

La physique de l'Invisible

Chapitre 5 Pesanteur – Apesanteur - Magnétisme

Sommaire

- La Pesanteur et la Vie p1
- L'apesanteur p2
 - Effets de l'apesanteur sur les rats, poules, amphibiens...p4
 - Effets de l'apesanteur sur l'Être Humain p6
 - L'être humain, le coït en apesanteur.
 - Effets de l'apesanteur sur les végétaux et leur reproduction p12
 - Le clinostat
- La magnétosphère p17
 - Effets sur les êtres humains p21
 - Effets sur les plantes p22
- Conclusions p23

La Pesanteur et la Vie

Introduction

Le champ de pesanteur (ou plus couramment pesanteur) est un champ attractif invisible auquel sont soumis tous les corps matériels au voisinage de la Terre : on observe ainsi qu'en un lieu donné tous les corps libres tombent en direction du sol suivant la même direction, appelée verticale. À la surface de la Terre, nous l'avons vu dans le chapitre précédent, le champ de pesanteur vaut approximativement $9,81 \text{ m/s}^2$. La force à laquelle est soumise un corps en raison de la pesanteur est appelée poids de ce corps et est directement reliée à la pesanteur par sa masse.

Un objet de masse m dans un lieu où l'accélération de la pesanteur vaut g , apparaît soumis à une force verticale, appelée poids de l'objet : $P = mg$.

En 1903, on a défini le kilogramme-force comme unité de mesure force. C'était le poids d'une masse de 1 kilogramme en un lieu où l'accélération de la gravité valait $g = 9,80665 \text{ m s}^{-2}$, l'accélération de la gravité standard.

La première description quantitative de la pesanteur a été donnée par la loi universelle de la gravitation de Newton.

La théorie de la relativité générale d'Einstein décrit comment l'espace-temps se courbe à cause de la présence d'une densité de masse. Cette théorie contient la même constante universelle de gravitation G que la théorie de Newton et est en accord avec elle tant que la pesanteur reste faible. La théorie de Newton est suffisante pour prévoir le mouvement des satellites artificiels, mais la théorie d'Einstein est indispensable pour assurer la synchronisation des horloges des satellites GPS.

L'âge de la Terre est, selon les connaissances actuelles, de 4,54 milliards d'années ($4,54 \times 10^9 \text{ ans} \pm 1 \%$). Cette datation repose sur des preuves scientifiques provenant de la datation radiométrique des météorites et se trouve cohérente avec l'âge des échantillons des plus anciennes roches lunaires et terrestres connues. Cet "âge" correspond au début de l'accrétion ¹ de la Terre.

Paradoxalement, la Vie (Biogenèse) a pris naissance

- dans un milieu physique très hostile : chaleur des volcans, décharges électriques des orages qui pilonnaient la Terre, radiations cosmiques létales (rayons cosmiques, X, UV durs, γ ...) et
- dans des champs physiques invisibles produits par la Terre : vibratoires (voir chroniques précédentes), magnétiques, gravitationnels...

À ce jour, comme semblent l'indiquer des restes fossilisés retrouvés dans les roches sédimentaires, les plus anciennes traces de vie sur Terre remonteraient à 3,8 milliards d'années. Elle était alors exclusivement aquatique et le restera pendant près de 3,4 milliards d'années !

Les algues (d'abord monocellulaires, puis pluricellulaires) sont apparues en milieu aquatique il y a au moins 1,2 milliard d'années. La symbiose entre des bactéries photosynthétiques (cyanobactéries) et des eucaryotes (biflagellés)

¹ Constitution et accroissement d'un corps, d'une structure ou d'un objet, par apport et/ou agglomération de matière, généralement en surface ou en périphérie de celui-ci.

semble être à l'origine des algues vertes, apparues pendant l'Ordovicien ² il y a près de 500 millions d'années, et produisant de la chlorophylle a et b. C'est à l'Ordovicien supérieur que les végétaux partent à la conquête des terres, donnant naissance aux premières plantes terrestres. Celles-ci ont commencé à se diversifier à la fin du Silurien, il y a environ 420 millions d'années, et les résultats de cette diversification sont visibles en détail dans des fossiles du début du Dévonien connu sous le nom de flore de Rhynie.

Il est établi que les fossiles les plus vieux, les **stromatolithes**, proviennent de cyanobactéries vivant il y a plus de 3.4 milliards d'années sur tous les continents, qui précipitaient le bicarbonate en carbonate de calcium. Les cyanobactéries actuellement sont un indice d'activité photosynthétique et donc de puits de carbone et de production significative d'oxygène à un moment très ancien de l'histoire de l'atmosphère primitive.



Stromatolithes

Paradoxalement, l'oxygène très toxique pour les premiers êtres vivants qui vivaient dans des conditions anoxiques, fut dès lors utilisé par une nouvelle forme de vie qui occupa jusqu'à nos jours progressivement toutes les niches écologiques !

À cette époque, la Lune était plus proche de la Terre (333 150 kilomètres au lieu de 384 400 kilomètres actuellement) et sa rotation était plus rapide qu'aujourd'hui (les journées ne duraient que 18 heures).

² L'Ordovicien (485–444 Ma) est une période géologique caractérisée par la concomitance d'une glaciation majeure et de l'une des 5 plus grandes extinctions de masse de l'histoire de la Terre.

L'apesanteur

Avec la conquête spatiale, l'homme se place dans des conditions totalement différentes de celles que la vie a connues tout au long de son évolution durant 3 milliards huit cent millions d'années !

Cette nouvelle conquête implique donc d'affronter des conditions physicochimiques totalement différentes comme l'absence d'oxygène, d'eau, l'impact des rayonnements cosmiques létaux, le vide, l'apesanteur...qui auront une influence d'autant plus néfaste que ses voyages dureront plus longtemps.

L'être humain sera-t-il capable de se reproduire dans cet environnement et comment réagiront les végétaux cultivés dans l'espace qu'il devra cultiver pour se nourrir ?

À ce jour, rien ne permet de penser que les différentes courtes expéditions dans l'espace lui permettront d'envisager sereinement la conquête d'autres « Terres » dans notre galaxie !!!

Premier problème vaincre : l'apesanteur.

L'apesanteur ou impesanteur ³ est l'état d'un système dans lequel aucune accélération, causée par la gravitation ou toute autre force, ne peut être mesurée par un observateur dans le système en question. Cela inclut les situations de chute libre, mais aussi les situations où le système est suffisamment éloigné de toute source de gravité pour que celle-ci puisse être négligée. Cette situation se traduit donc par une absence de poids (mais la masse reste inchangée).

