



CLUB DES  
CARDIOLOGUES  
DU SPORT

## LE COEUR DE L'ASTRONAUTE

Avec la revue

# Cardio

N°25 - Novembre 2010

& Sport

LA REVUE PRATIQUE DE LA CARDIOLOGIE DE L'EFFORT

### BONNES PRATIQUES

Epreuve d'effort en  
réadaptation cardiaque  
Quelle utilisation ?

### PHYSIOLOGIE

Le cœur de l'astronaute  
De la recherche spatiale  
à la cardiologie appliquée

### CAS CLINIQUE

Insuffisant cardiaque  
et Iron Man  
L'intérêt des examens  
ergométriques

### IMAGERIE

Suspicion de dysplasie  
arythmogène du VD  
Quel type d'imagerie  
demander ?

### LE POINT SUR...

Syndrome  
de Wolff-Parkinson-White  
et pratique sportive



Un poster  
« Les dix  
règles d'or »  
du Club des Cardiologues du Sport  
à l'intérieur

Mise  
au point

### LE CŒUR DE L'ENFANT ATHLÈTE : DES SPÉCIFICITÉS À PRENDRE EN COMPTE

- Bienfaits de l'activité physique et sportive
- Les adaptations aiguës à l'exercice
- Contraintes spécifiques
- La visite de non contre-indication au sport en compétition, l'échocardiogramme, l'épreuve d'effort
- Les risques de l'activité sportive intense

# Le cœur de l'astronaute

## De la recherche spatiale à la cardiologie appliquée

Les missions spatiales habitées constituent une opportunité unique d'études. Du fait des fortes contraintes rencontrées lors du décollage et jusqu'à la mise en orbite, puis lors du retour sur Terre et du déconditionnement cardiovasculaire survenant en microgravité, de nombreuses expérimentations ont été menées. Nous avons tenté, dans cet article, de passer en revue les items les plus importants en privilégiant les problématiques qui auront un impact sur la cardiologie en tant que spécialité médicale.

Pr Frédéric-Léopold Tognella\*

### > Introduction

Ce que nous appelons la conquête de l'espace peut se résumer à une succession d'enjeux de puissance. La course à la Lune a ouvert le champ des vols spatiaux habités. Ceux-ci représentent des défis permanents, techniques et humains, et restent sans équivalents. Le principe de la satellisation a été envisagé par Isaac Newton dès le début du XVIII<sup>e</sup> siècle : selon ce principe, une vitesse nommée "première vitesse spatiale" est définie par la vitesse horizontale conduisant à une orbite péri-terrestre. C'est précisément au lanceur de communiquer une altitude assez grande puis une vitesse horizontale élevée. En août 1961, lors du vol Vostok2, le "mal de l'espace" fait sa

>>> \*Médecine du Sport – Institut Cœur Effort Santé, Médecine aérospatiale, Visiting Professor : Harvard University.

première apparition. Auparavant, les vols étaient plus courts et purement balistiques ; la course technologique entre USA et URSS donne vite naissance à des engins capables d'effectuer des manœuvres. La même année, le Président J. F. Kennedy lance le programme Apollo selon lequel « ... Cette nation se donne dix ans pour faire atterrir un homme sur la Lune et de le faire revenir sain et sauf sur la Terre ».

Nous allons ainsi de "l'homme dans l'espace" et les problématiques qui y sont rattachées, aux missions spatiales. Par les questions qu'elles posent et les moyens technologiques de ces années, elles sont certainement le sujet le plus complexe qui ait été adressé à l'humanité.

Schématiquement, distinguons trois périodes :

- le défi : aller dans l'espace ;



Le principe de la satellisation a été envisagé par

- la course à l'espace : vivre dans le milieu spatial ;
- la période actuelle : accomplir des missions spatiales.

