

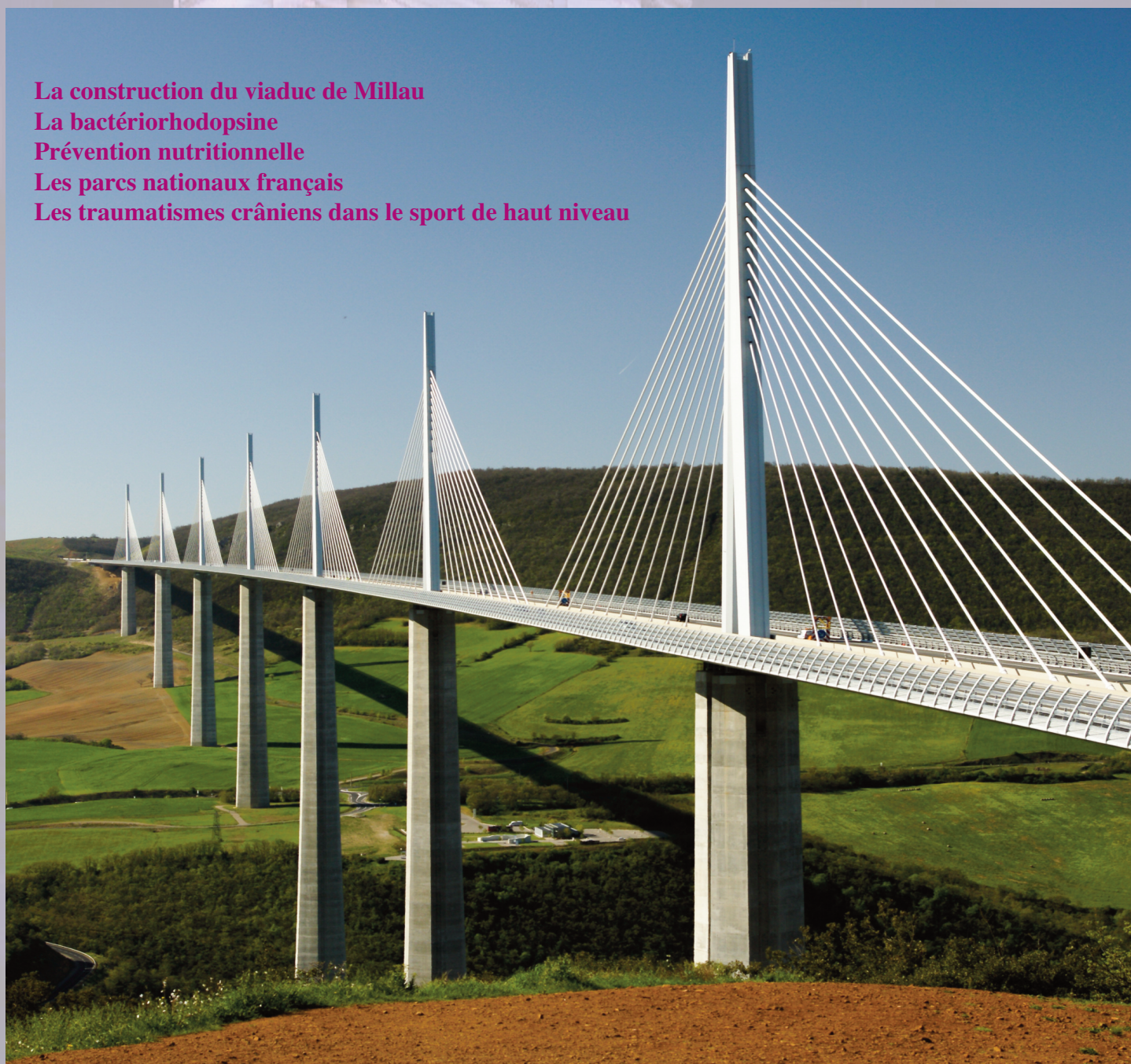


# AUVERGNE

N° 91 DÉCEMBRE 2018

# Sciences

**La construction du viaduc de Millau**  
**La bactériorhodopsine**  
**Prévention nutritionnelle**  
**Les parcs nationaux français**  
**Les traumatismes crâniens dans le sport de haut niveau**