Effets de l'apesanteur sur les rats, poules, amphibiens...

Les Russes semblent avoir effectué les premières expériences de reproduction dans l'espace, et ce depuis 1979. Ainsi, 5 rats femelles et 2 mâles sont restés 19 jours en orbite, sans engendrer de naissances après leur retour sur Terre. Mais il n'est pas certain qu'ils aient copulé.

Le sperme de douze souris a séjourné 288 jours dans l'ISS à moins 95 degrés Celsius entre août 2013 et mai 2014. Le professeur Wakayama a également stocké dans son laboratoire du sperme provenant des mêmes souris et à la même température de congélation durant ces neuf mois. Quand les échantillons

³ Le terme « microgravité » est également mal utilisé pour désigner l'état d'apesanteur, en particulier par beaucoup de professionnels. On ne doit parler de microgravité que très loin de la Terre et tout autre astre générant un champ gravitationnel, ou bien aux points de Lagrange où les champs gravitationnels « s'annulent », entre Terre et Lune par exemple.

de sperme ont été ramenés de l'ISS, lui et son équipe les ont examinés pour déterminer s'il y avait des signes d'altération de l'ADN résultant des radiations dans l'espace.

Comme attendu, le sperme exposé aux radiations cosmiques à l'ISS avait davantage d'ADN fragmenté que celui resté sur la Terre. Les cellules congelées ne pouvaient pas réparer ces dommages génétiques qui sont liés à des plus bas niveaux de fertilité. Mais ce sperme a fertilisé des ovules in vitro implantés ensuite dans des souris femelles, qui trois semaines plus tard ont donné naissance au total à 73 souriceaux en bonne santé.

Le professeur Teruhiko Wakayama et ses équipes estiment qu'il faudrait effectuer la même expérience avec du sperme d'autres espèces de mammifères, stocké pendant de plus longues périodes dans l'espace. Selon eux, il faudra également faire ces études dans l'espace plus lointain, bien au-delà de l'orbite terrestre, où les radiations sont beaucoup plus intenses.

Diverses expériences menées sur des œufs de grenouille montrent des anomalies de développement et semblent indiquer qu'une période de trois heures après la fécondation requiert l'intervention de la pesanteur pour déplacer certains éléments à l'intérieur de l'œuf et amorcer la symétrie bilatérale.

En 1989, un essai de fécondation d'œufs de poule en apesanteur s'était conclu par la mort toujours inexplicée de la totalité des embryons après leur retour sur Terre. Autrement dit, les scientifiques, dans ce domaine, marchent toujours sur des œufs...

Citons aussi l'expérience **Fertile (Fécondation et Embryogenèse Réalisées chez le Triton In vivo dans L'Espace)**, réalisée en août 1996 par Claudie André-Deshays (Haigneré aujourd'hui), puis en février 1998 par Léopold Eyaerts à bord de la Station orbitale Mir, au cours de deux missions spatiales franco-russes, les missions Cassiopée et Pégase.

Le but de l'expérience était de savoir si la fécondation naturelle et le développement embryonnaire normal d'un Vertébré, ici un Amphibien Pleurodèle, pouvaient se réaliser en micropesanteur.

Ces expériences ont permis de révéler certaines anomalies à certains stades du développement embryonnaire, mais aussi au niveau de la fécondation elle-

même, de la segmentation des cellules et de la fermeture du tube nerveux, qui se produit avec retard.

Le rôle de l'absence de pesanteur est donc loin d'être négligeable sur la reproduction.

Effets de l'apesanteur sur l'Être Humain

Un séjour en apesanteur fait grandir : tandis que, sur Terre, nos muscles luttent contre la gravité, un séjour en apesanteur conduit le corps à ne plus être soumis à son propre poids, et la colonne vertébrale à gagner en expansion : des astronautes peuvent ainsi gagner plusieurs centimètres. De même, les muscles étant moins ou différemment sollicités, et n'ayant plus à « tenir » le squelette, leur structure change, et ils subissent un vieillissement accéléré. C'est également le cas des os ; cependant, un astronaute récupère généralement ces pertes osseuses une fois revenu sur Terre.

Dans le cas où la reproduction relevait du domaine du possible, on peut se demander quel serait l'aspect, la physiologie et la psychologie des astronautes issus de plusieurs générations nées en apesanteur ?

L'être humain, le coût en apesanteur.

En 1982, les responsables de l'agence spatiale d'URSS ont reconnu qu'une tentative d'accouplement humain avait eu lieu à bord de Saliout 7, entre la cosmonaute Svetlana Yevgenyevna Savitskaya et un des deux autres occupants de la station, Leonid Popov ou Alexander Serebrov.

Laconiques, leurs patrons se sont contentés de déclarer que l'« expérience » n'avait eu lieu que dans la perspective de concevoir le premier enfant de l'espace...

Svetlana Savitskaya, qui se met de fort mauvaise humeur lorsqu'on évoque le sujet comme si cet acte lui avait été imposé (elle était déjà mariée à l'époque avec un pilote d'essai non astronaute), est aujourd'hui mère de deux filles, nées bien après son vol.

Côté NASA, on pourrait également citer l'exemple de Mark Lee et Jan Davis, un couple d'astronautes passagers de la mission STS-47 en septembre 1992, mariés seulement depuis un an et demi. Est-il raisonnable de penser qu'ils n'aient pas été tentés par l'expérience dans des circonstances aussi exceptionnelles ? Là aussi, la Nasa fait la sourde oreille. Quant aux intéressés, ils affirment que leurs

horaires de travail ne leur permettaient pas de se rencontrer, l'un travaillant tandis que l'autre dormait.

Les agences spatiales, principalement la NASA, font tout pour qu'aucune information sur ce sujet ne soit rendue publique, pensant que les médias s'empareraient immédiatement du sujet.

Certains facteurs feraient penser que des actes ont déjà eu lieu.

Peut-on réellement avoir une relation sexuelle dans l'espace sachant que le but est de le coloniser ?

