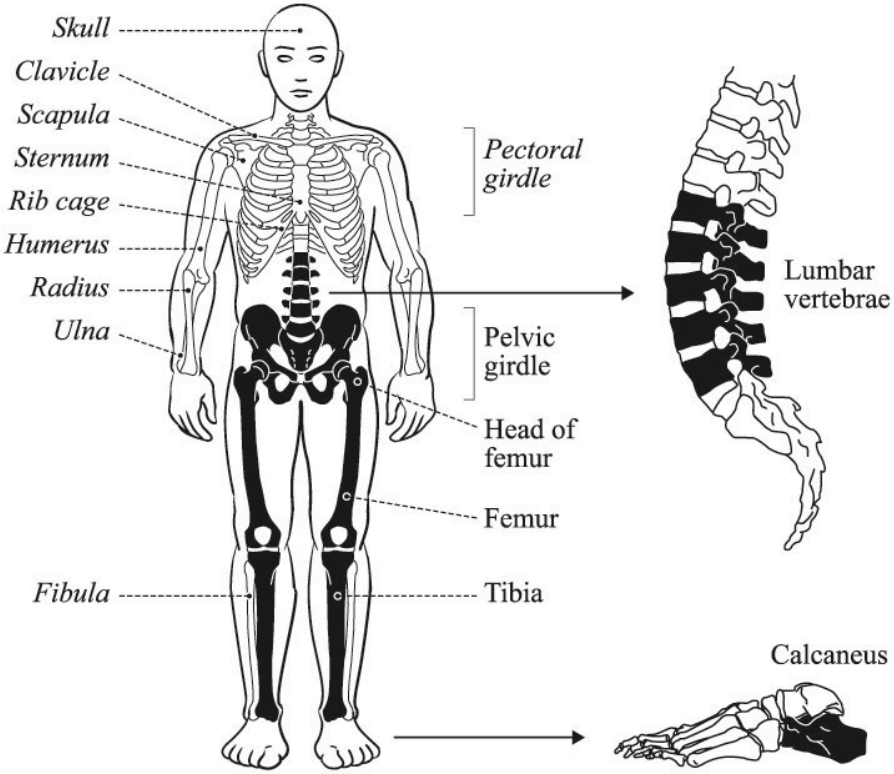


Schéma Gilles Clément

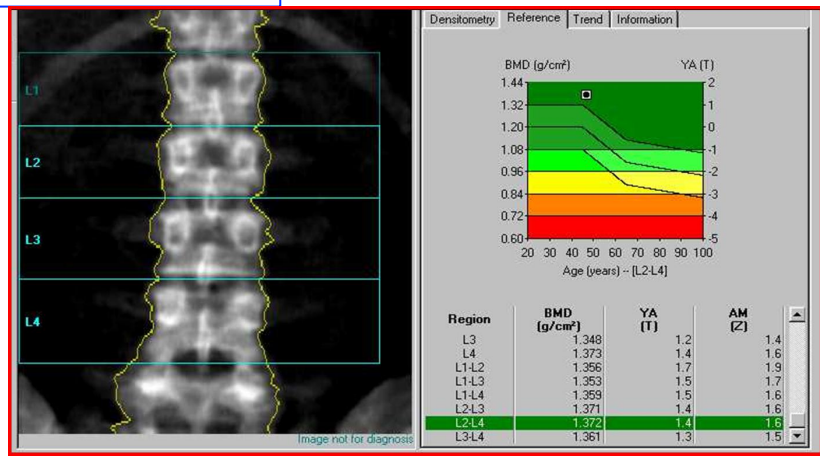
Les modifications osseuses en apesanteur
Estimation de la masse osseuse par la densité

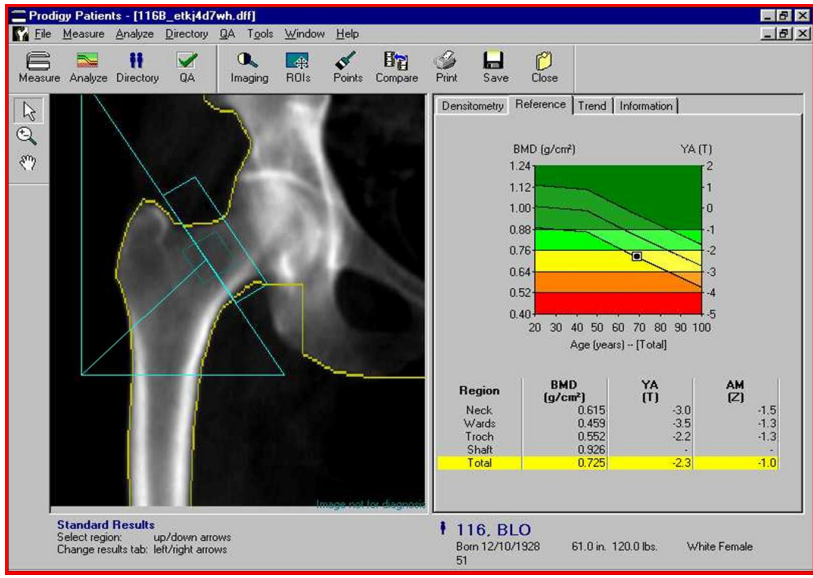
OSTEODENSITOMETRIE

Mesure la densité minérale osseuse DMO en mg/cm^2
Assimilée à la masse osseuse

Examen simple, répandu, peu irradiant, pour prédire le risque de fracture.

Ne renseigne pas sur l'architecture précise de l'os ni sur ses propriétés élastiques (collagène)

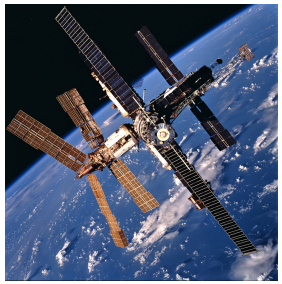




Les modifications osseuses en apesanteur

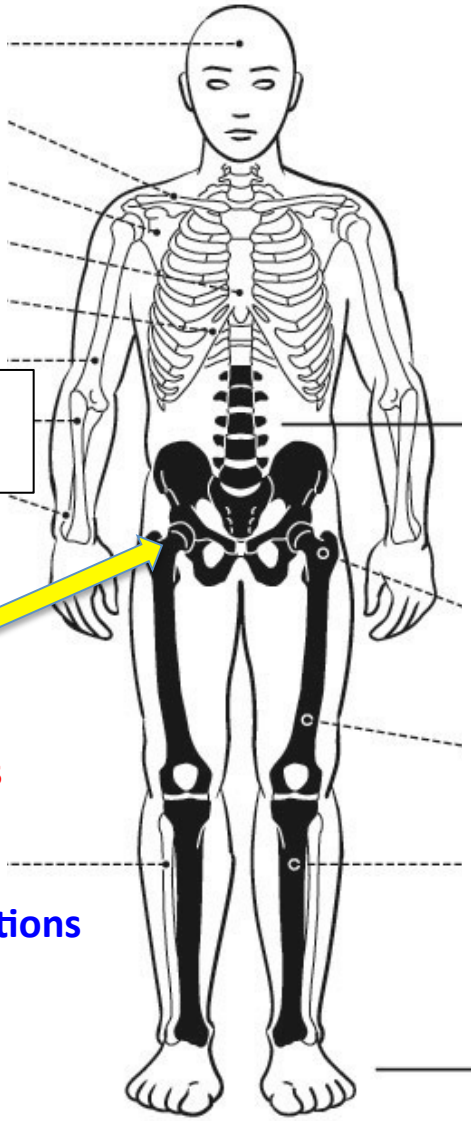
Perte osseuse 1,5 % / mois

Station MIR
6 MOIS



1 mois dans l'espace = 1 an sur Terre
1 an dans l'espace = 10 ans sur Terre

COL DU FEMUR
1 an espace : -12 à -18 %
Risque de fracture x 2-3
pour - 10%



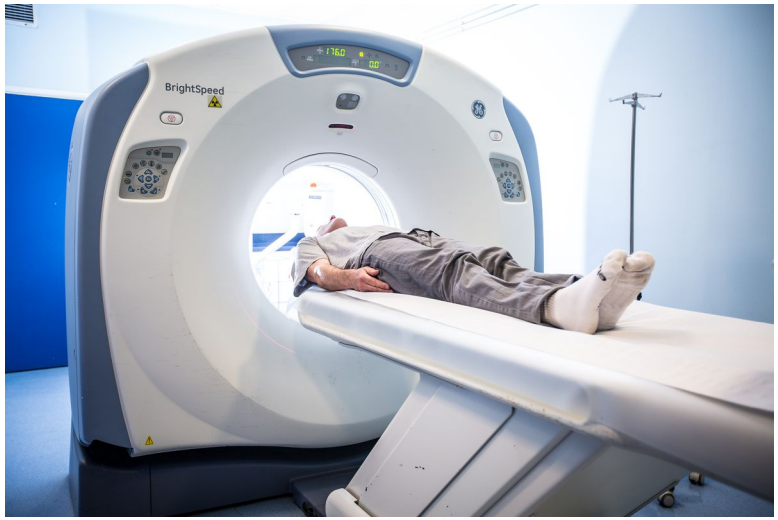
Col du fémur
1-1,5 % / mois

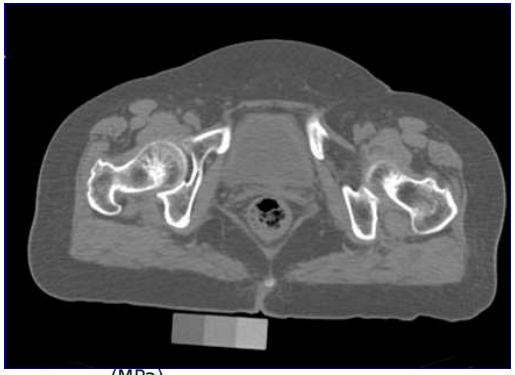
Grandes variations
Individuelles
Jusqu'à -20%
en 6 mois

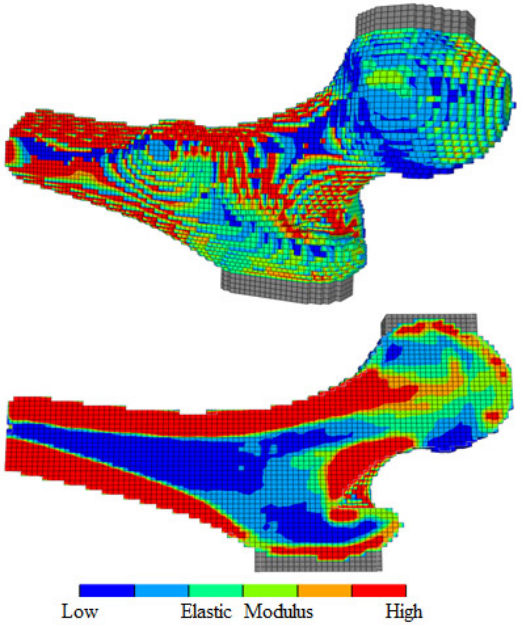
Vertèbres
Lombaires
1 %/mois

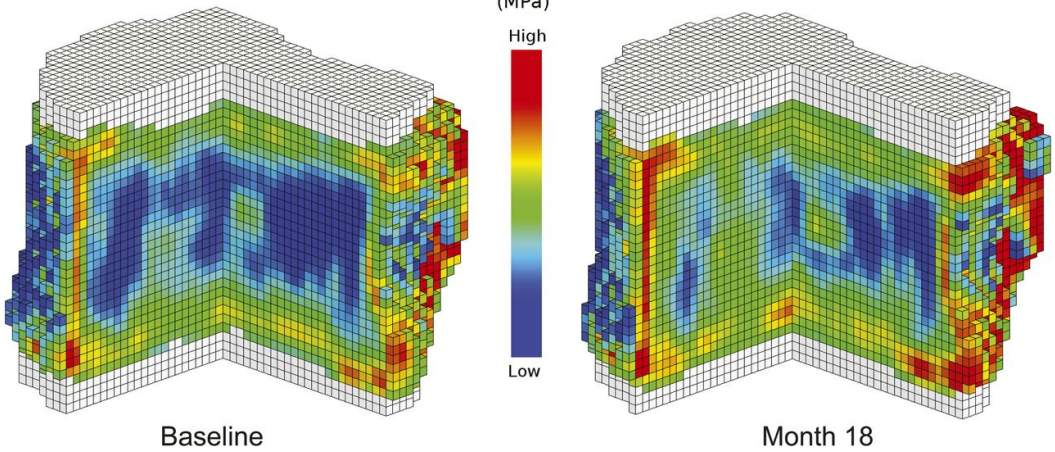
Calcanéum

Les modifications osseuses en apesanteur
Scanner + modèles mathématiques 3D
Finite Elements Method