Grâce à la diffusion du savoir, nous savons maintenant qu'un lanceur doit s'arracher à la force de gravitation terrestre et atteindre en quelques minutes les très hautes couches de l'atmosphère et, enfin, incliner sa trajectoire pour entrer dans le vide spatial et se placer en orbite. Sa vitesse est alors de 8 à 11 kilomètres par seconde.

Lors de la phase de réentrée atmosphérique, les couches hautes de l'atmosphère exercent un effet de freinage par frottement qui est mis à profit pour réduire progressivement la vitesse jusqu'à l'atterrissage qui s'effectue à 250 kilomètres par heure pour la navette américaine. Cette phase de freinage demande des



© Fotolia - Stephen Sweet

blématiques spécifiques posées par des séjours opérationnels de plus en plus longs. La question de la santé des équipages lors des missions de longue durée a mobilisé essentiellement la communauté des vols spatiaux habités durant les missions Skylab. En 1975, un rapport NASA rédigé sous la direction du Dr La Fevers identifie deux très importants problèmes limitant les projets de missions spatiales habitées de longue durée :

- le déconditionnement neuro-musculaire et cardio-circulatoire ;
- les effets psycho-sociaux résultant de la vie en petit groupe et dans un espace vital confiné.

Certes, l'espace est habitable bien qu'étant le milieu le plus hostile connu à ce jour, mais il est un lieu qui pose des problèmes nombreux et intriqués si on veut que l'homme y vive « aussi normalement que possible ». Comprendre ces problèmes, les résoudre au mieux, trouver des contre-mesures efficaces, vont devenir des objectifs centraux pour la science et pour le bon accomplissement des missions.

Nous devrions voir émerger un autre type d'astronaute : le "touriste spatial" qui n'accomplit pas de mission et sera dans une situation essentiellement contemplative lors d'un vol sub-orbital de durée bien plus courte – typiquement 20 minutes au-dessus de 100 km d'altitude et 3 minutes en situation d'impesanteur. Les vols orbitaux ne sont pas envisagés actuellement.

Après l'exposition à des facteurs de charge importants (accélérations soutenues de longue durée, vibrations, bruits intenses), l'astronaute expérimente la transition rapide entre ces facteurs de charge et la microgravité (souvent nommée "impesanteur"). Un rapport, datant de 2005 (1) note que 588 des 607 membres d'équipage voyageant sur

la navette ont rapporté des "événements médicaux" durant leurs missions. La première place revient au mal de l'espace qui affecte les deux-tiers des équipages durant les premiers jours (l'incidence maximale se situant dans les 72 premières heures). Il semble diminuer en intensité et en durée avec l'utilisation de la prométhazine et le suivi des consignes strictes pour l'accomplissement des mouvements volontaires.

Allant de surprise en surprise, les études biomédicales du comportement de l'astronaute permettent de dresser un catalogue aussi passionnant qu'impressionnant des modifications qui paraissent n'épargner aucun organe et, du point de vue de la physiologie intégrative, touchent le corps entier ou "système d'organes" à tous les niveaux : ADN, protéines, cellules, ensemble de cellules, tissus, organes et corps entier. Citons la quasi-disparition de la masse pesante modifiant profondément la charge de travail du système musculo-squelettique, les altérations et aberrations neuro-sensorielles précoces – conséquences de troubles neuro-vestibulaires – et l'absence de forces hydrostatiques sur les liquides de l'organisme qui vont perturber le système cardiovasculaire au centre de nos préoccupations dans cet article. Retenons que la cinétique d'installation de ces modifications est rapide et simultanée.

La préparation d'une mission (une fois la sélection de l'équipage accomplie) fait appel à des systèmes complexes, souvent peu connus, constitués d'installations terrestres et de systèmes aériens. Ainsi, sur Terre nous trouvons la centrifugeuse humaine et, de plus en plus, des simulateurs ayant recours aux techniques de représentation de la réalité virtuelle amplifiée pouvant, par exemple, reconstituer au plus

Isaac Newton dès le début du XVIII<sup>e</sup> siècle.

manœuvres complexes en forme de lacets et exposent l'équipage à une phase longue d'environ 20 minutes de décélération, le tout sur une distance de 8 000 km environ, selon le point d'impact ou d'atterrissage.