## Revue de l'ADASTA

Association pour le Développement  
de l'Animation Scientifique et Technique en Auvergne



# LE MOT DU PRÉSIDENT



## Ça bouge !

*L'ADASTA évolue, intègre de nouveaux acteurs, en voit partir d'autres. C'est le propre de tout organisme vivant et nous devons nous en réjouir. Notre association a significativement changé dans ses modes d'actions, ses cibles et ses réseaux. Bien sûr il nous reste du chemin à parcourir pour être totalement en phase avec notre environnement, mais je pense que nous allons dans la bonne direction.*

Il nous faut aujourd'hui remercier ceux qui ont accompagné notre développement ces dernières années et ont souhaité maintenant se consacrer à d'autres activités, ils n'ont pas démérité :

- Annie tout d'abord qui a assuré notre secrétariat avec le dévouement et le sourire qui rendaient si agréable tout passage dans notre bureau ;

- Georges, inlassable organisateur de conférences et chasseur affûté de conférenciers, avec tout ce que cela suppose de ténacité et d'organisation ;

- André qui sut tenir les cordons de notre bourse, petite mais exigeant une gestion prudente et efficace compte tenu des coûts à couvrir et des difficultés à augmenter nos ressources ;

- Roland qui enchantait des générations de jeunes élèves par ses animations souvent étonnantes, ...quelquefois détonantes !

Il faut se réjouir des volontaires qui ont repris la barre et assurent désormais la continuité de notre fonctionnement :

- Elisabeth, secrétaire générale efficace et volontaire, et avec elle Anny, Mireille et Dominique qui contribuent à la gestion quotidienne ...et encaissent les coups de feu !

- Bruno, aujourd'hui à la barre d'une des activités qui contribue le plus à notre image et à notre succès : nos conférences mensuelles.

Merci enfin aux bonnes volontés qui ont récemment répondu à nos appels à l'aide dans les domaines où notre action doit être renforcée : Edith au conseil d'administration, Nicole et Jean-Luc pour la revue, Guy pour les visites et les voyages.

Ces soutiens manifestés à l'ADASTA sont précieux, vitaux même car ils garantissent sa pérennité et permettent d'envisager l'avenir avec une certaine confiance, en dépit des difficultés que nous éprouvons. Mais ce n'est pas tout, nous avons encore besoin de bras :

- pour le poste de trésorier(ère), aujourd'hui à pourvoir d'urgence ;

- pour la fonction de secrétaire général(e) adjoint(e) que nous souhaitons créer ;

- pour épauler notre webmaster en vue de l'indispensable renforcement de notre communication ;

- pour relancer les animations scientifiques que nous pouvons proposer en de nombreuses occasions.

Autant de tâches passionnantes et nécessaires : j'attends les candidatures.

Par avance, merci !

**Jean-Philippe MOULIN**

*Président de l'ADASTA*

## MERCI À NOS SPONSORS



## S O M M A I R E

Editorial .....	1
Construction du viaduc de Millau .....	2
Bactériorhodopsine .....	9
Prévention nutritionnelle .....	13
Parcs nationaux français .....	16
Traumatismes crâniens dans le sport de haut niveau .....	19
Une journée en Corrèze .....	25
Conférences - Bon Adhésion .....	28



**Couverture :**  
**Viaduc de Millau**  
**Copyright : J.P. Muzeau.**  
**Architecte : Lord Norman Foster**

### Comité de rédaction de la Revue Auvergne-Sciences

Directeur de la publication : Jean-Philippe Moulin

Rédacteur en chef : Philippe Choisel

Membres : Georges Anton, Françoise Besserve,  
 Jean-Claude Capelani,

Jean Chandezon, Jean-Luc Chanoine,

Michel Gendraud, Georges Jeminet, Nicole Lair,

Bruno Rakinski, André Schneider

Impression : Imprimerie Vidal - Vichy

Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite. Il en est de même pour la traduction, l'adaptation ou la transformation, l'arrangement ou la reproduction par un art ou un procédé quelconque des articles publiés et de leurs illustrations (Code français de la propriété intellectuelle, art. L.122-4). Ceux-ci sont de la responsabilité exclusive de leurs auteurs. Consulter la rédaction pour toute demande à ce sujet