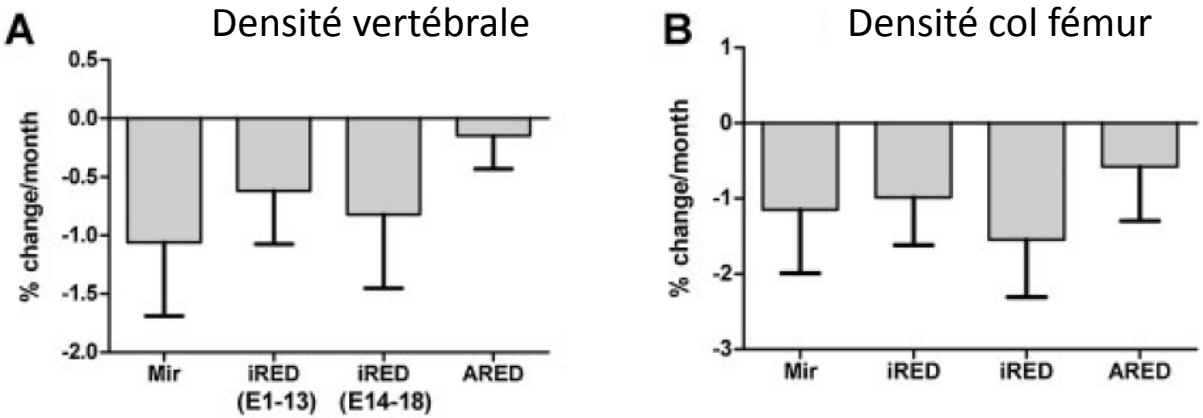


Architecture, lignes de force de l'os en 3D
Estime le comportement dynamique de l'os :

Résistance = rigidité + élasticité

Les modifications osseuses en apesanteur
Bonnes et moins bonnes nouvelles

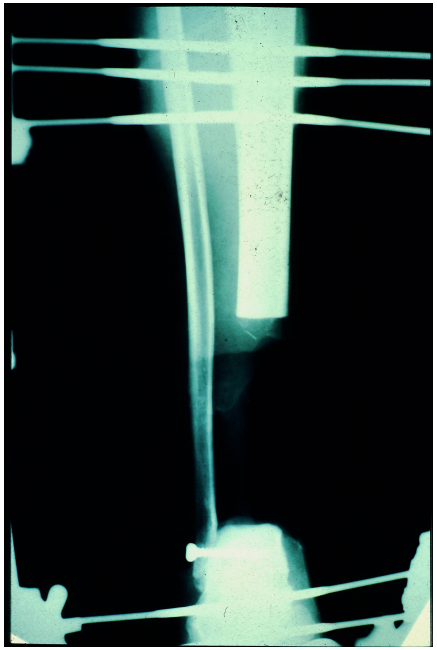
On sait mieux limiter la baisse de densité osseuse que par le passé
ARED Protéines Calories
Biphosphonates

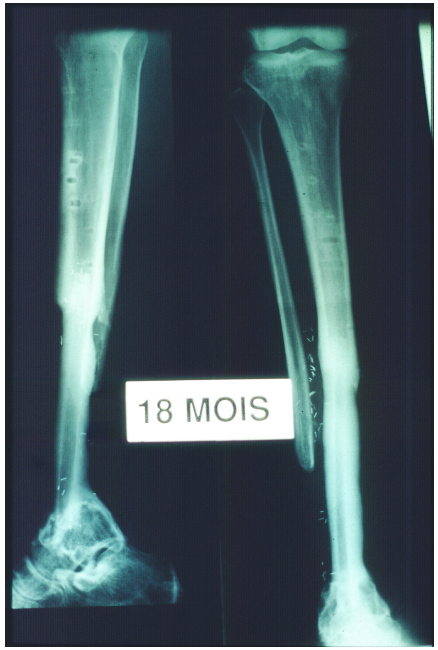


Le remodelage osseux est important mais l'architecture de l'os est moins bonne

La résistance osseuse, évaluée par les techniques récentes reste très diminuée
-14 % (jusqu'à -30 %) en 6 mois.

Les modifications osseuses en apesanteur
Bonnes et moins bonnes nouvelles : les fractures ?





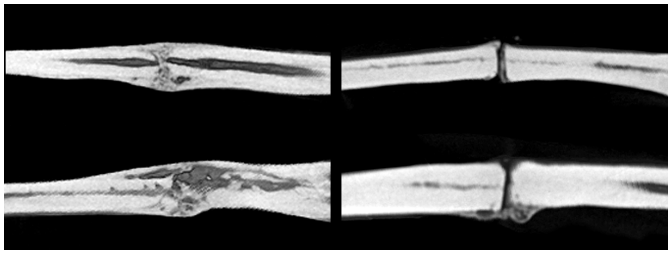
SUR TERRE

A condition de contraintes mécaniques (contrôlées) l'os consolide.
Ex : doublement du volume du péroné après greffe sur le tibia

EN APESANTEUR

L'absence de contrainte mécanique compromet la consolidation d'une fracture
mettant en jeu la vie de l'astronaute et compromettant la mission

Cal osseux moins gros (-20 -30 %), moins minéralisé
Moins d'os cortical reconstruit
Résistance osseuse diminuée (-84 %)
Absence de consolidation : 46%



Fracture péroné rats

Les modifications osseuses en apesanteur
Exercice physique et autres contremesures

Produire l'équivalent force sur le squelette de 4 heures de marche par jour

Tapis roulant et surtout <u>exercice physique contre résistance ARED</u>
(certains exercices spécifiques à certains os)

+ médicaments : biphosphonates (Alendronate ++)
Médicaments d'avenir : Anticorps antisclérostine testé sur rat
Calcium 1 gr/j
Améliorer la prise de calcium et de proteines

Penguin suit

ARED

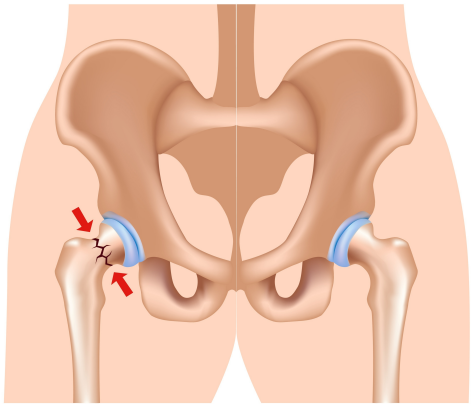
Les modifications osseuses en apesanteur
Récupération après le voyage spatial

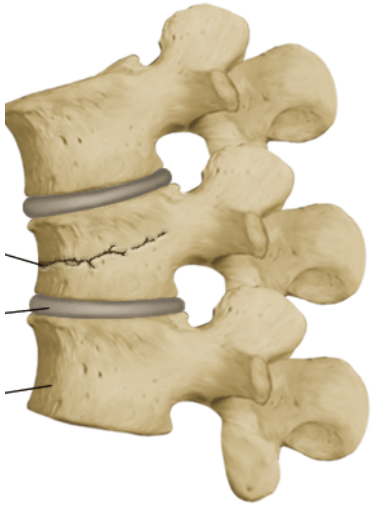
La perte osseuse peut se poursuivre encore après le retour

Récupération de la densité osseuse pour la majorité des astronautes à 3 ans, pour certains jamais

Architecture de l'os moins bonne

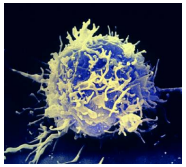
Risque d'ostéoporose précoce et de fractures plusieurs décennies après le retour

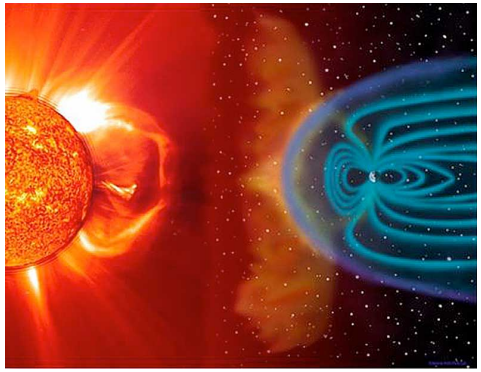


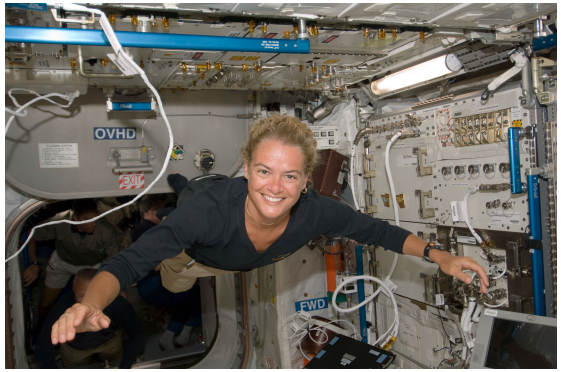


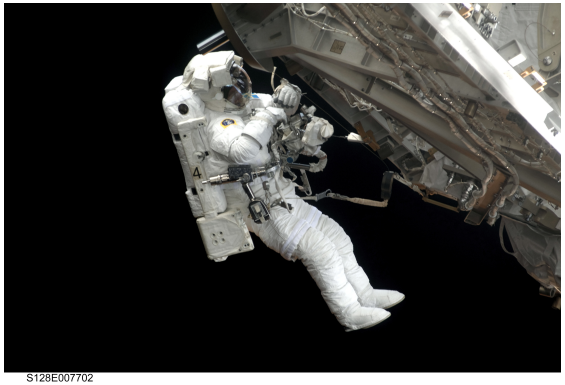
Système immunitaire et infections en apesanteur