## > Problématiques posées

Historiquement, il y a eu une ère du soupçon : « l'homme pouvait-il vivre dans une cabine propulsée dans l'espace ? » Mentionnons deux questions initiales : « le cerveau ne sera-t-il pas affecté gravement par les accélérations ? » et aussi « le cosmonaute pourra-t-il avaler normalement sa salive lorsqu'il sera en impesanteur ? ». Ainsi, durant plus de dix ans, se sont posées des questions de faisabilité technologique, de défis humains et d'identification des pro-

près le profil d'une phase critique de la mission. Quant au vol parabolique dans l'Airbus Zéro-G, il autorise l'enchaînement de 30 périodes de 20 à 22 secondes d'impesanteur se succédant à intervalles réguliers lors d'un vol.

Ce qui ne lasse pas d'étonner, c'est l'impressionnante adaptabilité du système cardiovasculaire à des conditions aussi difficiles et contrastées que les phases d'accélération soutenue, les séjours prolongés en microgravité entraînant la redistribution des liquides du corps, et les stimulations intenses que constituent les travaux physiques accomplis lors des sorties extravéhiculaires (notons que l'acrobatie aérienne, le combat aérien sont aussi générateurs de stimulations extrêmes, le plus souvent sous forme d'accéléérations importantes de courtes durées).

Le cardiologue connaît bien le système veineux capacitif de la partie inférieure du corps, et surtout des membres inférieurs, ainsi que les classiques schémas de réponses du tonus vasculaire luttant contre l'effondrement des résistances vasculaires périphériques (les centres d'investigation font appel à l'outil diagnostique qu'est la réalisation et le suivi continu du *tilt test* sur un support motorisé passant insensiblement de la situation allongée à la situation debout).

Plus impressionnante, surtout pour ceux qui le vivent, est la cinétique rapide d'apparition des conséquences de la migration du sang vers le système capacitif, lors des accélérations + Gz, avec l'effet annonciateur qu'est la vision en tunnel précédant le voile gris. Le passage du voile gris au voile noir et finalement la perte de connaissance qui est alors rapide (souvent appelée G-LOC se traduisant par *G. Loss Of Consciousness*). En microgravité, l'absence de forces



© DR

Ultime mémorisation des actions à réaliser lors du vol.

hydrostatiques s'exerçant sur les fluides du corps aura pour résultat la migration de ceux-ci vers la partie céphalo-thoracique. La traduction visible est la constitution de la face ronde ou *puffy face*. D'autre part, les muqueuses rhino-sinusiennes sont œdémateuses. Ceci constitue un facteur fort déstabilisant car la mimique faciale, perturbée, est la source de bien des incompréhensions entre membres d'un même équipage (2).

Le coût énergétique d'un exercice physique standardisé est plus élevé en microgravité comparé à son équivalent sur Terre, ce qui est étonnant : les performances physiques générales sont diminuées et le coût énergétique est anormale-

ment élevé, surtout lors des sorties extravéhiculaires (port d'une combinaison lourde et pressurisée qui entrave le mouvement) (3).

Mais la problématique centrale reste la suivante : se mouvoir dans une cabine de la Station Spatiale Internationale est peu coûteux sur le plan énergétique du fait de la microgravité, il en résulte notamment un déconditionnement cardiovasculaire durable et péjoratif : pour une meilleure réalisation des activités extravéhiculaires et pour les manœuvres d'urgence ; puis, lors du retour sur Terre (eugravité), par une intolérance orthostatique pouvant être majeure après un vol de longue durée.