Si oui, quels sont les risques à prendre en considération ? Voici des faits scientifiques qu'il faut prendre en considération :

- L'absence de gravité pour un homme l'empêche d'avoir une érection dans l'espace, car elle gêne l'afflux sanguin dans le pénis (ainsi que dans les extrémités de façon générale), et ce dernier aura donc bien du mal à se mettre en érection, et à tenir cet état dans la durée. Il n'y a pas d'érection possible puisque les corps caverneux de la verge ne sont plus irrigués !

- Des chercheurs italiens ont trouvé que les niveaux de la testostérone, sont temporairement diminués chez les astronautes masculins par l'exposition à l'espace, avec une diminution concomitante de la pulsion sexuelle ou libido.

- Les femmes auront du mal à produire une lubrification vaginale suffisante pour permettre un rapport. La faute encore une fois à la microgravité. Il vous faudra donc vous accrocher fermement à votre envie ne serait-ce que pour entamer une relation sexuelle.

Le personnel médical de la NASA n'est pas sûr de savoir comment la microgravité a une incidence sur les règles. En attendant des réponses claires, les astronautes féminines prennent des pilules pour éviter d'avoir leurs règles pendant les missions.

La recommandation est que les femmes doivent être particulièrement habiles à gérer les différentes attentions sexuelles masculines qui surviendront inévitablement

- Toutefois, le syndrome de « mal de l'espace » serait éprouvé par près de la moitié des astronautes durant leurs premiers jours de séjour dans l'espace, et provoque des symptômes comme des nausées, des vomissements, ou encore

une somnolence. Un état qui n'est pas vraiment idéal pour entamer un quelconque rapport intime avec quelqu'un.

- Tout comme l'érection, l'éjaculation masculine peut avoir du mal à venir. Cela est aussi dû à la microgravité, qui pourrait hypothétiquement gêner l'homme lors d'une relation sexuelle. Bien entendu, tout cela reste hypothétique, puisque la NASA n'a jamais fait mention d'une relation sexuelle s'étant déjà produite dans l'espace. De ce fait, aucune étude documentée sur l'éjaculation n'a pu être rendue publique.
- Le fait que le vaisseau spatial soit un endroit exigu peut avoir un impact sérieux non seulement sur votre envie, la "Lowbido", mais aussi sur votre moral, et sur vos performances respectives, et ce, même si vous parveniez à faire abstraction des précédents éléments cités.
- le terme utilisé est la "Lowbido", et ce, pour une très bonne raison : vous serez rarement excités au cours d'un voyage spatial, selon toute vraisemblance. Une étude précédemment menée a montré, en effet, que le taux de testostérone chute au cours d'un voyage spatial. Si plusieurs hypothèses sont pour le moment envisagées pour expliquer ce phénomène, aucune d'elle ne fait consensus. Aucune crainte à avoir pour nos astronautes cependant : leur niveau de testostérone revient à la normale quelques temps après avoir regagné la Terre ferme...dans le cas où il est programmé qu'ils la regagnent !
- Sachez qu'en plus de tout le reste, cela vous demandera un effort considérable. Votre fréquence cardiaque augmenterait rapidement, et vous vous épuiseriez en un rien de temps. Rappelez-vous : votre corps commencera à se débarrasser de toute la masse musculaire inutile que vous pourriez avoir durant votre séjour en apesanteur, et c'est afin de lutter contre ce phénomène que les astronautes font quotidiennement des activités physiques. Imaginez l'état dans lequel vous êtes sur Terre, puis transposez-le dans l'espace (vous seriez sans doute deux ou trois fois plus épuisé que sur Terre, au bas mot).
- Pour éviter qu'une simple caresse ne projette votre partenaire à l'autre bout du vaisseau, il faudra que vous soyez maintenus ensemble par des harnais, ou de sangles, selon vos préférences, et ce, même si ce n'est pas vraiment ce que vous auriez choisi de prime abord. Un système qui, en plus du reste, pourrait achever de décourager ceux qui souhaitaient encore tenter le coup.

Selon Lyubov Serova, un spécialiste de l'Institut russe pour les problèmes biomédicaux, dans le domaine de la procréation en conditions de vol spatial : « Après une période d'adaptation à l'apesanteur, les équipages vont avoir besoin de dispositifs spéciaux, comme les ceintures élastiques ou des tubes gonflables pour avoir des relations sexuelles dans l'espace. (...) Nous étudions l'impact de l'impesanteur sur la fonction de reproduction des organes mâles et femelles en utilisant des mammifères, en particulier les rats. »....

- Étant donné que les missions spatiales à destination de Mars sont désormais envisagées, la question des relations sexuelles dans l'espace commence à attirer de nombreux spécialistes. Il est possible que, malgré tous les aspects négatifs que nous avons déjà cités, une relation sexuelle complète puisse être envisagée (et se soit déjà déroulée d'ailleurs, même si la NASA ne l'a pas dévoilée).
- Des règles ont été définies en cas de grossesse découverte lors d'un vol spatial long en analogie avec celles des stations polaires australo-américaines. Dès l'annonce de la grossesse, une procédure de retour d'urgence vers la Terre sera organisée. Le père reste dans la station. Un incubateur est prévu si le retour sur Terre est impossible. L'avortement est interdit car il poserait des problèmes juridiques pour les Américains.
- Chose curieuse, il semble que les enfants d'astronautes soient plus souvent des filles. Une situation similaire semble exister chez les pilotes de chasse, sans que l'effet ait été clairement établi, et encore moins expliqué.
- Si aucun problème sérieux n'a été détecté jusqu'à présent sur les enfants d'astronautes, il reste néanmoins intéressant de suivre les effets des rayonnements cosmiques sur le long terme.
En attendant, la contraception est obligatoire pour les femmes avant et pendant les vols...
- Les équipes isolées sur le continent Antarctique, confinées au sein d'un milieu hostile, établissent à l'évidence des relations charnelles. En témoignent par exemple les sept grossesses qui ont suivi les missions dans la station australienne entre 1989 et 2006. La mixité peut avoir un effet positif sur le moral des troupes, mais peut aussi générer de graves conflits.

- Un chercheur californien, Joseph Rhawn, se penche sur les études portant sur les effets des menstruations mais aussi sur la gestation dans l'espace et l'éventualité d'une grossesse surprise au milieu d'une mission martienne.

En apesanteur et en absence de bouclier efficace contre les radiations, l'embryon humain, son cerveau, sa colonne vertébrale, ses gonades pourraient subir des mutations handicapantes, voire létales !