Facteurs agissant sur le système immunitaire

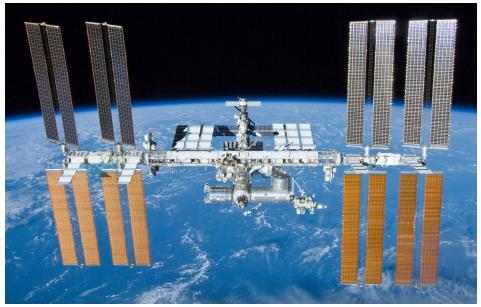








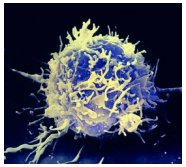
S128E007702



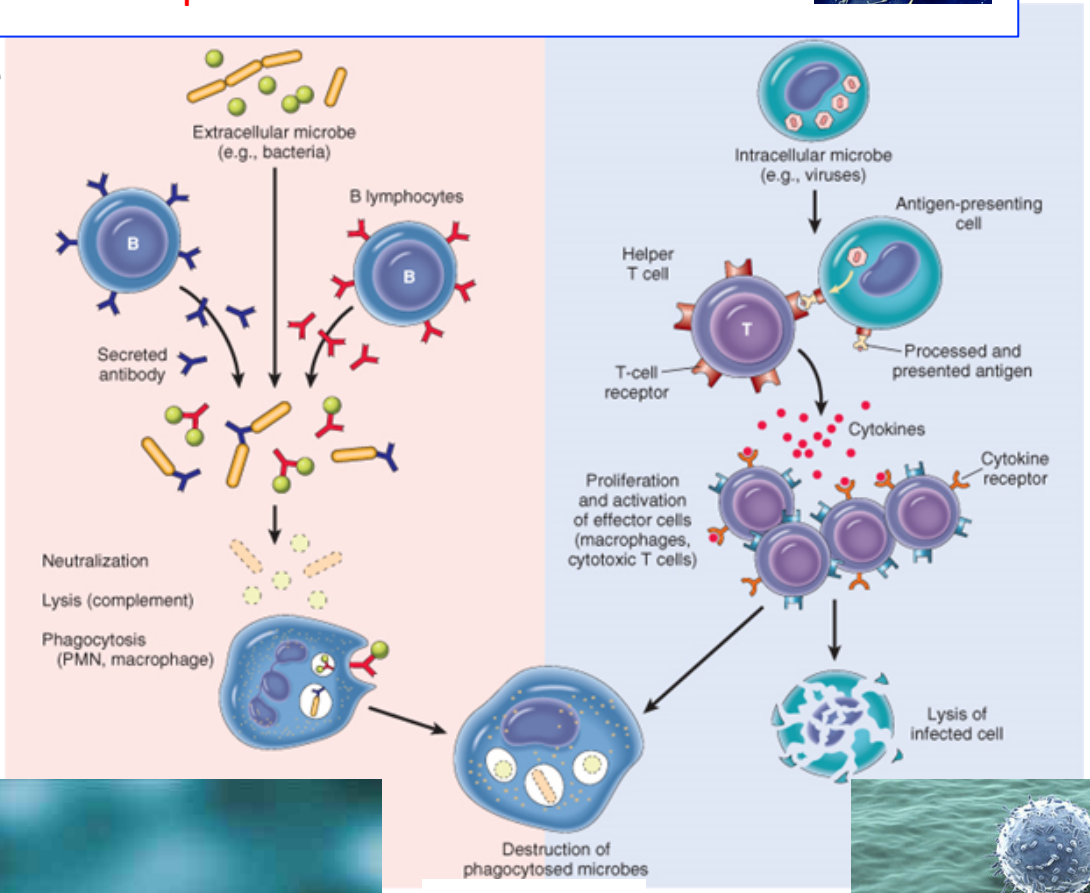
Multiples facteurs d'altération du système immunitaire

Système immunitaire et infections en apesanteur

Un système immunitaire perturbé



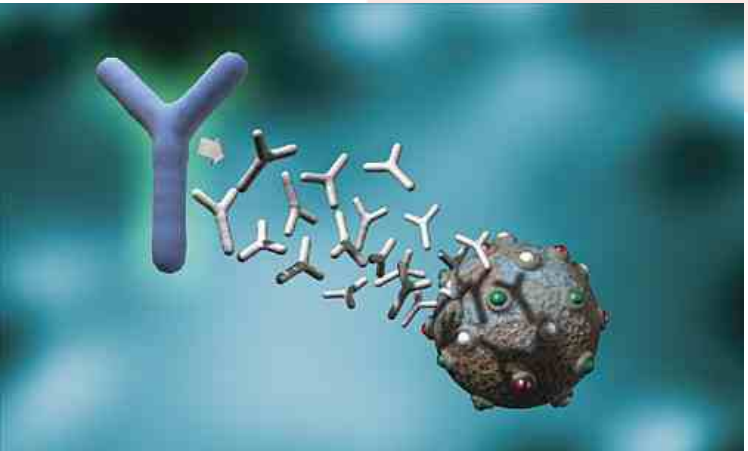
Immunité humorale
CONSERVEE

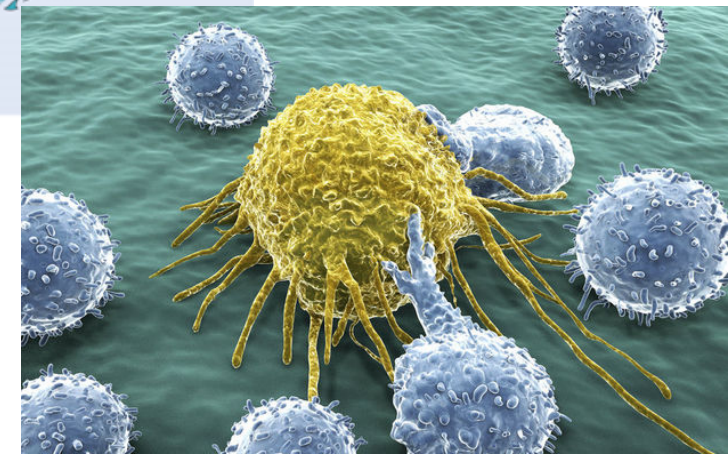


Immunité cellulaire
ALTEREE

Diminution de l'action cytotoxique des Lymphocytes T CD8
« Tueurs »

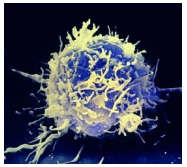
Certaines molécules de l'inflammation (Cytokines) augmentées
(TNFα , interleukines)





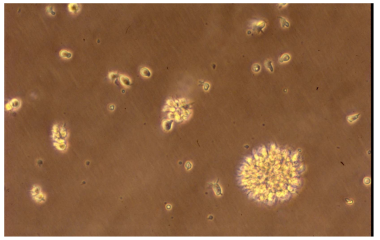
Système immunitaire et infections en apesanteur

Caractéristiques microbiennes observées dans l'espace

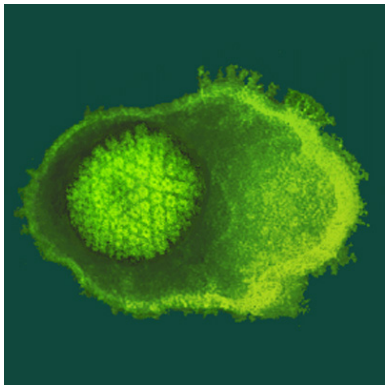


1. Certains virus latents se réactivent

EBV : mononucléose lymphomes

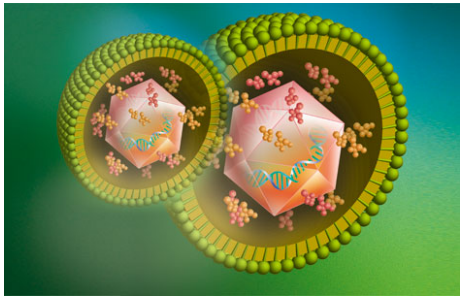


VZV : Varicelle zona

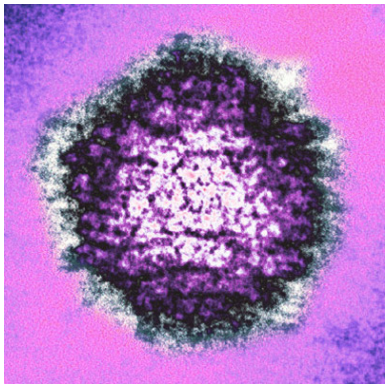


Détectés dans la salive, urine, chez 25 % des astronautes contre 1,6 % de la population

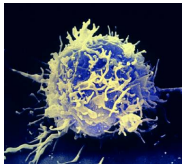
CMV : rétinites, pneumopathies, colites



HSV : herpès



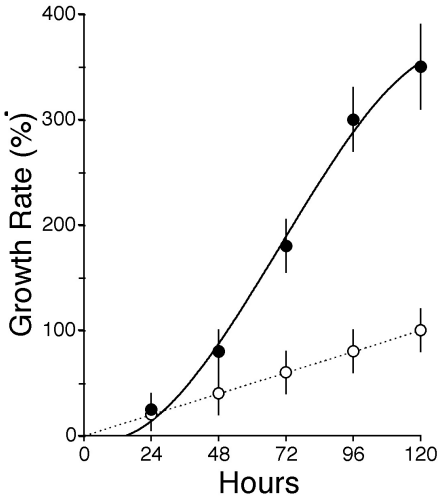
Système immunitaire et infections en apesanteur
Caractéristiques microbiennes observées dans l'espace



2. Comportement bactérien différent en apesanteur :

Augmentation de la virulence et du pouvoir pathogène

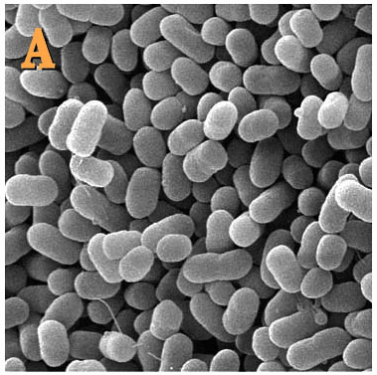
ex : salmonella typhimurium : Rats 100 % DC après inoculation à J10 / 40 % Terre.

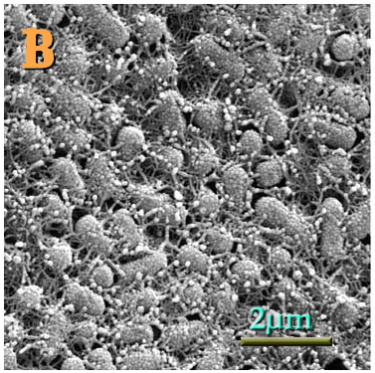


Acquisition de résistances aux antibiotiques / désinfectants et produits de purification.

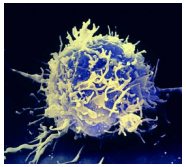
Multiplication plus rapide

Formation de BIOFILMS (colonies + polysaccharides)
(Résistance + ex : cystites)
Colonisation/dégradation / corrosion d'équipements de bord.





Système immunitaire et infections en apesanteur
Conséquences lors des voyages spatiaux prolongés



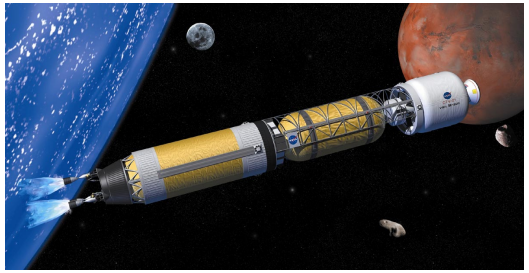
1. Sensibilité augmentée aux infections

2. Hypersensibilité / allergies
   30%/5% réaction cutanée vaccin

1. Risque de maladies auto-immunes ?

Quelles contre mesures ?

Médicaments ?



Protections anti radiations ?