## > Les réponses scientifiques

La première, chronologiquement, fut une réponse qui ouvrait l'ère des contre-mesures empiriques... et des questionnements. C'est très certainement à ce moment que la recherche d'un équivalent terrestre de la microgravité fut mis au point et dénommé *bed rest* (notons que le *bed rest* ne peut que simuler certains aspects de la microgravité et donc, que le mot "équivalent", consacré par l'usage, est excessif). On conçoit aisément qu'il soit possible de déterminer la position physique qui reproduira la migration des fluides vers la partie haute du corps, mais qu'il est physiquement impensable d'annuler la gravité terrestre.

Les principales contre-mesures qui furent mises au point sont :

- 1) l'exercice physique (étudié sérieusement pour la première fois au cours des missions Skylab) ;
- 2) le *Low Body Negative Pressure* (LBNP).

Ces contre-mesures furent associées assez souvent à :

- des investigations dédiées (la mesure de  $VO_2$  max et l'échographie cardiaque au repos et à l'effort (l'échographe "As de Cœur" fut le premier appareil de ce type utilisé par l'astronaute français J.L. Chrétien à bord de la station Mir en 1993) ;
- une considération de l'hygiène de vie à bord, en suivant une approche de bon sens en dépit de l'absence de rythmes circadiens.

Durant les années 90, de nombreuses équipes ont étudié l'efficacité objective des contre-mesures qui comprenaient un volet exercice physique, un volet nutritionnel, et un volet pharmacologique. L'exercice physique semble bien codifié depuis les deux dernières missions SKYLAB, en ce qui concerne le maintien du  $VO_2$  max. Cependant,

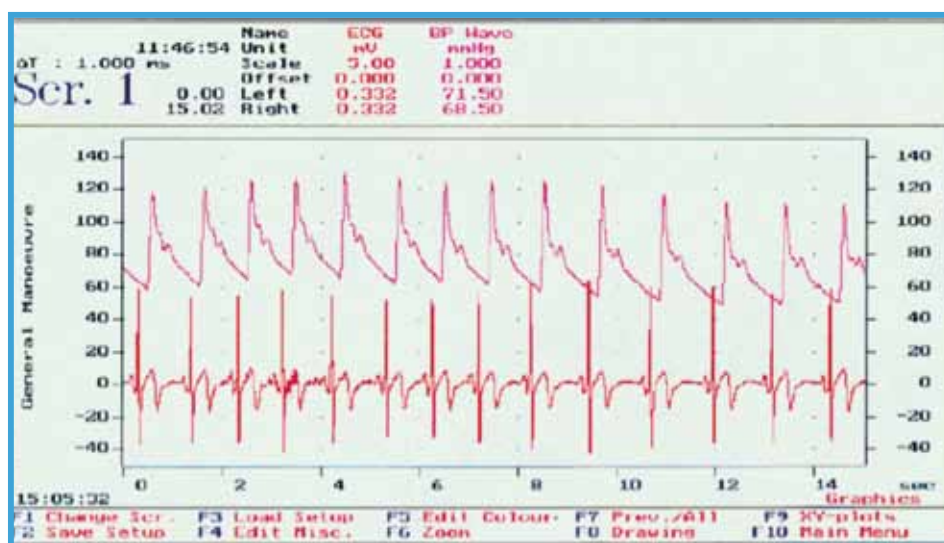
pour obtenir un résultat significatif, deux séances par 24 heures s'avèrent nécessaires. Ces séances pénalisent l'emploi du temps en orbite et la justification opérationnelle de ces séances est dure à défendre. Donc, des protocoles différents ont été testés lors de *bed rest* (BR) de longue durée.

Le LBNP, dans sa forme la plus simple, consiste à placer les membres inférieurs et l'abdomen dans un tube rigide. Une étanchéité est assurée par une sangle abdominale serrée. Grâce à une pompe à dépression, l'expérimentateur impose au bas du corps, placé dans le tube, une dépression de 40 à 60 mmHg, ce qui entraîne la migration du sang vers les vaisseaux capacitifs des membres inférieurs. Avec l'allongement de la durée des missions, il est devenu pressant et prioritaire de bâtir un programme complet et complexe d'entraînements scientifiquement encadrés. Ainsi, il nous est revenu d'imaginer des méthodes pour étudier la quantification du déconditionnement neuromusculaire lors des vols de longue durée (des appareils et logiciels ont été inventés pour l'occasion), puis de proposer des contre-

mesures en validant leur impact sur la stimulation du système cardio-respiratoire (4).