Conclusion : si la sexualité n'est pas prise en compte dans de futurs voyages au long cours, on peut prédire l'apparition de violences et de catastrophes. En revanche, la naissance du premier bébé né sur Mars, ferait d'Homo sapiens une espèce à deux planètes...

L'orbite où évolue l'ISS, à 400 kilomètres d'altitude, bénéficie en effet encore d'une étude qui suggère que les altérations subies par l'ADN du sperme dans l'espace ont été réparées après la fertilisation sans avoir d'effet néfaste sur les souriceaux. Ces résultats sont une bonne nouvelle pour tous les astronautes qui ont effectué de longs séjours dans l'avant-poste orbital et qui veulent devenir parents à leur retour !

Les chercheurs estiment ainsi qu'il faudrait effectuer la même expérience avec du sperme d'autres espèces de mammifères, stocké pendant de plus longues périodes dans l'espace. Il faudra également faire ces études dans l'espace plus lointain, bien au-delà de l'orbite terrestre, où les radiations sont beaucoup plus intenses. L'orbite où évolue l'ISS, à 400 kilomètres d'altitude, bénéficie en effet encore de la protection du bouclier géomagnétique terrestre.

Mais qu'en est-il de la fertilité des êtres humains en orbite car «des effets similaires sont susceptibles de se produire dans les cellules humaines», indiquent les chercheurs selon lesquels les fonctions reproductives masculines et le développement des embryons pourraient être très perturbés.

Déjà en février 2011, un rapport de la Nasa indiquait que les rayons cosmiques frappant les navettes spatiales réduiraient la concentration des spermatozoïdes chez l'homme et stériliseraient sans doute un œuf fécondé. Les seules expériences de reproduction dans l'espace ont porté sur de petits mammifères et le seul couple à être parti en mission en 1991 n'a jamais révélé si l'apesanteur les avait inspirés.

Le premier bébé de l'espace n'est donc pas encore au programme, mais les recherches des biologistes canadiens pourraient être utiles pour améliorer la

santé des astronautes. Ainsi, des «embouteillages» dans les échanges entre neurones pourraient être à l'origine de maladies comme Alzheimer, Parkinson ou de cancers. Anja Geitmann pense que la microgravité pourrait aussi expliquer des troubles cognitifs chez les astronautes de retour sur Terre.

Les chercheurs avaient marqué certaines structures internes des cellules à l'aide de marqueurs, afin d'étudier le mouvement des composants cellulaires et la réponse des mécanismes de transport cellulaire au changement de gravité. *"Nous avons constaté que les conditions d'hypergravité affaiblissent le flux de circulation intracellulaire et que la microgravité et l'hypergravité affectent toutes deux la fabrication de l'enveloppe cellulaire, processus qui nécessite une coordination précise durant la croissance de la cellule, souligne M. Chebli. Cela nous permet de comprendre non seulement les principes généraux de la reproduction chez les plantes, mais surtout la façon dont les processus de transport intracellulaire des cellules eucaryotes répondent aux changements gravitationnels. Nos découvertes sont pertinentes pour la santé humaine puisque des effets similaires pourraient se produire dans les cellules humaines telles que les neurones, pour lesquels le transport intracellulaire sur de longues distances est crucial. »*

Comment se comporte l'ADN ⁴ dans l'espace ?

La vie dans le vide de l'espace modifie l'ADN et bouleverse notre corps, mais à quel point?

Pour obtenir des réponses, la Nasa avait déjà lancé une opération en 2015, baptisée "Twin Study". L'agence américaine avait alors envoyé un frère jumeau en apesanteur pour tester les réactions de son corps. Ses télomères ⁵ s'étaient allongés... avant de raccourcir lors de son retour sur Terre.

Mais, il reste encore beaucoup à faire dans ce champ de recherche avant le départ des premiers explorateurs vers Mars, que la Nasa prévoit dans les années 2030 au plus tôt.

⁴ Bien que résistant, l'ADN, comme toute matière organique, n'est pas éternel et se dégrade. Les chercheurs estiment qu'un échantillon, conservé dans des conditions idéales à -5°C, serait totalement détruit au bout d'un maximum de 6,8 millions d'années et ne serait de toute façon plus lisible ou utilisable après 1,5 millions d'années. Il est donc impossible de ressusciter des dinosaures par clonage en utilisant leur ADN !

⁵ Hermann MULLER, prix Nobel, arriva à la conclusion qu'il devait exister, aux extrémités des chromosomes, une structure moléculaire inconnue qui les stabilise. Il décida de l'appeler « télomère », qui signifie en grec la partie qui se trouve au loin.

Enfin, en 2009, Elizabeth Blackburn, Carol Greider et Jack Szostak reçurent le prix Nobel 2009 de médecine et de physiologie pour récompenser leurs travaux sur le rôle des télomères et de la télomérase.

Chez les animaux, la taille des télomères est un indice de longévité, car globalement leur taille diminue au cours du vieillissement cellulaire.

Effets de l'Apesanteur sur les Végétaux

Le 16 janvier 2016, l'astronaute américain Scott Kelly postait la photo de fleurs de zinnia ayant éclos au sein de l'unité Veggie, installée dans la Station spatiale internationale (ISS).



Depuis soixante-dix ans, les scientifiques accumulent les expériences sur les cultures spatiales. Ces tests sont essentiels pour préparer de futurs voyages au long cours, durant lesquels il faudra nourrir les astronautes et renouveler leur atmosphère.

Dès juillet 1946, les Américains envoyaient des graines dans l'espace, prouvant que des tissus vivants pouvaient y survivre.

En 1982 avait lieu la première floraison, à bord de la station soviétique Saliout-7.

Quinze ans plus tard, les Russes parvenaient à faire germer des plantes à bord de la station Mir !

Cependant, de nombreux problèmes sont à résoudre !

Premier problème : la quasi-absence de gravité.

Sur Terre, les végétaux doivent composer avec la pesanteur, les intempéries, le spectre lumineux (photosynthèse), le milieu tellurique... autant de facteurs qui, pendant des millions d'années, les ont aidés à devenir ce qu'ils sont !

Ils fabriquent racines, tiges et feuilles suivant un axe vertical.

Dans l'espace, ces organes se développent en tous sens... et ne remplissent plus leur rôle.

La solution consisterait dans un premier temps à contrôler scrupuleusement les facteurs essentiels à la croissance. Les racines, notamment, peuvent être guidées par une lumière artificielle.