Suppléments nutritifs ?

Exercice ?

Autres …?

L'œil et la vision en apesanteur
1. Conjonctivites / Corps étrangers

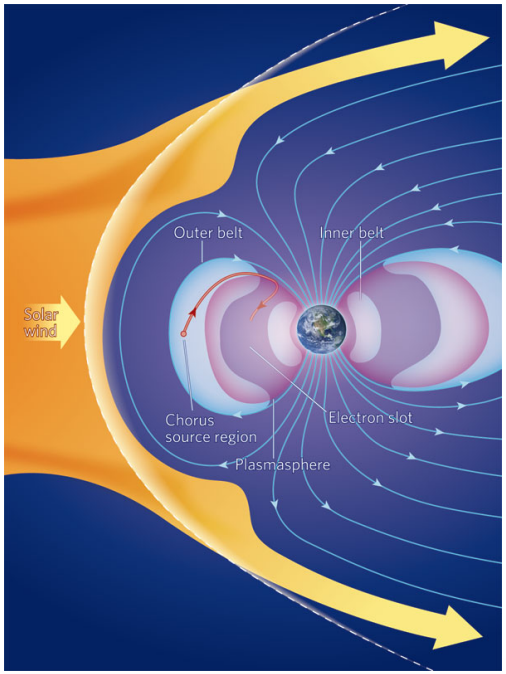
Ongles
Poils rasage
Cheveux
Miettes
Débris divers
Germes
Poussières

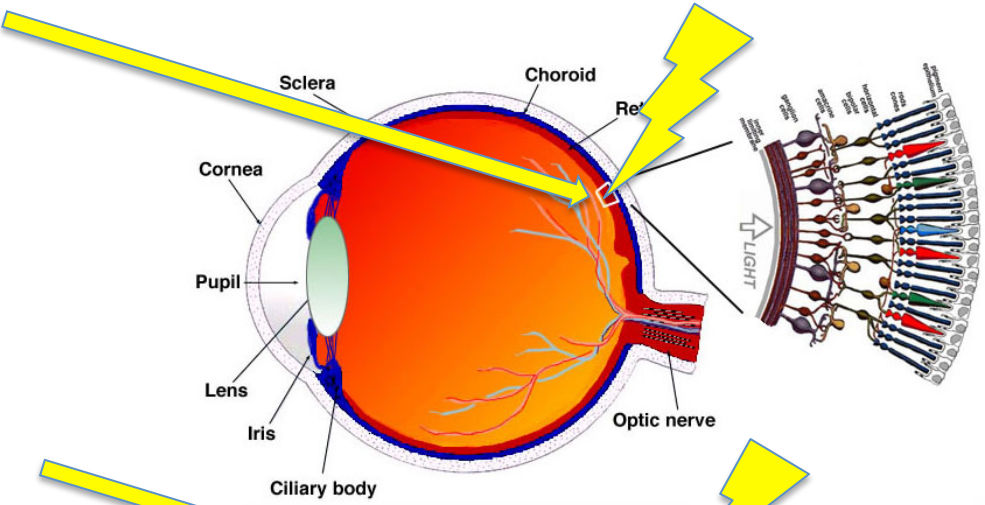
Nombreux corps flottants

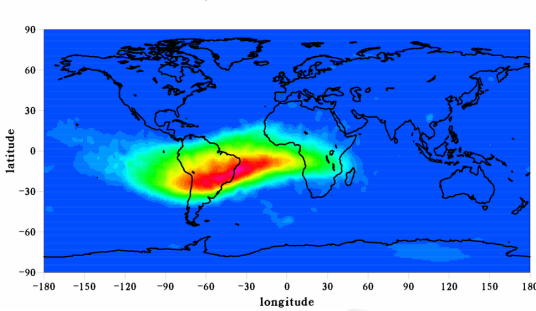
L'œil et la vision en apesanteur
2. Les flashes lumineux.

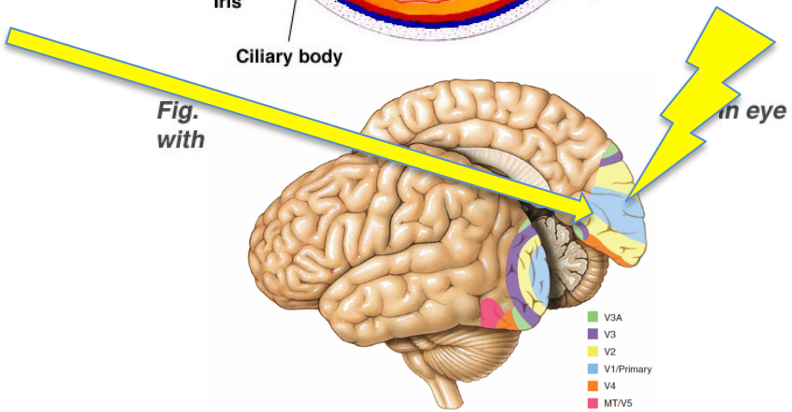
Particules à haute énergie du rayonnement cosmique
Impacts sur la rétine et l'aire visuelle du cerveau

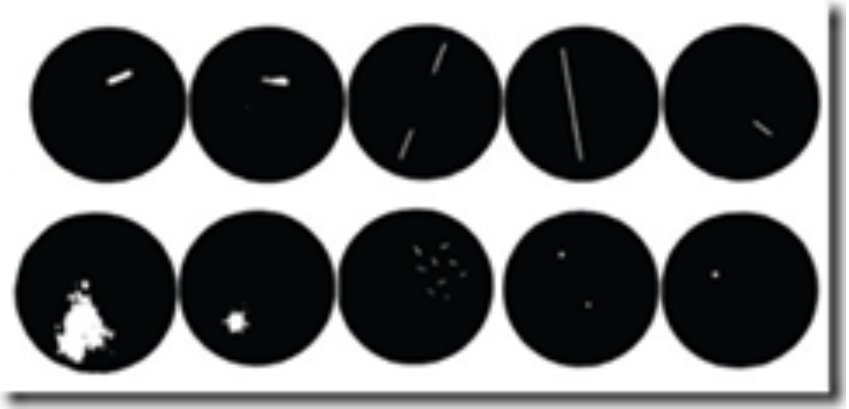
Etude 2003 59 astronautes : 80 % flashes. 20 % perturbe sommeil
Couleur prédominante : blanc. Jaune 10%
Forme prédominante : allongée (étincelles, comètes)









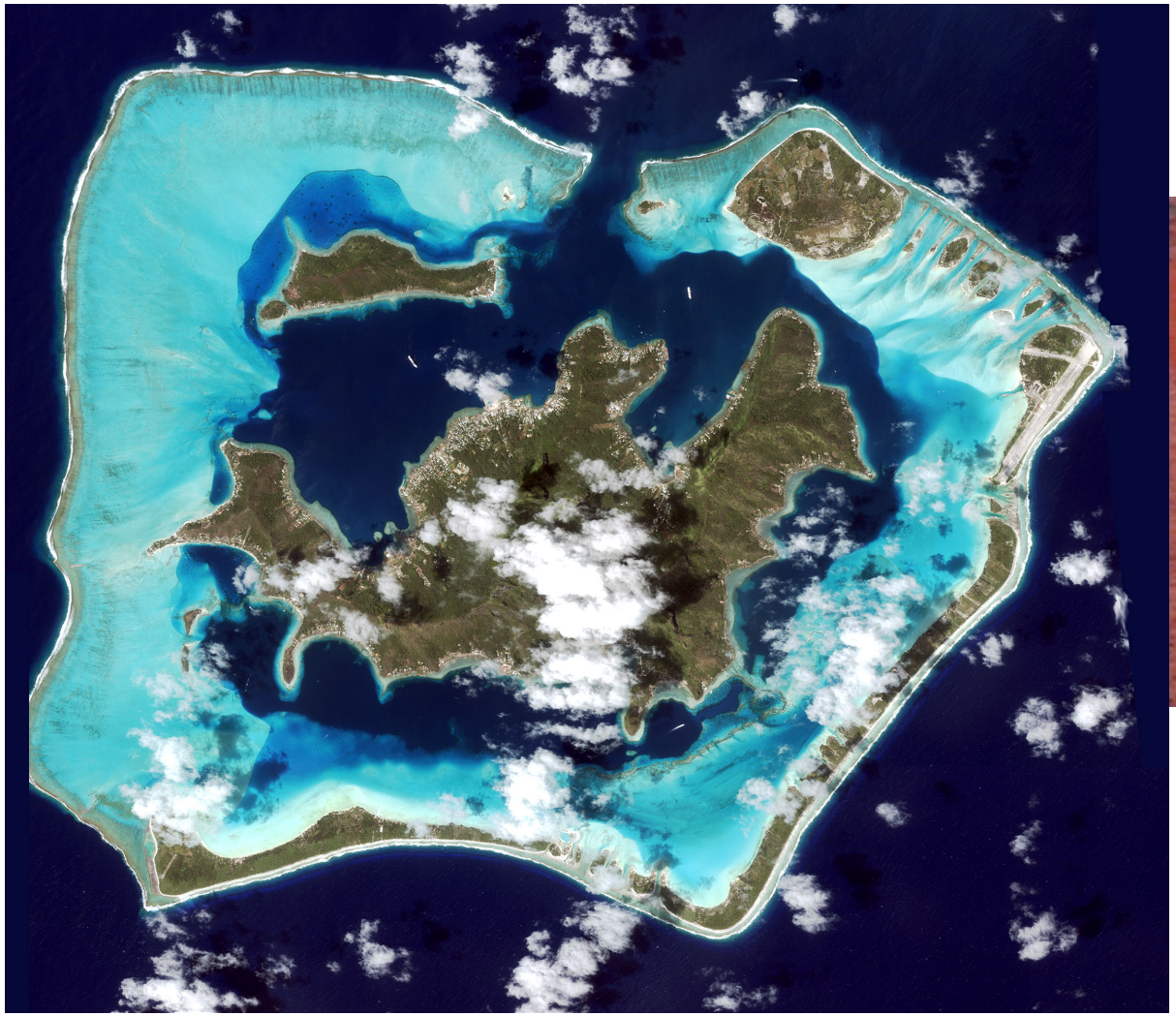


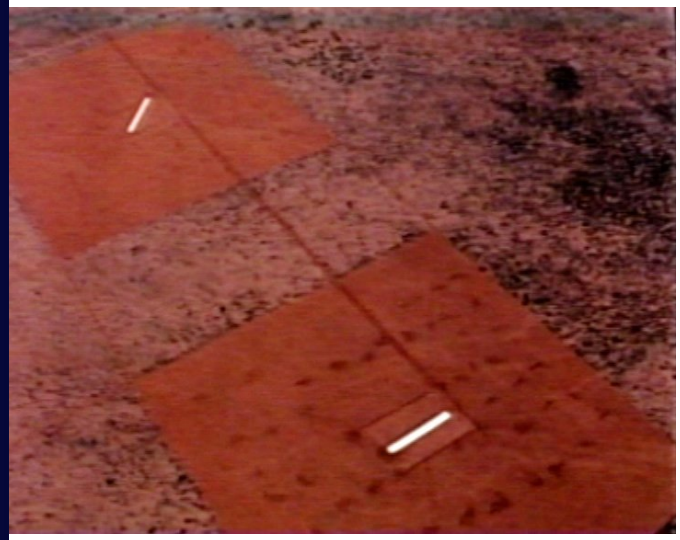
L’œil et la vision en apesanteur

3. L’acuité visuelle

Non améliorée comme on le pensait au début de l’ère spatiale

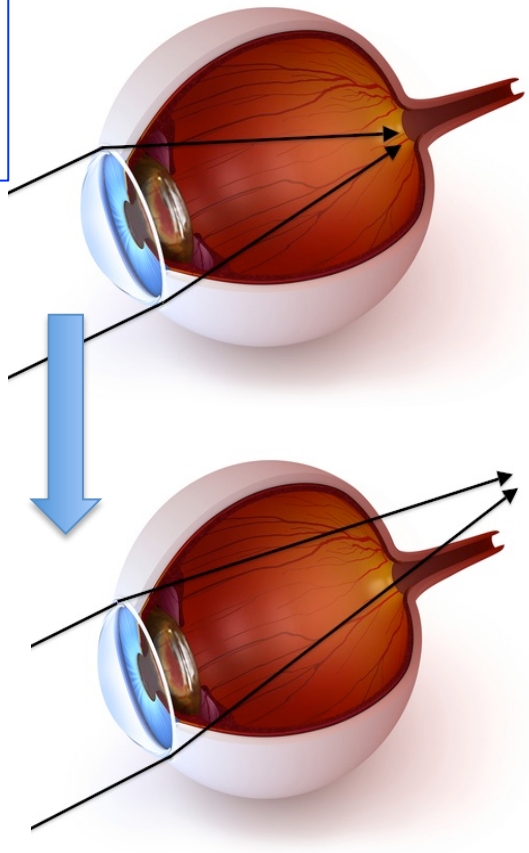
Le contraste des couleurs permet de mieux identifier certains éléments naturels.