Les protocoles comprennent trois phases :

- *Pre-Flight* : collection des données de base (*Baseline Data Collection - BDC*) ;
- *In-flight Measurements* : expérimentations durant le vol, souvent couplées, plus rarement spécifiques ;
- *Post-Landing* (période transitoire débutant juste après l'atterrissage) : on procède à l'acquisition de données en suivant les mêmes protocoles que durant la phase dite BDC. Souvent, la cinétique de récupération est source de précieux renseignements selon la thérapie post-vol associée. La période du retour sur Terre est difficile et émouvante à bien des points de vue et le grand public a une opinion souvent éloignée de la réalité (dominée par le danger). Dans ce cadre, imposer alors des batteries de tests est exclu. Enfin, il faut un parti pris : celui de respecter le schéma d'acquisition des données ci-dessus indiqué.



Enregistrement de l'ECG (en bas) et de l'onde de pression artérielle (en haut) sur un astronaute lors d'un vol.

Bien des plans expérimentaux ont été proposés afin d'élucider les adaptations vasculaires induites par la microgravité. Dans la logique intégrative, une expérimentation simple et "isolée" est l'exception. Il y a donc une thématique centrale (qu'arrive-t-il au cœur lors de séjours en microgravité ?) qui donne lieu à la réalisation d'expérimentations pluridisciplinaires (quels facteurs sont les plus pertinents à étudier simultanément ou dans le même schéma expérimental ?). Un objectif permanent est de recueillir des données quantitatives permettant l'étape de modélisation du comportement et, ultérieurement, des applications réalistes dans la pratique cardiologique. Les équipes en charge des réalisations ont toujours un argumentaire solide de retour sur expérience applicable à la cardiologie.

### > Les modifications cardiovasculaires

Les experts de la NASA ont mis en place un institut doté de commissions. Ainsi, le NSBRI (*National Space Biomedical Research Institute*) comporte une commission en charge des études portant sur le système cardiovasculaire.

En 2005, un rapport de la NASA (6) identifiait les thèmes suivants :

- 1/ survenues d'arythmies cardiaques sévères ;
- 2/ altération de la fonction cardiaque ;
- 3/ manifestations de maladies cardiaques antérieures asymptomatiques ;
- 4/ réponse cardiovasculaire diminuée lors du stress orthostatique ;
- 5/ réponse cardiovasculaire au stress de l'exercice diminuée.

#### 1/ Survenue d'arythmies cardiaques sévères

Dans une des plus grandes bases de données conçues pour l'examen direct des ECG des astronautes lors de vols de longue durée, Golubchikova et al. concluent « *qu'il n'y a pas de pathologie détectable dans l'activité bioélectrique du cœur lors de séjours de longue durée à bord de la station Mir* » à propos d'une revue de 59 ECG de cosmonautes différents durant des séjours de plus de 6 mois (7). Et si l'on considère ensemble les données disponibles, le niveau de preuve est très faible pour affirmer la corrélation entre vol spatial et arythmies graves.

Il faut replacer ce constat dans son contexte : il est effectué sur une population bien spécifique constituée