**Bruno RAKINSKI**

# ÉDITORIAL



Après une dizaine d'années à assurer la direction scientifique de l'ADASTA, Georges Anton a souhaité «passer la main». Suite à la décision du conseil d'administration, c'est désormais moi qui assurerai cette fonction. Que Georges soit ici remercié pour l'immense travail, dans la durée, qu'il a réalisé pour notre association. Exceptionnellement, et à la demande de notre Président, je prends en charge cet éditorial pour évoquer cette passation, mais aussi les défis de l'ADASTA, ses forces et faiblesses dans son environnement.

En un peu plus de trois décennies le contexte a beaucoup changé. L'ADASTA ne peut plus être un acteur de la formation continue des professeurs du secondaire, des structures ont été mises en place pour cela ; de nombreuses associations ou entités ont été créées, par exemple ASTUSCIENCES, dont nous sommes partenaire, et qui est clairement impliquée dans le développement de l'animation des sciences et techniques ; la défiance vis-à-vis de ces domaines n'a jamais été aussi grande ; les réseaux sociaux et l'anonymat sur le web autorisent toutes les audaces favorisant les théories complotistes et les «réalités alternatives».

Les points faibles de l'ADASTA sont maintenant bien connus : ils sont liés à la difficulté à renouveler ses animateurs ou plus généralement ses membres actifs. Je vous invite donc à vous investir dans votre association pour en assurer la pérennité. Dans ce contexte, chacun doit se poser trois questions selon la fonction visée :

*En ai-je la compétence ? En ai-je le goût ? Y a-t-il un besoin dans mon environnement ?*

Beaucoup d'associations reprennent l'image de l'«auberge espagnole» où l'on trouve ce que l'on y apporte, pour motiver leurs membres à s'y investir plutôt qu'à consommer. En l'occurrence, je dirais plutôt que l'on y trouve bien plus que ce que l'on y apporte.

Les points forts de l'ADASTA concernent ses conférences, sa revue, ses sorties/visites, sa communication qui est en plein renouveau. Mais sa force principale réside dans la qualité de ses membres avec une grande diversité de compétences dans les divers champs des sciences et techniques.

Ce numéro d'«Auvergne Sciences» nous emmène vers des horizons variés et constitue une opportunité pour définir ce que à mon sens devraient être les grandes orientations scientifiques de notre association.

Avec le compte-rendu sur les visites en Corrèze, l'habileté de l'Homme est mise à l'honneur. Technique de fabrication des accordéons et production des ardoises l'illustrent bien. Mais le contexte géologique de formation des schistes ardoisiers montre aussi l'intérêt de prendre du recul en présentant des sujets connexes utiles à la bonne compréhension.

Cette remarque vaut aussi pour le sujet Nutrition et aliments ultra transformés, là où la science rejoint des préoccupations sociétales (*environnement, santé, éthique, économie*).

C'est aussi le cas pour l'article sur les parcs nationaux avec la difficulté de concilier biodiversité/conservation des paysages et développement économique/activités humaines.

Nous devrions tous être concernés par les sujets de médecine, l'article de biomécanique et neurologie pour tenter de comprendre les traumatismes crâniens et cérébraux dans les sports en est un excellent exemple.

Avec l'article sur la rhodopsine, nous avons une belle illustration des processus fondamentaux à l'œuvre dans la synthèse énergétique et la vision.

Enfin, une petite touche de spectaculaire n'est pas inutile pour susciter l'intérêt et motiver la lecture. La prouesse technologique et la magnifique réalisation du viaduc de Millau, le plus haut du monde, apportent cette touche. Mais on trouvera aussi dans l'article comment les aciers et la simulation ont joué un rôle déterminant dans cette construction.