Gemini : Expérience visuelle visible depuis l’espace

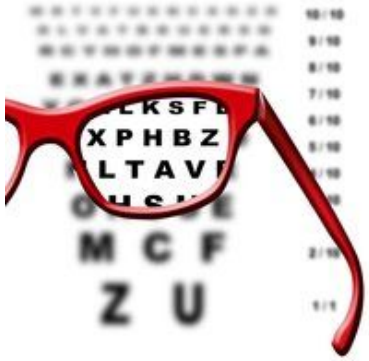
L'œil et la vision en apesanteur
3. L'acuité visuelle



Baisse de l'acuité visuelle	Rapportée	Prouvée
Missions longues : Mir/ISS	60 %	54 %
Missions courtes : Navette spatiale	25 %	21 %

Par modification forme de l'œil ?
Œil plus rond, plus court : hypermétropie
Modification 1 – 2 dioptries dans la correction
Temporaire et mineur ?

Baisse de l'acuité visuelle de près +++ parfois non réversible
Baisse de la vision périphérique



L'œil et la vision en apesanteur

3. L'acuité visuelle

Apport des moyens d'imagerie et de mesure

Fond d'œil (images, vidéos)

OCT Interférométrie laser

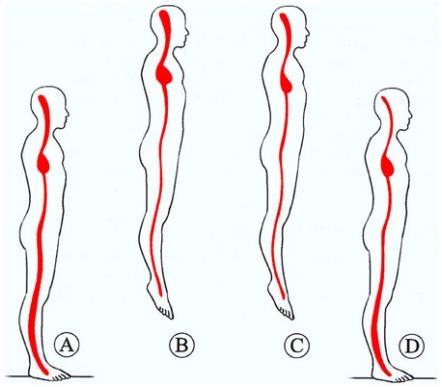
Techniques non invasives de mesure de la pression intracrânienne

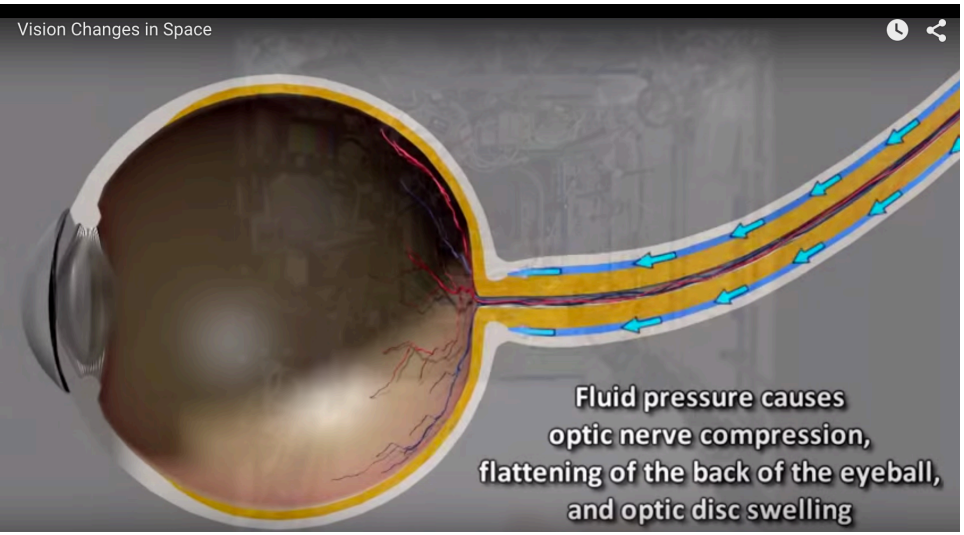
IRM

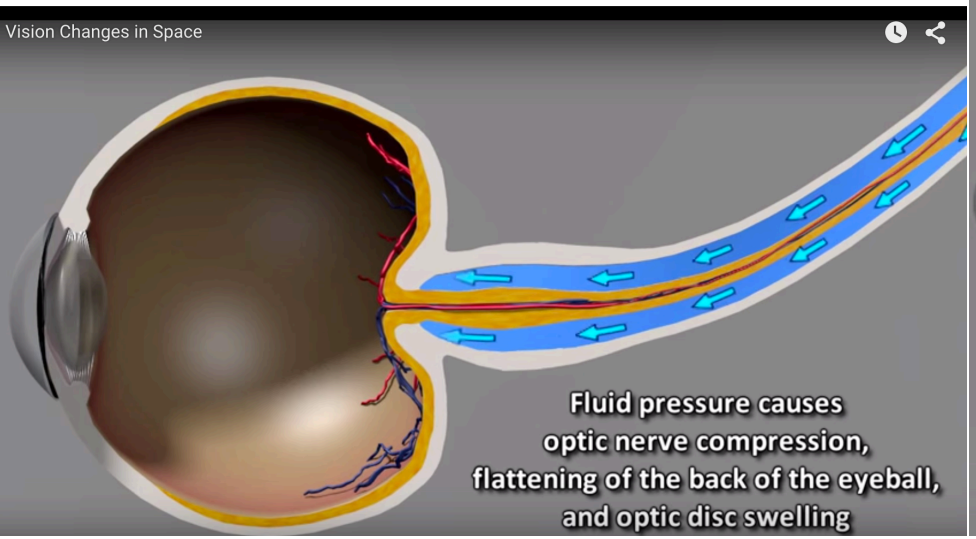
L'œil et la vision en apesanteur

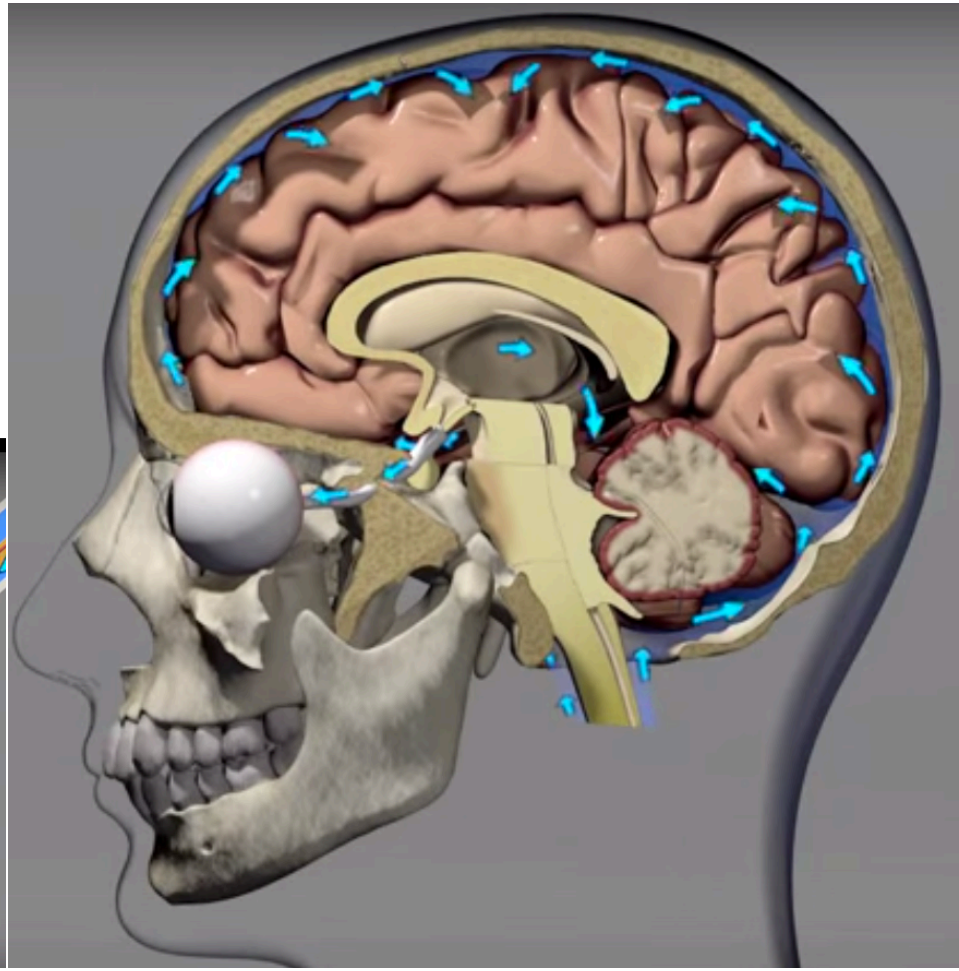
3. L'acuité visuelle

Apport des moyens d'imagerie et de mesure



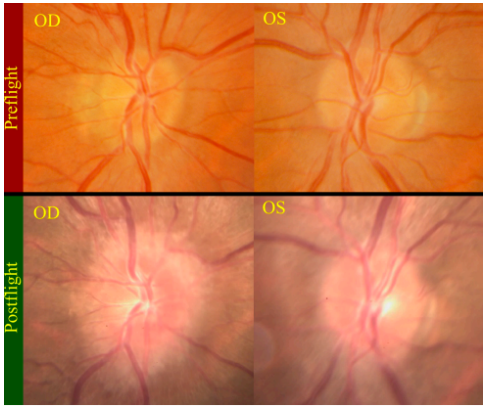




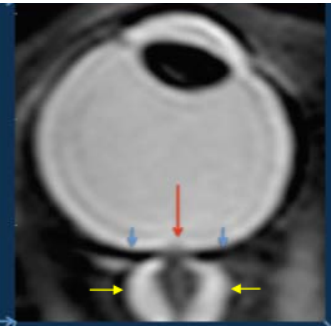


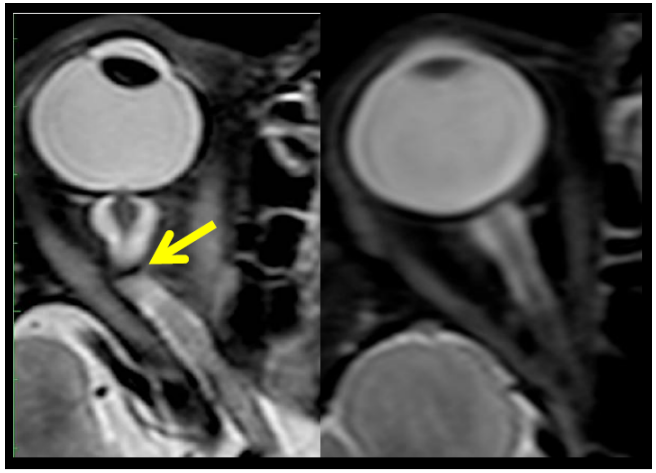
L'œil et la vision en apesanteur
3. L'acuité visuelle
Hypertension intracrânienne et oculaire

Œdème papillaire
Plis rétiniens
Dépôts cotonneux



IRM :Aplatissement de l'arrière de l'œil et
Gonflement de la gaine du nerf optique





VIIP Syndrom :Visual Impairment / Intracranial Pressure 41 % Astronautes US

Pourquoi certains astronautes sont ils épargnés ?