De nombreuses expériences ont montré que la partie aérienne des plantes se développe de manière normale avec une ventilation adéquate. En revanche, les racines ne se développent pas de la même façon en apesanteur et en gravité terrestre. Sur Terre, les racines poussent en direction de la gravité (vers le bas), alors qu'en apesanteur, elles ne poussent pas en suivant une direction privilégiée, mais de manière aléatoire dans toutes les directions.

Toutefois, au centre spatial Kennedy, il a été constaté que la gravité n'est essentielle ni pour l'orientation des racines, ni pour l'influence de la croissance des racines.

De plus, des études scientifiques ont montré que les longueurs d'ondes les mieux absorbées par les plantes sont le rouge et le bleu – le bleu étant moins efficace que le rouge d'un point de vue photosynthétique mais très important pour la photomorphogenèse, c'est-à-dire l'élongation de la tige et l'expansion des feuilles, par exemple.

Se concentrer sur ces deux longueurs d'onde pourrait donc être une méthode pour réduire la demande énergétique de l'éclairage des plantes.

Sur des surfaces planétaires et lunaires, utiliser la lumière du Soleil (en complément ou en source principale d'éclairage), par exemple en utilisant des miroirs paraboliques qui concentrent les rayons lumineux et les transmettent aux plantes par fibre optique pourrait être envisagé, mais quid du déroulement des mécanismes photobiochimiques de la photosynthèse ?

Autre problème : dans l'espace, l'atmosphère ne subit aucun mouvement et l'oxygène, produit par la photosynthèse, reste confiné autour des feuilles, privant celles-ci d'un accès au gaz carbonique dont elles ont besoin pour fabriquer des sucres et se développer.

On a constaté que la vitesse de croissance des plantes serait trois fois plus rapide que sur Terre...

Autre problème, celui de la fécondation : il a été observé, dans des expériences réalisées sur Terre à l'aide de clinostats, que le tube pollinique d'un pollen, en germination sur un stigmate, est désorienté et ne trouve pas le chemin pour aller féconder l'ovule. De surcroît, il est nettement moins développé (voir ci-après) Qu'en est-il des spermatozoïdes humains qui doivent réaliser, en milieu visqueux l'équivalent du trajet Paris-Marseille ?

Un clinostat est un appareil de laboratoire qui utilise la rotation pour réduire les effets de la gravité sur la croissance de végétaux (étude du forçage du développement cellulaire (gravitropisme) ou embryonnaire (gravimorphisme) par la gravité.

Des clinostats ont aussi été utilisés pour annuler des stimuli autres que la gravité (par exemple l'incidence des rayons solaires). On a ainsi pu montrer que les plantes ne réagissent à la gravité que si la gravistimulation est maintenue durant plus qu'une certaine quantité critique de temps (qui varie selon l'espèce, les organes ou l'âge de la plante), et qui est dite « Temps Minimal de Présentation ». Pour de nombreux organes végétaux, le TMP se situe entre 10 et 200 secondes.

Si un clinostat est à plusieurs reprises arrêté à une position unique, même pendant un temps aussi bref que 0,5 s, ces arrêts peuvent entraîner une réponse gravitropique.

Les animaux sont bien moins sensibles, leur « temps de présentation » est d'un ou de deux ordres de grandeur plus rapide, ce qui impose l'utilisation de clinostats en rotation rapide, par exemple pour étudier des cultures de cellules animales et le développement d'embryons.

Les clinostats tournent généralement à faible vitesse (clinostat à « rotation lente »), pour limiter les effets centrifuges. Il y a eu débat quant à la vitesse de rotation la plus appropriée, car si elle est trop lente, la plante ou l'animal a le temps d'élaborer des réponses physiologiques à la gravité, et si elle est trop rapide, la force centrifuge et les tensions mécaniques seront responsables d'artefacts.

Pour la simulation de culture de végétaux à faible pesanteur, la vitesse de rotation optimale a, dès la fin des années 1960, été calée sur de « vraies » réponses à la microgravité comme on les voit dans l'espace. Elle est programmée entre 0,3 et 3 tr/min pour la plupart des systèmes fabriqués en usine.



Grain de pollen et son tube pollinique en train de germer

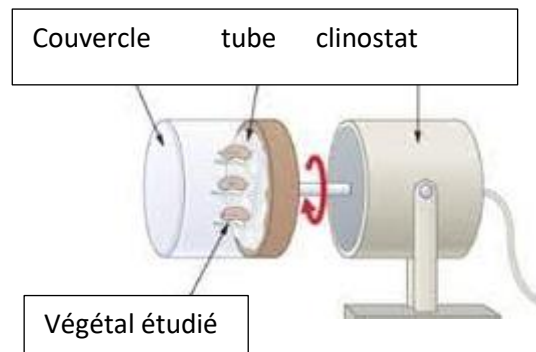
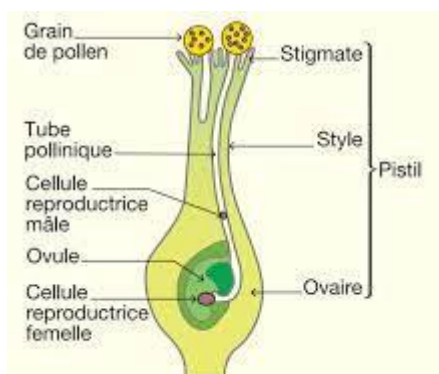


Schéma d'un clinostat

Il existe donc des clinostats lents (rotations : 0 à 5 tr/min) ou rapides (20 à 200 tr/min) permettant de travailler avec plusieurs dizaines d'échantillons de culture à la fois.

Dans tous les cas, sont à envisager des artefacts induits par les vibrations du moteur ou des articulations, et d'autres effets du système.



Pollinisation chez les angiospermes

Problème du vieillissement accéléré.

En apesanteur on a constaté :

- un vieillissement accéléré des plantes et des astronautes. « *Il est dû au stress causé par ce milieu hostile, analyse Eugénie Carnero-Diaz, chercheuse au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. Nous avons réalisé en apesanteur un cycle de germination, croissance, production de fruits et récolte de graines, les plantes souffrent : les graines récoltées sont moins dosées en amidon. Nous n'avons donc aucune idée de la stabilité des cycles sur plusieurs générations.* »

D'autant qu'une grande partie du stress serait dû aux radiations spatiales. Un problème encore irrésolu, qui pourrait être à l'origine de déséquilibres de la physiologie végétale et de cancers chez les humains.