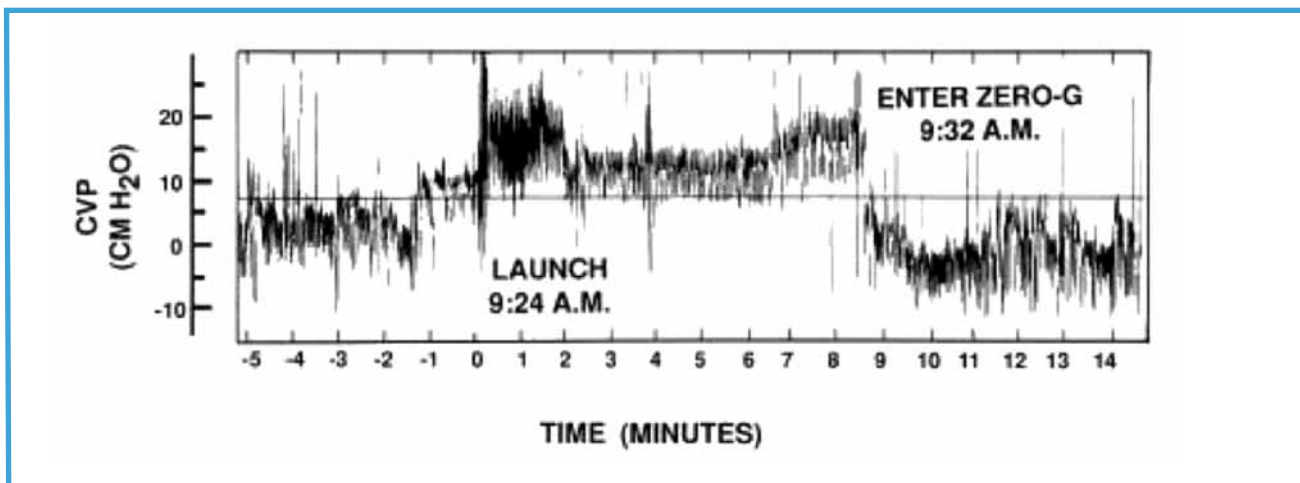
de cosmonautes confirmés, c'est-à-dire "titulaires" pour une mission. La survenue d'extrasystoles lors des tests de sélection en centrifugeuse ne peut pas être constatée chez ces sujets puisque c'est une constatation éliminatoire.

#### 2/ Altération de la fonction cardiaque

Il est clairement établi :

- que le volume d'éjection systolique du ventricule gauche est significativement diminué lors du retour sur Terre ;
- que l'échocardiographie montre toujours une diminution de la taille du cœur intéressant les parois et le volume télédiastolique avec un VES diminué (donc, c'est une amyotrophie ventriculaire) (8) ;
- qu'il y a diminution du volume sanguin circulant donc le remodelage cardiaque n'est pas en lui-même un facteur de risque pour le vol spatial : il est plutôt la conséquence de l'adaptation à la microgravité.

L'intolérance orthostatique et la réduction de la capacité de travail sont les vrais risques opérationnels. Dans tous les cas, on est très loin des approches intégratives développées par ailleurs dans le projet



Evolution de la pression veineuse centrale en fonction des variations de la gravité lors d'un entraînement pré-vol.

PHYSIOME, notamment en électromécanique cardiaque (9).

Un modèle d'étude est présenté par les patients qui bénéficient d'une chirurgie de la valve aortique, parce que cette procédure est accomplie pour corriger un problème dans lequel la valvulopathie modifie la fonction cardiaque, avant et après l'intervention. Cette modification de la fonction cardiaque peut fournir de l'information utile à la compréhension et potentiellement pour la prévention de la modification du myocarde lors des vols spatiaux.

Voici donc un bel exemple "transversal" : on ne saurait cantonner l'objet de la réflexion et des savoirs au seul domaine spatial !

### 3/ Manifestations de maladies antérieures asymptomatiques

Actuellement, nous nous heurtons à l'absence de cas documentés et publiés.

### 4/ Diminution de la fonction vasculaire

Les réponses hémodynamiques durant les tests en position debout d'une durée de 10 minutes (*tilt test*) conduits sur 14 spatonautes américains, juste après le retour sur Terre et durant la phase de récupération (*Recovery Period*) de vols spatiaux de 9 à 14 jours révélèrent des volumes vasculaires circulants inchangés, une migration du sang dans les jambes, une diminution du remplissage du VG et du VES, et une tachycardie sinusale chez tous les sujets (présentant ou pas un malaise présyncopal). Ceux qui ne finissaient pas le test avaient une diminution significative de la résistance vasculaire périphérique. Ceux qui achevaient le *tilt test* (stabilité orthostatique) montraient une résistance vasculaire périphérique élevée lors du passage en orthostatisme quand celle-ci était

comparée aux données pré-vol (BDC).