Facteurs individuels favorisants ou protecteurs ?

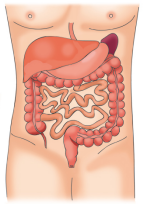
Space obstructive syndrome 20 % : compression de la veine jugulaire interne en apesanteur provoquant une congestion veineuse cérébrale

Facteurs favorisants l'hypertension intracrânienne :
Rôle de l'excès de CO_2 ?
Rôle de l'exercice contre résistance ARED ?
Absorption excessive de Sodium ?
Facteurs individuels favorisants ou protecteurs

A élucider avant les missions spatiales longues

Le système digestif en apesanteur

1. Système digestif haut



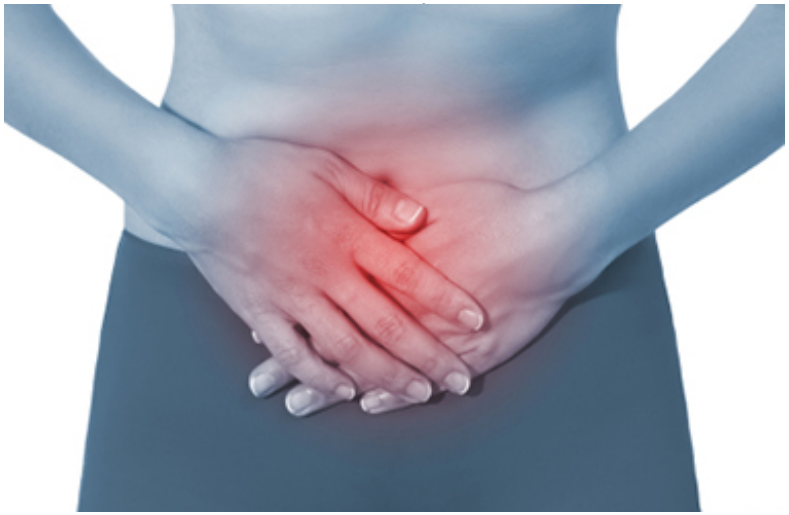
Diminution de l'appétit (40 % des astronautes MIR)

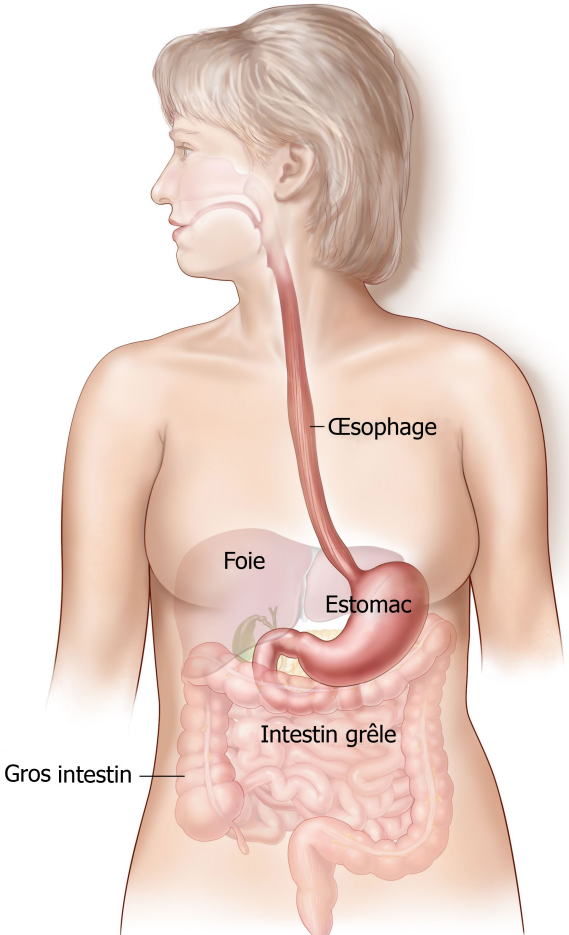
- Mal de l'espace
- Sensation de satiété gastrique
- Caractéristiques des aliments
- Saveur moindre des aliments

Diminution de l'évacuation de l'air avalé

- Augmentation des gaz digestifs
- Douleurs / inconfort

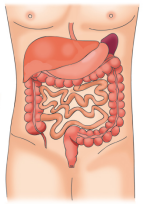
(





Le système digestif en apesanteur

2. Système digestif bas



Constipation :

- Mobilité intestinale diminuée
- Déshydratation liée au mal de l'espace

Absorption intestinale est diminuée :

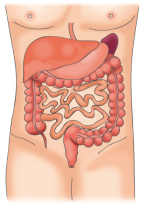
- Calcium, vitamines, acides aminés, sucres
- Réduction de l'apport calorique
- Médicaments

Modification de la flore intestinale

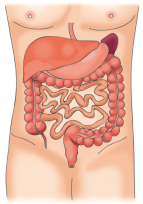
- Réduction des lactobacilles
- Augmentation des pathogènes (Clostridium)
- Liée au stress cytokines

Le système digestif en apesanteur

2.Système digestif bas



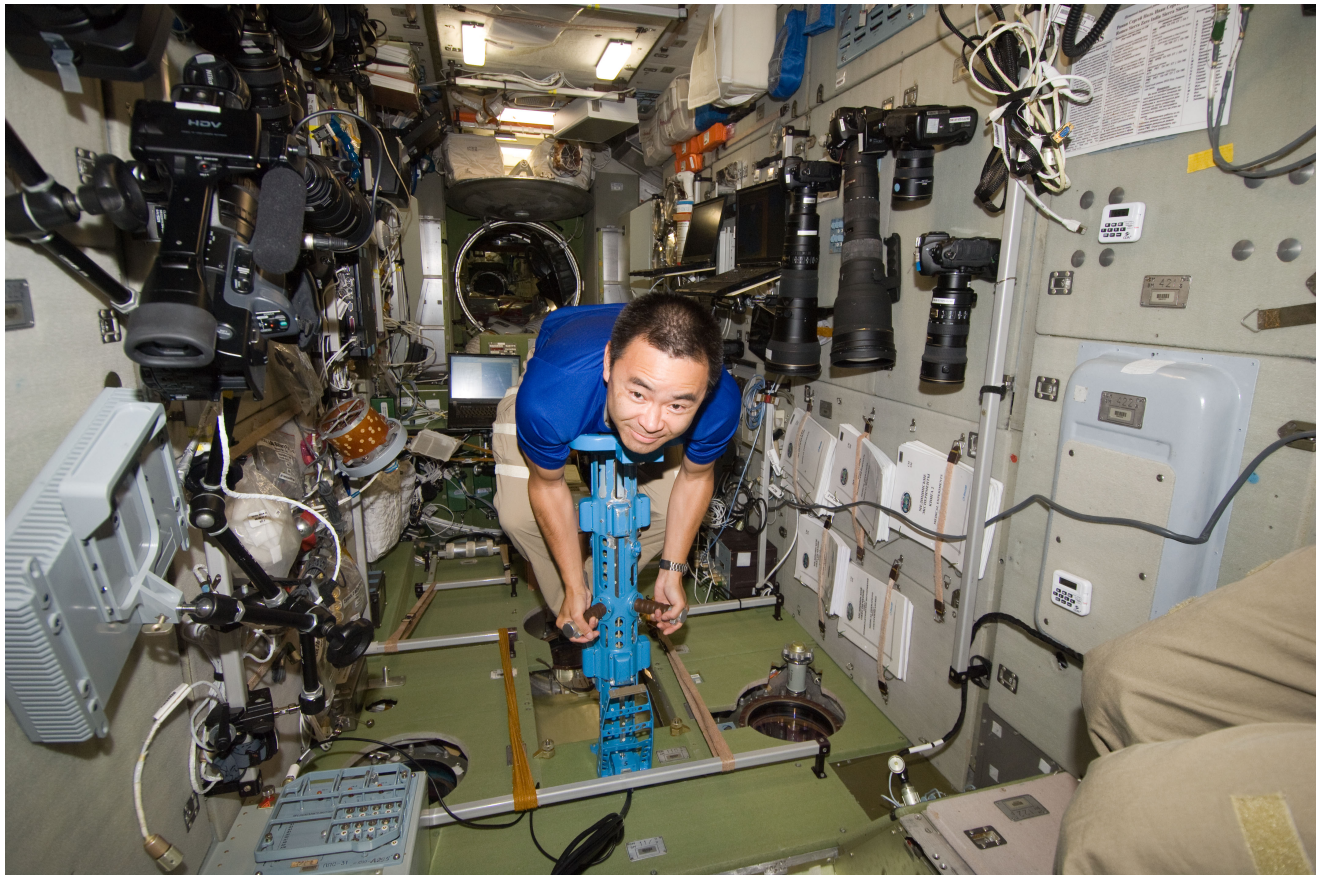
Métabolisme et nutrition en apesanteur
Le poids : perte et mesure



Perte de poids : 3-4 %

Jusqu'à 10-15 %
Missions longues MIR

1% : perte d'eau
Le reste : perte de masse grasse et masse musculaire

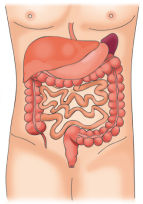


SLAMMD : Space Linear Acceleration Mass Measurement Device

En cause : Dépenses caloriques augmentées (exercice musculaire)
Besoins caloriques équivalents activité forte (3400 Cal/ J)

$$\text{Masse} = \frac{\text{Force}}{\text{Accélération}}$$

Métabolisme et nutrition en apesanteur
Evolution de la nourriture spatiale



Mercury and Gemini Food (1961-1966)

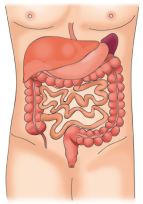
Apollo Food (1968-1972)

Skylab Food and Tray (1973 - 1974)

Shuttle Food Tray

Métabolisme et nutrition en apesanteur

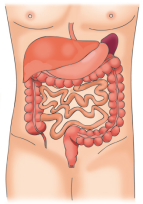
Caractéristiques des aliments consommés dans l'espace