- Des tubes polliniques moins développés.

«Comme lors de la reproduction humaine, le "sperme" des plantes est amené jusqu'à l'œuf par un organe cylindrique, explique Anja Geitmann, biologiste, les transports intracellulaires sont très sensibles à toute perturbation, avec des conséquences majeures sur le fonctionnement des cellules.»

«Nous avons découvert que le trafic intercellulaire était compromis dans des conditions d'hypergravité, et qu'aussi bien la microgravité que l'hypergravité affectaient la construction des cellules naissantes», commente Youssef Chebli, co-auteur de l'étude.

Ainsi, les tubes polliniques qui avaient été soumis à la microgravité, donc une situation de quasi-apesanteur, étaient beaucoup plus petits et grandissaient beaucoup moins vite que ceux qui étaient placés dans une situation de gravité normale ou accentuée.

De surcroît, le développement de l'embryon est perturbé.

Ces altérations de la reproduction de plantes limiteront la capacité des astronautes à obtenir des fruits dans les capsules spatiales.

Conquête spatiale et maladies

Les astronautes qui partiront en mission pourraient bien loin des hôpitaux faire face à de nouveaux dangers : les maladies !

C'est l'herpès qui, en premier, s'est retrouvé sur le banc des accusés. Cette maladie infectieuse et contagieuse se transmet à travers des lésions sur la peau ou les muqueuses. On distingue : le HSV1, qui correspond à l'herpès labial, et le HSV2, qui correspond à l'herpès génital. Quand une personne est touchée, le virus reste dans ses ganglions et peut donc « se réveiller ». Or, ce taux d'activation spontanée serait beaucoup plus important dans l'espace. Sur 89 personnes ayant effectué un vol spatial, 53 % ont été concernées. Pour les 23 astronautes qui ont séjourné dans la Station spatiale internationale, ce chiffre grimpe à 61 %.

L'étude de la Nasa a identifié plusieurs causes permettant de comprendre cette résurgence marquée du virus de l'herpès dans l'espace. Certaines sont inhérentes à l'espace, comme la microgravité ou les rayons cosmiques. D'autres

sont liées aux conditions de vie, comme le confinement, la perturbation des cycles de sommeil ou encore l'isolement social. Plus largement, la Nasa n'hésite pas à parler de « dysrégulation du système immunitaire ».

Ces « virus latents » pourraient tout simplement mettre en danger la vie des astronautes.

Microbes, stress, microgravité, cycles de sommeil perturbés pourraient tous être responsables du dérèglement du système immunitaire. Si cette situation perdurait lors de voyages plus longs, cela pourrait accroître les risques d'infection, d'hypersensibilité, ou de maladies auto-immunes.

Une étude financée par la NASA et réalisée par IRM sur 34 astronautes ayant effectué de longs séjours dans l'espace vient de paraître. Les images montrent que le cerveau des héros du cosmos se déplace vers le haut de la boîte crânienne avec un rétrécissement du sillon central.

C'est l'augmentation de la pression dans la boîte crânienne qui pose problème. Cette pression en augmentant peut être en effet un facteur de lésions !

Troubles graves de la vision et le vieillissement accéléré des artères. En 6 mois, celles d'un astronaute vieillissent de 20 à 30 ans !

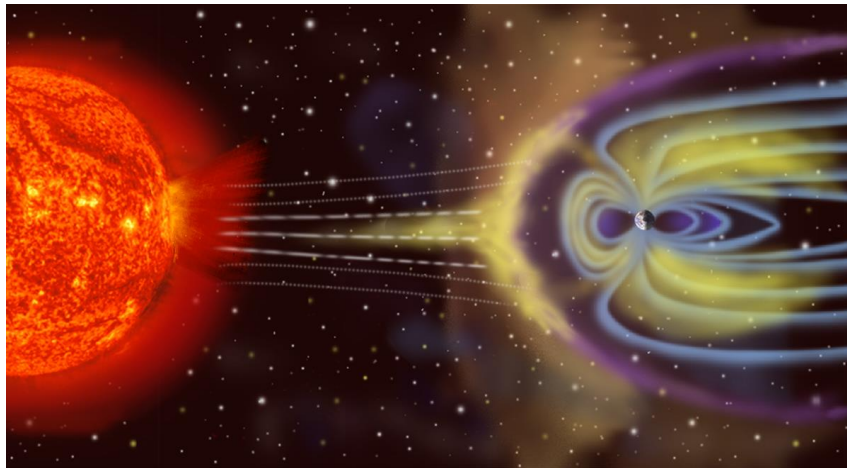
Les maladies cardio-vasculaires sont aussi 4 à 5 fois plus élevées chez les astronautes ayant passé plusieurs mois dans l'espace. Sans compter la fonte musculaire, la perte osseuse, la chute des globules rouges et les hernies discales dues à l'allongement de la colonne vertébrale.

Et alors que le voyage vers Mars et l'idée d'un village lunaire excitent les agences spatiales ; rien ne pourra se faire sans des garanties sérieuses pour la santé des équipages. Ce qui est loin d'être le cas pour le moment.

Il serait donc plus sage que la découverte de l'espace, pour préserver les vies humaines, se fasse à l'aide de robots : mais l'homme est-il sage ?

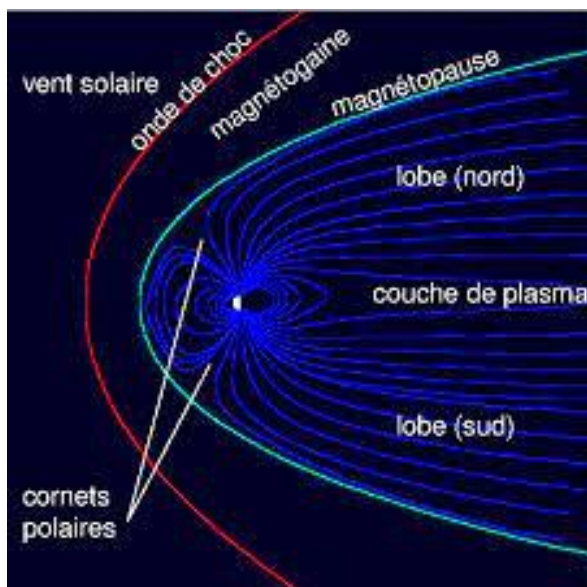
La Magnétosphère

Invisible, la magnétosphère est une vaste région évoluant sous le contrôle du champ magnétique terrestre. La magnétosphère est constituée d'un plasma sans collision, continuellement hors équilibre thermodynamique, turbulent, instable et qui subit des reconfigurations globales quasi-quotidiennes. Elle a une seule manifestation visuelle, mais de grande qualité esthétique : les aurores polaires.