Une fois encore notre revue brille par sa qualité. Elle confirme qu'elle est un bon vecteur pour dire et redire «*que la Science est belle, qu'elle reste jeune malgré ses trois siècles... et bien loin d'être morte*».

Je pense que l'ADASTA, ou plutôt chacun d'entre nous, a un rôle social à jouer au moment où la société, l'environnement, deviennent de plus en plus technico-scientifiques avec des journalistes ou des enseignants qui, en dépit de leur position centrale et de leurs responsabilités ont un niveau très insuffisant dans ce domaine. Nous devons promouvoir autour de nous une science ouverte, démarquée des pseudosciences, mais aussi du scientisme, et montrant toute la richesse de ses multiples facettes et de leurs interactions. La Science n'explique pas tout ; le progrès scientifique est toujours à la frontière entre savoir et ignorance. «*Sans une conscience profonde de notre ignorance, il ne peut y avoir de réelle avancée en science*», James Clerk Maxwell, un des plus grands physiciens du XIX<sup>ème</sup> siècle.

Les technologies impliquant l'usage du laser nous sont très familières; certains en utilisent quotidiennement. Pourtant sans des études théoriques de haut niveau elles n'existeraient pas. S'il en était besoin, le prix Nobel de Physique 2018 nous le rappellerait. Il y a cinquante ans, Alfred Kastler obtenait aussi ce prix prestigieux pour ses études sur le pompage optique, mais sans la démonstration par Albert Einstein de la possibilité de faire de l'émission stimulée de photons, cela aurait été impossible et on ne parlerait certainement pas de laser. Plus en amont encore, il est impossible d'ignorer la place prépondérante des mathématiques. La physique quantique et la physique relativiste, deux principaux piliers de la physique moderne, n'auraient pu se développer sans les espaces de Minkowski pour la première et les espaces de Hilbert pour la seconde.

Pour comprendre le monde qui se dessine, ses enjeux et les manipulations, l'«*honnête homme*» devrait avoir aujourd'hui des notions de physique quantique et de biologie. Les immenses progrès de cette dernière ont des retentissements de plus en plus rapides sur notre vie et nous invitent en conséquence à nous armer intellectuellement pour être en mesure de réfléchir et échanger sur l'évolution de l'éthique.

J'aimerais aussi que l'on accorde une place à l'histoire des sciences pour montrer la genèse des concepts, l'évolution des idées en relation avec les sociétés et la création collective. Par souci d'efficacité, nos enseignements nous ont en général offert des présentations édulcorées des tâtonnements et erreurs qui ont, en réalité, jalonné de grandes découvertes. Cette efficacité a eu parfois comme revers un aspect aride et même pour certains, un manque d'humanité des disciplines scientifiques. L'histoire des sciences peut aussi remettre un peu d'humanité dans ces disciplines. Elle peut aussi remettre à leur place des contributions féminines aussi majeures qu'oubliées.



**Jean-Pierre Muzeau**

*Professeur Honoraire de Polytech Clermont-Ferrand*

*Directeur scientifique du Centre des Hautes Études de la Construction (CHEC)*

*Président de l'Association pour la Promotion de l'Enseignement de la Construction Acier (APK)*

# LE VIADUC DE MILLAU

## RÉSUMÉ

Dans le sud de la France, à proximité de la ville de Millau, le raccordement de Clermont-Ferrand à Montpellier par l'autoroute A75 a nécessité la construction d'un ouvrage exceptionnel pour franchir la vallée du Tarn. L'ouvrage est constitué d'un tablier en caisson avec un platurage orthotrope, le tout entièrement en acier. Il est soutenu par des haubans à des pylônes également en acier. Le montage a été réalisé par lancement sur des palées métalliques provisoires. Ce pont, long de 2460 mètres, est actuellement le viaduc le plus haut du monde. Il possède en effet des piles en béton atteignant 245 mètres de hauteur et son plus haut pylône représente une hauteur totale de 346 mètres au dessus du Tarn. Cet article présente l'un des plus grands ouvrages haubanés à travées multiples de ce début du vingt-et-unième siècle.