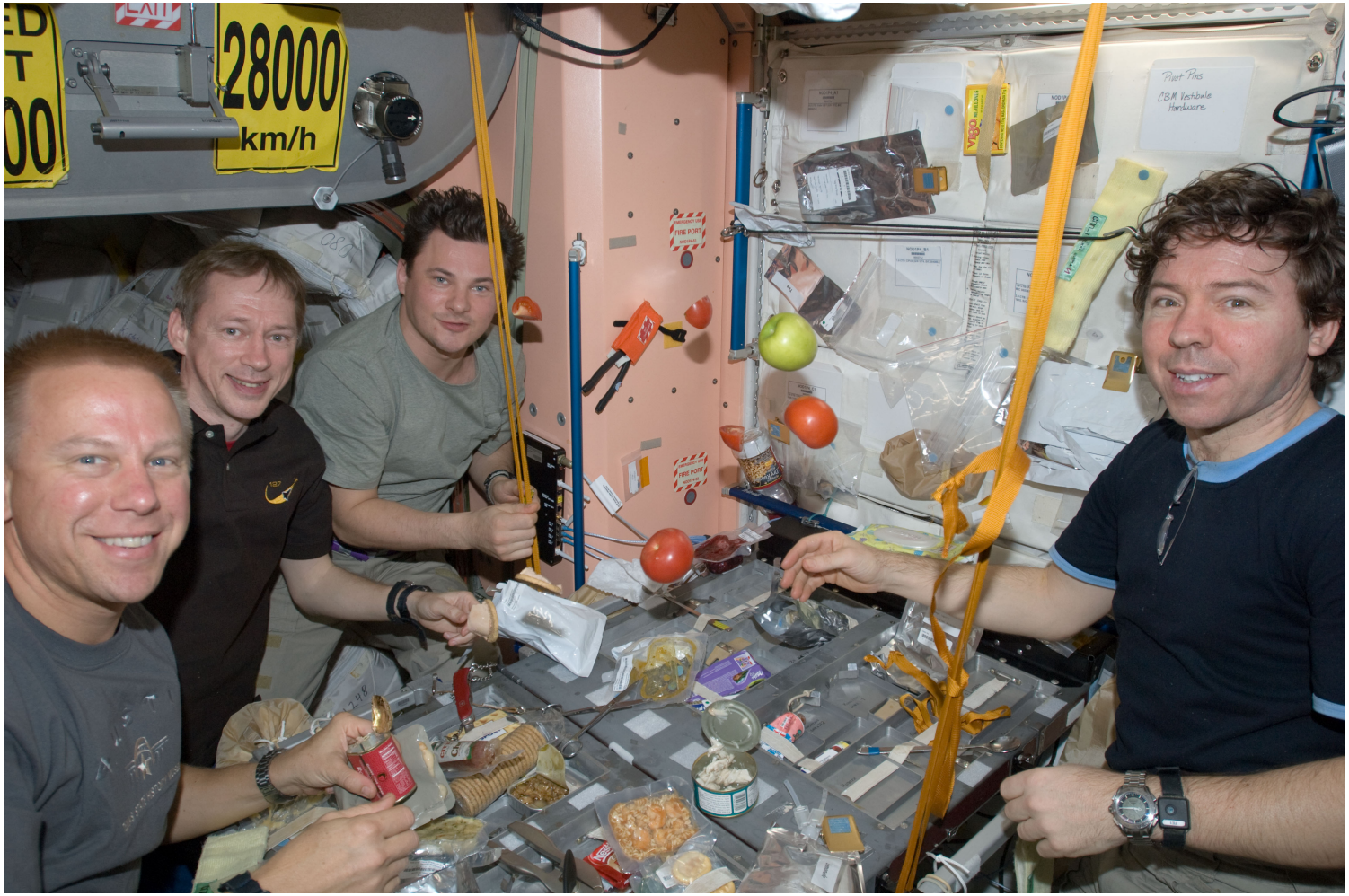


ISS025E011211

Métabolisme et nutrition en apesanteur

Caractéristiques des aliments consommés dans l'espace





Choix des menus

Type de boissons
Alcool ?

Mode de conservation

Préparation

Texture des aliments

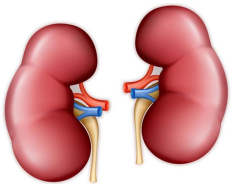
Condiments, épices

Produits frais ?

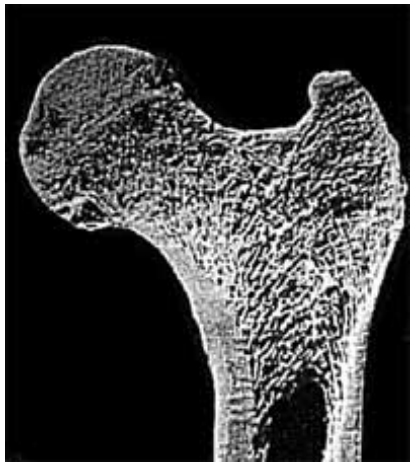
Repas festifs ?
Aliments apportés par les astronautes ?

Nasa Space Food Systems Laboratory

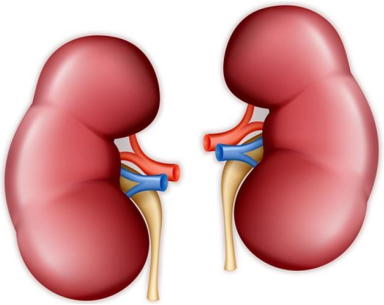
L'appareil urinaire en apesanteur
1. Calculs urinaires coliques néphrétiques



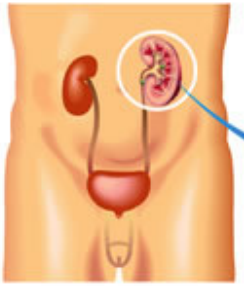
1 épisode en vol Saliout. 11 après vol.

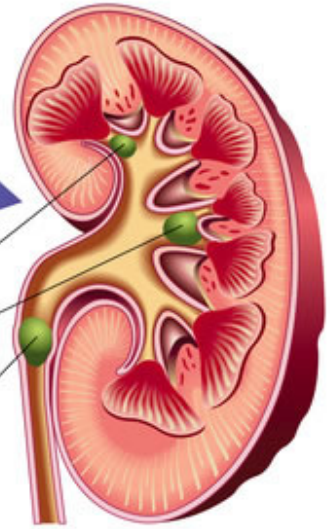


Calcium sanguin



Calcium Urinaire

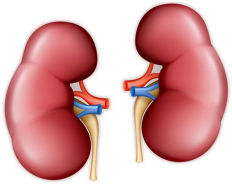




Procédure Nasa sonde JJ
Citrate de K+ : Urocit-K
Biphosphonates

L'appareil urinaire en apesanteur

1. Rétention aigüe d'urines



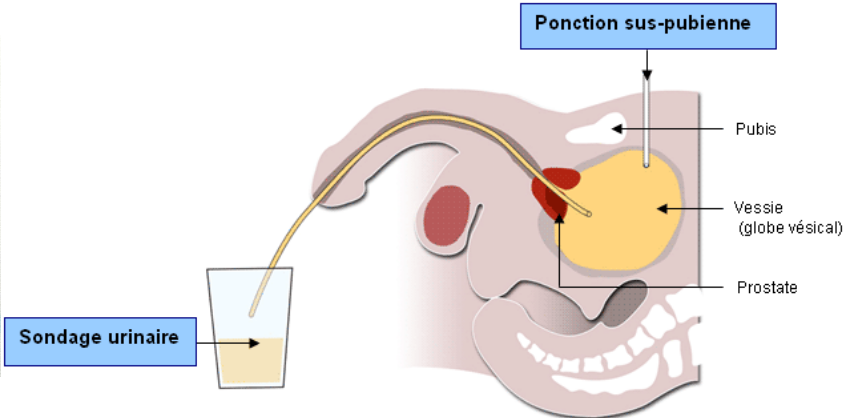
4 cas Navette spatiale

Facteurs favorisants :

Médicaments
(anticholinergiques)
Attente prolongée (avant lancement, avec protections)
Baisse de la sensibilité ?
Microgravité ?

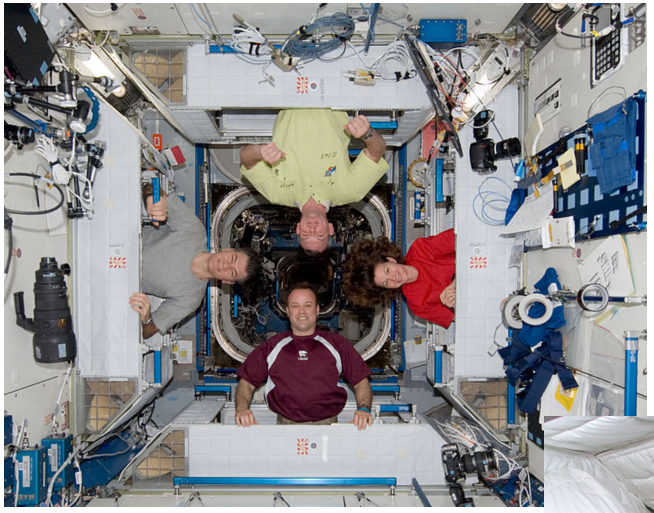
Urétrite prostatique
Atcd de rétrécissement urétral

Risque de reflux d'urines
et d'infection en apesanteur :
sondage intermittent



Le sommeil en apesanteur
La chambre à coucher spatiale

Navette Spatiale



Station spatiale internationale

Le sommeil en apesanteur
Facteurs perturbant la qualité du sommeil

Perte des signaux naturels : lumière bruit température
16 levers et 16 couchers de soleil par 24 h...

Réduction temps sommeil 3 mois avant la mission

Bruit (navette flightdeck 63 dB)
Luminosité
Température
Horaires décalés
Rythme circadiens, cortisol
Décalage horaire
Charge de travail
Activités de repos « débordant » sur le temps de sommeil
Préoccupations intellectuelles
« Lit » spatial moins confortable
Sommeil paradoxal plus long
Sommeil profond plus court

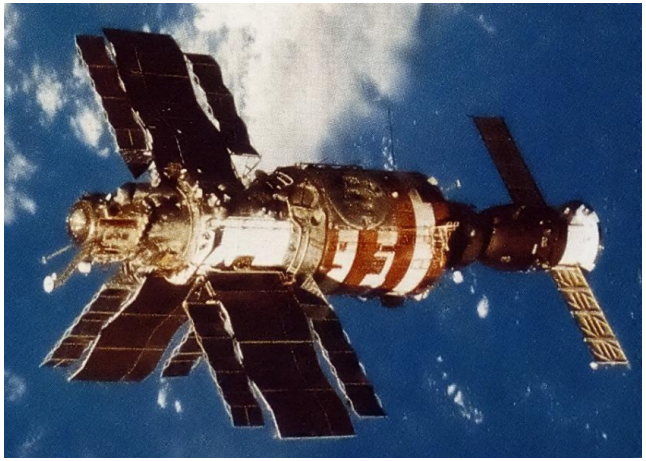
Durée moyenne 6h (8.5 prévue)
Dette de sommeil, fatigue
Baisse de la vigilance
Baisse de la performance

Somnifères inducteurs du sommeil 75% Zolpidem (Stilnox) / Synchronisation avant le vol

Effets psychologiques du vol spatial

« Toutes les conditions nécessaires pour effectuer un meurtre sont réalisées dans l'espace »

Valeri Rioumine Cosmonaute 1980
1979 : 175 jours Saliout 6
1980 : 184 jours Saliout 6



Cette affirmation est-elle toujours d'actualité ?