Interaction vents solaires-Magnétosphère

La magnétosphère a une forme très allongée. Elle s'étend à 60 000 kilomètres de la Terre du côté du soleil (le côté jour), mais à des centaines de milliers de kilomètres du côté opposé (le côté nuit). Ensuite, on distingue avec la topographie des lignes de champ plusieurs régions, dont les sondes spatiales ont révélé des propriétés distinctes (figure ci-dessous).



Les différentes zones de la magnétosphère

La limite interne de la magnétosphère, au plus près de la Terre, est constituée de l'ionosphère, qui est la couche atmosphérique de haute altitude (à partir de 60 km) dans laquelle, mêlés au gaz neutre, apparaissent des atomes ionisés, c'est à dire un plasma. Contrairement aux atomes d'une atmosphère neutre, ces

atomes chargés électriquement font de l'ionosphère un bon conducteur électrique.

Dans la partie basse de l'ionosphère, aux altitudes inférieures à 400 km, les gaz neutres et le plasma sont encore relativement denses, en ce sens que les collisions entre les particules qui la constituent (atomes, molécules, ions et électrons) sont fréquentes. Ces collisions engendrent des échanges d'impulsion et d'énergie entre particules, et cela favorise l'établissement rapide d'un équilibre thermodynamique local, partout dans l'ionosphère.

Comme tout plasma, le plasma de la magnétosphère étant formé de particules électriques, son mouvement est contrôlé par le champ électromagnétique, notamment par le champ magnétique d'origine terrestre. Réciproquement, comme ses particules chargées sont en mouvement, elles sont aussi des sources de champ électromagnétique ; ce plasma modifie donc l'environnement électrique et magnétique de la Terre et influe sur le développement et l'évolution des êtres vivants.

Entre les deux lobes, la région nommée couche de courant se caractérise par un champ magnétique plus faible, qui change de sens. C'est là que s'accumule la majeure partie du plasma de la magnétosphère. Au fur et à mesure que du plasma du vent solaire parvient dans la magnétosphère, la couche de courant se remplit. Cette région est parcourue en permanence par un courant électrique qui va d'est en ouest. C'est aussi la région la plus instable : lorsque le plasma s'accumule un peu trop, la couche de courant s'affine (paradoxalement), et le courant s'intensifie. Puis, l'ensemble finit par craquer.

Que se passe-t-il ? La couche de courant se vide en quelques dizaines de minutes. Une partie du plasma part vers l'espace, une autre vers la Terre. Ces épisodes de reconfiguration de la couche de courant où elle se vide subitement sont appelés des sous-orages magnétosphériques. Il se produit typiquement un ou plusieurs sous-orages chaque jour, avec des intensités variées, en libérant plus ou moins de plasma avec plus ou moins d'énergie. Les manifestations visibles et spectaculaires de ces sous-orages sont les **aurora polaires**.

Les particules du vent solaire entrent dans la magnétosphère avec une énergie de 100 eV. Les particules de l'ionosphère ont une énergie de 0,1 eV, mais celles qui s'échappent dans la magnétosphère gagnent souvent une énergie de quelques eV. Dans la queue de la magnétosphère, on rencontre des particules

d'énergies variées, de 10 eV à 50 keV (kilo-eV). Couramment, leur énergie est de l'ordre de 100 eV. Lors des sous-orages, elles gagnent quelques centaines d'eV.



Aurore polaire

Le plasma qui se dirige vers la Terre suite à une telle reconfiguration subit une nouvelle accélération à quelques milliers de kilomètres d'altitude. Elle est causée par des ondes électromagnétiques et par des structures électriques engendrées lors de la reconfiguration de la queue magnétosphérique. Les particules les mieux accélérées sont des électrons en provenance de la couche de plasma, leur énergie atteint quelques keV. En arrivant sur l'ionosphère (un milieu plus dense que la magnétosphère, avec des collisions), elles bousculent quelques dizaines d'atomes et molécules avant de perdre leur énergie cinétique et leur vitesse. Ces atomes sont « excités » par la collision, et se « désexcitent » en émettant un photon. Ces photons ont des énergies correspondant à la nature des atomes rencontrés. Par exemple, la couleur verte typique des aurores (photo ci-dessus) est due à des collisions avec des atomes d'oxygène. D'autres couleurs sont également produites : rouge, violet, bleu. La lumière ainsi produite est la seule manifestation visible de la magnétosphère.

Effets sur les êtres vivants

Le corps humain est doté de cinq sens : la vue, l'audition, le toucher, le goût et l'odorat. Depuis fort longtemps, la question de l'existence d'un sixième sens humain, permettant de percevoir le champ magnétique, fait débat.

Le champ magnétique terrestre, dont l'intensité et la direction varient à la surface du globe, est lié aux mouvements des fluides du noyau terrestre. Ce

champ magnétique est assez faible à la surface de la Terre : son intensité est 100 fois plus faible que celle d'un aimant collé sur la porte du réfrigérateur !

Bien que de faible intensité, ce champ magnétique est perçu par différents animaux qui s'en servent pour se repérer. De nombreux vertébrés répondent à des stimuli magnétiques : poissons, amphibiens, reptiles, oiseaux et, chez les mammifères, baleines, rongeurs, chauves-souris, vaches, chiens... Dans le monde microbien aussi, des bactéries possèdent des **cristaux de magnétite** qui sont des sortes de boussoles permettant d'orienter la nage de la cellule en fonction des lignes du champ magnétique.

La magnétite est présente chez de nombreux animaux, y compris dans le cerveau humain. D'où la question que tout le monde se pose : l'Homme a-t-il un sens magnétique ?

Effets de la magnétosphère sur l'être humain.

Pour répondre à cette interrogation fondamentale, les chercheurs ont créé une cage de Faraday dans laquelle ils pouvaient appliquer un champ magnétique grâce à de grandes bobines. Le champ magnétique créé, d'une intensité de 35 μT (microTesla) ⁶, pouvait être dirigé dans différentes directions.