### 5/ Réponse nerveuse autonome diminuée

Les adaptations des réponses du système nerveux autonome via les mécanismes du baroréflexe qui contrôlent les réponses chronotropiques cardiaques et les résistances vasculaires périphériques peuvent aussi contribuer à une régulation inadéquate de la pression sanguine après exposition à la microgravité. Le sujet fait débat. Y a-t-il une concentration basse en norépinéphrine associée aux moindres résistances vasculaires ? On sait déjà que l'activité nerveuse sympathique est élevée chez tous les astronautes après un vol spatial, donc une explication est la suivante : de basses concentrations constatées de norépinéphrine et une diminution des résistances périphériques vasculaires reflètent un retrait sympathique brutal une fois que la réserve vaso-constrictive a été épuisée plutôt qu'une sensibilité hypo-adrénergique, c'est-à-dire une moindre concentration de récepteurs cellulaires.

L'importance d'un suivi longitudinal et multiparamétrique devient évident. Le "support" de ce suivi repose sur les acquisitions multimodalités et, demain, du ressort de l'électrodynamique cardiaque. Il en va de même de l'analyse des états transitoires. Par exemple, le monitoring continu de la pression veineuse centrale (PVC) réalisée chez l'homme lors de la phase initiale de l'insertion en orbite objective une condition apparemment paradoxale dans laquelle, malgré la migration des fluides déjà mentionnée, la PVC est abaissée alors que le VES et le débit cardiaque sont augmentés, la FC restant inchangée.

### > L'avenir en questions

Il est fondamental de souligner la coévolution des savoirs médico-physiologiques appliqués et les objectifs des missions. Le médecin joue ici un rôle central, et il travaille en synergie avec les ingénieurs, les psychologues, etc. Les technologies de l'information et de la communication donnent aujourd'hui un visage nouveau à l'approche scientifique et médicale, pour peu que des précautions adéquates soient respectées lors de la mise en réseau des données et des informations communiquées.

Le besoin de miniaturisation, très important pour l'ensemble de la charge utile, mène à des efforts considérables d'intégration. Justifions cette assertion par un ordre de grandeur : le coût moyen d'un kilogramme de charge utile placée en orbite est actuellement de 20 000 €. Ainsi, nous n'aurions certainement pas les micro-ordinateurs actuels s'il n'y avait pas eu les missions Apollo. Identiquement, les petits cardio-défibillateurs de nos jours n'auraient certainement pas vu le jour sans les développements technologiques nécessaires pour ces mêmes missions. Actuellement, les évolutions technologiques vont dans le sens d'acquisitions multi-modalités (i.e. ECG, PA, échographies et multi-acquisition de paramètres physiologiques tels que l'expérimentation dénommée CARDIOCOG ou encore le programme français connu sous le nom de CARDIOMED (ce dernier étant développé par le CNES).

Cette option illustre le concept émergent d'expérimentation(s) à objectifs "multiples" dont la finalité vise clairement à une compréhension des mécanismes physiologiques intriqués. Si, aux premiers

temps, la résolution des problèmes et l'acquisition des connaissances furent la priorité, le paradigme dominant qui se met en place est d'identifier les relations de causalité entre systèmes (biologiques, de monitoring, de traitement de l'information) et situations.