Effets psychologiques du vol spatial
Facteurs de souffrance morale

Hygiène : imparfaite, fastidieuse

Promiscuité, bruit

Isolement éloignement

Nourriture moins variée
moins attrayante

Contraintes sportives

Modifications
physiques

Perturbations du sommeil

Effets psychologiques du vol spatial

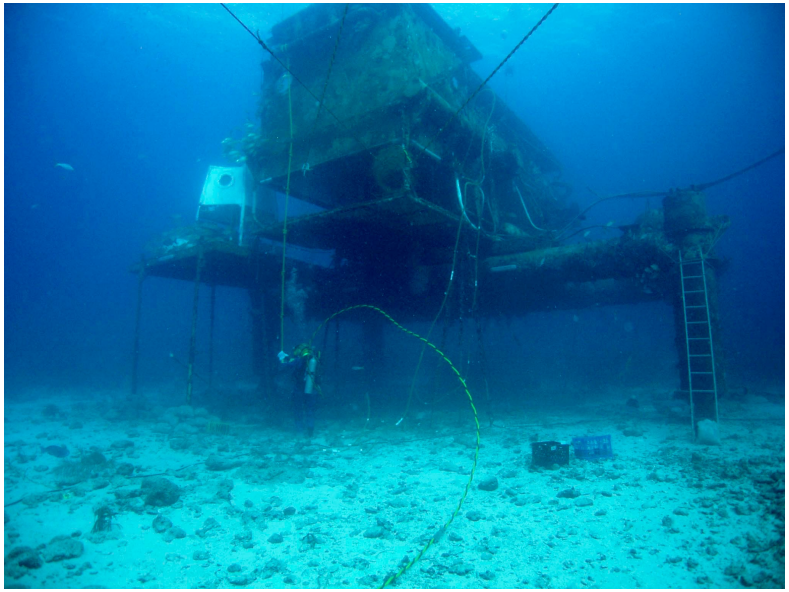
Prévention

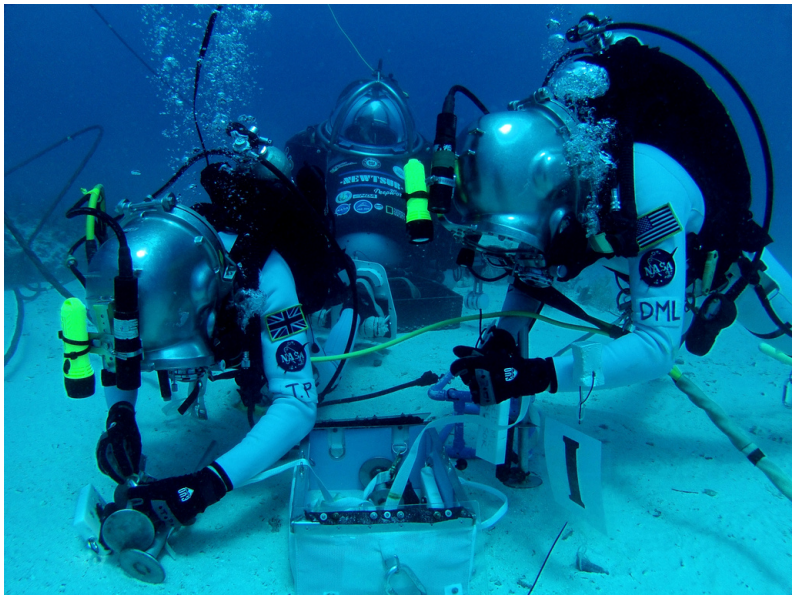
ENTRAINEMENT

vie commune de l'équipage

formation à la psychologie individuelle et de groupe

jeux de rôle / simulations/ survie en milieu hostile





Neemo

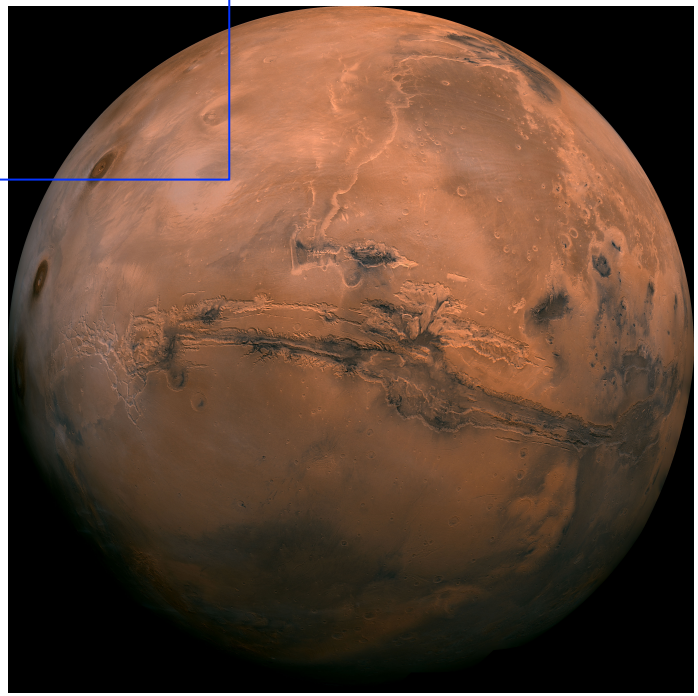
CAVES

Effets psychologiques du vol spatial
Prévention

EN VOL

loisirs (sport, musique, multimédia, internet, réseaux sociaux, conférences, apprentissages divers)
charge de travail adaptée
communication avec la famille
psychologues / tests psychologiques de détection des troubles / Médecin de vol
évènements festifs
stratégies de cohésion

Conclusion
Préserver la santé des astronautes reste un challenge pour l'exploration humaine de l'espace



A l'arrivée sur Mars :

Faiblesse musculaire, fragilité osseuse, hypotension, troubles de l'équilibre….

Comment rester en bonne santé et opérationnel ?

Retour sur Terre après 6 mois

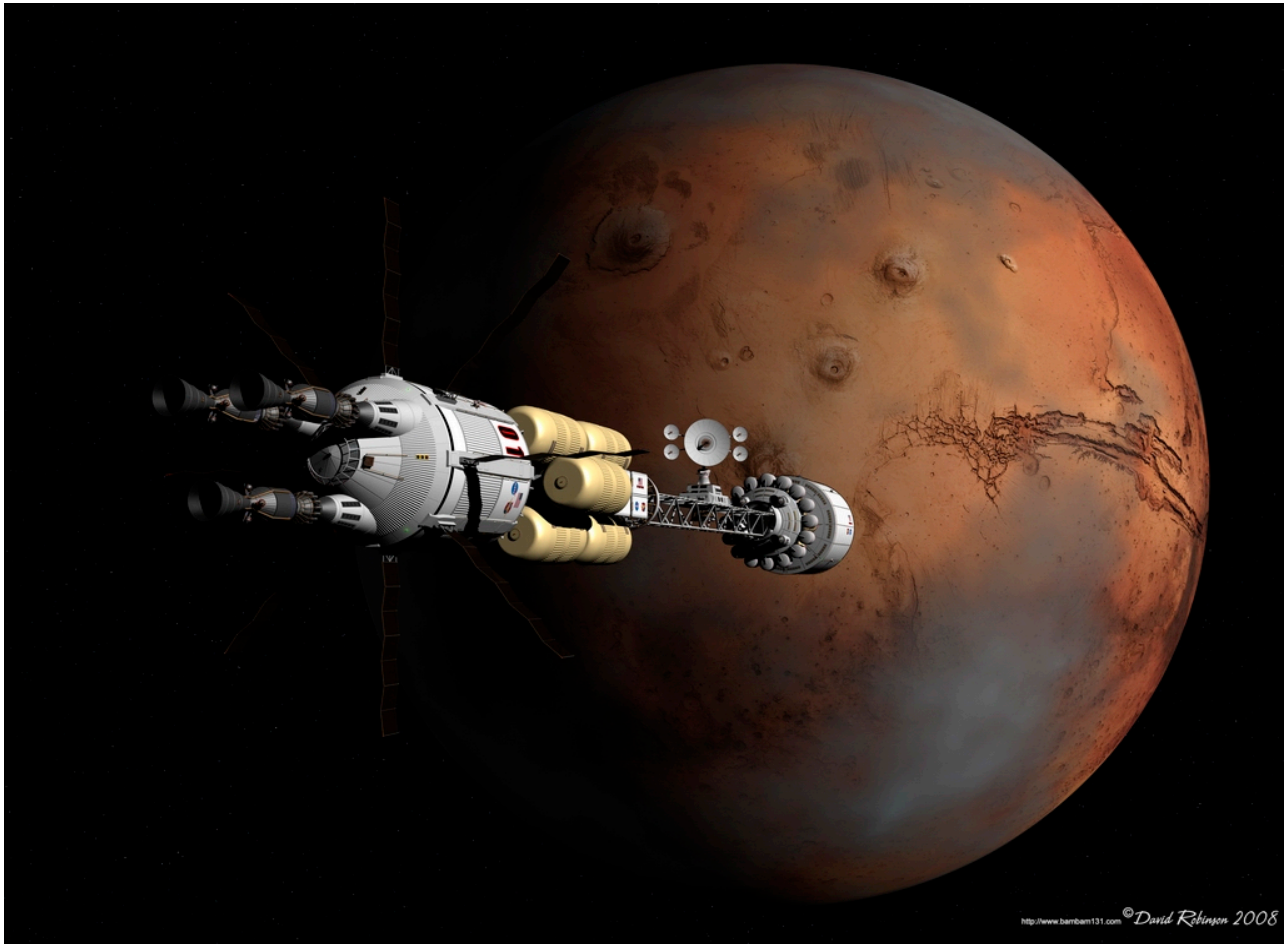
=

Arrivée sur Mars après 6 mois

Améliorer les contre-mesures traditionnelles suffira t-il ?

« Les contremesures effectuées en gravité 0 ne seront probablement pas pas suffisantes pour maintenir l'équipage en bonne santé et opérationnel. »

Human exploration of mars Design reference architecture 5.0 July 2009 Nasa



Contremesures multiples ou unique ?

Les troubles sont multifactoriels….

Ex : troubles de la marche à l'arrivée sur Mars
ORL
Musculaire
Cardiaque…

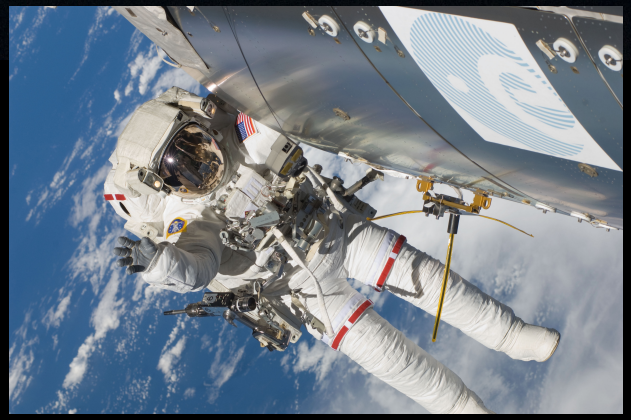
La gravité artificielle : une contre mesure globale agissant sur tous les systèmes ?

La gravité artificielle : de nombreuses questions à résoudre

Quel niveau de centrifugation ? Pour quelle durée ?

Quel minimum de g requis pour maintenir les fonctions des différents systèmes ?

En combien de séances? Intérêt de stimulations répétées ?

Quelle association avec les autres contre-mesures ?
Quelle utilisation en fonction des phases du vol ?

Merci de votre attention