Pour connaître l'activité électrique du cerveau des humains des électroencéphalogrammes furent réalisés. Lors de l'expérience, chaque participant devait rester assis sur une chaise dans une chambre isolée des radiofréquences extérieures, pendant 7 minutes, en fermant les yeux, tandis que les chercheurs modifiaient le champ magnétique. Le champ pouvait tourner dans le sens horaire ou anti-horaire, comme si vous bougiez la tête à gauche ou à droite, et il était orienté vers le bas, avec une inclinaison de 60° par rapport à l'horizontale, comme le champ magnétique terrestre aux latitudes de Pasadena, en Californie.

Les participants n'ont rien senti de particulier quand le champ magnétique a été manipulé, mais leur cerveau semblait réagir. Il a été observé que chez certaines personnes, lorsque le champ magnétique, dirigé vers le bas, tournait en sens inverse des aiguilles d'une montre, l'amplitude des ondes alpha diminuait beaucoup. Les ondes alpha, d'une fréquence de 10 Hz, caractérisent un électroencéphalogramme lorsque nous sommes éveillés, mais les yeux fermés, c'est-à-dire dans un état détendu. Lorsqu'un stimulus apparaît subitement, le rythme des ondes alpha est désynchronisé, et elles baissent en amplitude. Ce

⁶ Unité de mesure d'induction magnétique du Système international (SI), valant 10^{-6} tesla, et dont le symbole est μT . En France, le champ magnétique terrestre est de l'ordre de 45 μT .

phénomène, appelé « *désynchronisation liée à un événement alpha* », peut avoir lieu par exemple quand le cerveau perçoit un flash lumineux. L'alpha-ERD signifie que le cerveau a capté le stimulus et traite l'information.

Ces expériences suggèrent donc que le cerveau humain détecte le champ magnétique terrestre. D'après le communiqué de l'Institut Caltech, « *nous avons un système sensoriel qui traite le champ géomagnétique tout autour de nous.* » Une nouvelle question se pose alors : à quoi servirait ce sens géomagnétique chez l'Homme ?

Peut-être qu'au cours de la préhistoire nos ancêtres chasseurs-cueilleurs l'utilisaient pour s'orienter et survivre !

Dans l'expérience décrite ci-dessus, il y avait cependant des différences entre les participants : certains ne réagissaient presque pas, alors que d'autres avaient une chute de moitié des ondes alpha après le changement magnétique. Les êtres humains auraient donc une sensibilité géomagnétique variable d'une personne à une autre.

De la **magnétite** est normalement présente sous forme de cristaux biominéralisés dans certains organes chez diverses espèces animales, où elle pourrait jouer un rôle dans le sens de l'orientation.

Chez l'humain on en a trouvé dans plusieurs zones du cerveau, dont les lobes frontaux, les lobes pariétaux, les lobes occipitaux et temporaux, mais aussi dans le tronc cérébral, le cervelet et les ganglions.

Le fer s'y trouve sous trois formes :

- l'hémoglobine (circulant dans le sang),
- la ferritine (protéine) et
- en faible quantité la magnétite.

Les zones du cerveau impliquées dans la fonction motrice contiennent généralement plus de fer. L'hippocampe (zone du traitement de l'information, de l'apprentissage et de la mémoire) en contient aussi.

Effets sur les plantes

Dans les chloroplastes, le fer est requis comme co-facteur pour de nombreuses voies de biosynthèse et pour les chaînes de transfert d'électrons de la photosynthèse et de la respiration. La plupart de ces réactions ont lieu dans des compartiments subcellulaires (chloroplastes et mitochondries) où le fer doit être correctement distribué.

En effet, s'il est en excès il peut entraîner la production de radicaux libres fortement toxiques, ce qui contraint les cellules à maintenir une stricte homéostasie ⁷ pour s'adapter à des conditions fluctuantes. Les facteurs contrôlant la distribution intracellulaire du fer sont toutefois méconnus, alors qu'au niveau de la plante entière les mécanismes d'acquisition du fer sont maintenant très bien connus.

Le noyau, et plus particulièrement le nucléole, accumulent de très fortes concentrations en fer. La fonction de ce pool de fer est totalement inconnue. La question que l'on se pose est donc d'identifier le rôle de ces atomes de fer par rapport aux fonctions du nucléole.

Conclusions

Conquérir l'espace pour le découvrir et le comprendre est un projet que *l'homme-technologique* ne peut qu'ambitionner. Mais s'affranchir du milieu physico-chimique de sa planète (pesanteur, eau, oxygène, magnétisme, spectre électromagnétique qualitatif du soleil...) est problématique. De plus se reproduire dans l'Espace sera indispensable sur le long terme, mais est-ce vraiment envisageable ?

L'acte sexuel est déjà un problème : après une période d'adaptation à l'apesanteur, les équipages vont avoir besoin de dispositifs spéciaux, comme les ceintures élastiques ou des tubes gonflables pour avoir des relations sexuelles dans l'espace.

Tout comme l'érection, l'éjaculation masculine peut avoir du mal à venir

De surcroît, en apesanteur, des expériences ont permis de révéler certaines anomalies à certains stades du développement embryonnaire, mais aussi au niveau de la fécondation elle-même, de la segmentation des cellules et de la fermeture du tube nerveux.

Comme attendu, le sperme exposé aux radiations cosmiques dans l'ISS a davantage d'ADN fragmenté que celui resté sur la Terre. Les cellules congelées ne peuvent pas réparer ces dommages génétiques qui sont liés à des plus bas niveaux de fertilité.

En apesanteur et en absence de bouclier efficace contre les radiations, l'embryon humain, son cerveau, sa colonne vertébrale, ses gonades subissent des mutations handicapantes, voire létales ! Enfin, comment soigner les maladies ou réaliser les opérations nécessaires ?

Cultiver des plantes pour s'en nourrir pose aussi un problème majeur !

Sachant que les premières plantes terrestres sont apparues il y a 500 millions d'années, on comprend que leur évolution (reproduction, nutrition...) se soit réalisée dans des conditions étroitement dépendantes de la pesanteur, de la magnétosphère et des ondes électromagnétiques émises par son étoile le soleil et changer ex abrupto ces conditions entrainera inévitablement des conséquences dangereuses.....

Conquérir l'espace pour y vivre et se reproduire sur le long terme impliquerait l'obligation d'une rapidité d'adaptation trop agressive pour des organismes biologiques dotés d'une complexité inouïe acquise grâce à une évolution de millions d'années et paraît totalement utopique !