### > Conclusion

Nous devons indiquer notre volonté de rester au plus près des faits et interprétations en termes mécaniques appliqués à la cardiologie puisque les études proposant une lecture claire des relations de cause à effet se situent dans ce domaine (toutefois, nous nous sommes interdit tout développement relevant de la mécanique des fluides...). C'est aussi le parti pris afin de tester les hypothèses dans un futur proche (donc de se trouver en phase avec les programmes en cours de réalisation ou de développement opérationnel pour la pratique) : la démarche intégrative est indéniablement le paradigme le plus riche de promesses. Une telle démarche suppose une continuelle interaction entre les sciences médicales (donc les sciences du vivant), en rappelant le rôle central du cœur - tant pour ses formidables caractéristiques mécaniques que pour son adaptabilité électromécanique - et les sciences de l'ingénieur. La modélisation a prouvé avec une pertinence aiguë sa capacité à rendre compte de phénomènes complexes, à identifier les relations d'interactions fortes entre paramètres. Cependant, la mise au point d'un modèle représentatif exige une phase d'affinement, c'est-à-dire de confrontation des données obtenues sur un sujet à celles qui sont prédites par le modèle, suivie de retour sur expérience dont la finalité est d'améliorer le

modèle. Continuer sur cette lancée est une priorité absolue, tant pour les explorations spatiales que les applications terrestres. Une telle entreprise est actuellement envisageable, puisque nous disposons à la fois d'outils non invasifs performants utilisables dans l'environnement micro-gravitaire comme dans les secteurs de la recherche biomédicale et les filières de soins. Quel système, sinon la Station Spatiale Internationale, permettra demain de répondre aux problèmes biomédicaux attendus lors de vols vers Mars ? Il semble assuré que cette thématique large allant des problèmes psycho-sociaux, à la manière de procurer des soins médicaux adéquats au cœur d'un vaisseau placé en impesanteur, et à des millions de kilomètres de la Terre, ravive l'intérêt des sciences du vivant en microgravité. ■

### Remerciements :

**Je tiens particulièrement à remercier le comité éditorial du Club des Cardiologues du Sport pour ses remarques et suggestions, et notamment le Docteur Jean-Claude Verdier pour ses conseils et relectures attentives du présent article. Je suis honoré d'avoir pu compter depuis maintenant des années sur l'ESA, le CNES, et particulièrement le Corps Européen des Astronautes, pour leur dévouement sans faille, leur réactivité et leur participation active aux expérimentations que nous avons menées ensemble.**

### MOTS CLÉS

Mission spatiale, Recherche, Déconditionnement cardiovasculaire

### Bibliographie

1. The Human Factor – Space-station planners gear up for Mars. *Nature* 2005 ; 436 : 895 -904.
2. Nicogossian A, Huntoon CL, Pool SL. *Space physiology and medicine – second edition*. Ed Lea & Febiger, Philadelphia, 1989 : 19106-4198.
3. Petrivelli A. *Building the Future*. ESA Internal Bulletin 2007 : 34-40.
4. Tognella F, Mainar A, Vanhoutte C, Goubel F. A mechanical device for studying neuromechanical properties of human muscles in vivo. *J Biomechanics* 1998 ; 30 : 1077-80.
5. Convertino VA, Cooke WH. Evaluation of Cardiovascular Risks of Spaceflight Does Not Support the NASA Bioastronautics Critical Path Roadmap. *Aviat Space & Environmental Medicine* 2005 ; 76 : 869-75.
6. Golubchikova ZA, Alferova IV, Ljamin VR, Turchaninova VF. Dynamics of some electrocardiographic parameters in cosmonauts during long-term Mir missions. *Aviaskom Ekolog Med* 2003 ; 37 : 41-5.
7. Mulvagh SI, Charles JB, Riddle JM et al. Echocardiographic evaluation of the cardiovascular effects of short duration spaceflight. *J Clin Pharmacol* 1991 ; 31 : 1024-6.
8. *Proceedings of the IEEE* 2006 ; 94 (n° 4). Special Issue on The Physiome project and Beyond.
9. Kerckhoffs RCP, Healy SN et al. Computational Methods for Cardiac Electrodynamics. *Proceedings of the IEEE* 2006 ; 94 (n° 4) : 769-82.