## INTRODUCTION

L'un des axes les plus fréquentés pour traverser la France du Nord au Sud a longtemps utilisé la liaison entre Paris et Lyon par l'autoroute A6 puis la Vallée du Rhône par l'autoroute A7. Le trafic ayant considérablement augmenté entre le nord et le sud de l'Europe, il a fallu trouver une alternative permettant de séparer les flux à destination de l'Italie de ceux qui se dirigent vers l'Espagne et le Portugal tout en augmentant la capacité globale. C'est pourquoi, dans les années 1970, l'état français a pris la décision de créer un nouvel itinéraire reliant d'abord Paris à Clermont-Ferrand par l'autoroute A71 puis traversant le Massif Central par l'autoroute A75 pour rejoindre l'autoroute A9 au niveau de Montpellier avant de se diriger vers Béziers puis vers Barcelone.

Cette autoroute a été d'une conception très délicate. C'est la plus haute de France avec un point culminant à 1121 mètres. Elle traverse des paysages accidentés en moyenne montagne ayant nécessité de nombreux ouvrages d'art, ponts et tunnels, particulièrement intéressants pour les spécialistes du Génie Civil, mais c'est au niveau du contournement de la ville de Millau que l'on trouve l'ouvrage le plus impressionnant : le viaduc de Millau. Constitué d'un tablier en caisson entièrement en acier avec un platurage orthotrope, il est soutenu par des haubans à des pylônes également en acier. Il possède 6 travées courantes de 342 mètres et deux travées d'extrémité de 204 mètres. Le montage a été réalisé par lancement sur des palées métalliques provisoires. Ce pont, d'une longueur totale de 2460 mètres, est actuellement le viaduc le plus haut du monde. Il possède en effet des piles en béton très élancées atteignant 245 mètres de hauteur. Le plus haut pylône représentant une hauteur totale de 346 mètres au dessus du Tarn, il est plus haut que la Tour Eiffel ! Cet article expose l'évolution de ce projet jusqu'à la solution finale retenue et décrit les méthodes utilisées pour sa construction.

## 1 - DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Cette solution de franchissement est un viaduc d'une longueur totale de 2460 mètres avec 6 travées courantes de 342 mètres et des travées de rive de 204 mètres (figure 1). La configuration particulière du site a dicté l'implantation des piles et la distribution des travées.

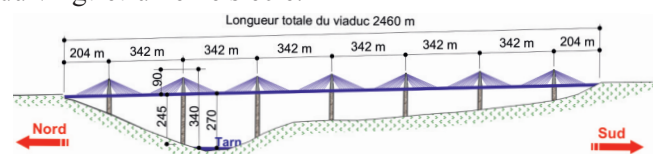


Figure 1 – Dimensions longitudinales de l'ouvrage.

Signalons que la création d'une travée principale importante signalant le franchissement du Tarn ne se justifiait pas, tant au plan architectural que technique. En effet, une très grande portée dans cette zone, située à proximité d'une extrémité, aurait conduit à un ouvrage fortement dissymétrique ce qui aurait déséquilibré complètement l'ensemble et aurait amené de fortes suggestions pour la stabilité vis-à-vis des effets du vent. Par ailleurs, une grande travée apparaissait complètement illogique car le franchissement du Tarn n'est jamais clairement visible. Dans ce paysage au relief très marqué, un ouvrage unique, avec un aspect régulier, a permis une excellente insertion dans le site (photo n°1). Comme sa présence ne pouvait être très discrète, elle devait, au contraire, mettre en valeur la puissance de l'ouvrage tout en respectant des critères de finesse et d'élégance.



Photo n°1 – Le viaduc et la ville de Millau. (Photo J.-P. Muzeau)

L'ouvrage retenu à l'issue de la dernière phase des études de conception était entièrement en béton. Néanmoins, la sidérurgie et les constructeurs métalliques ont réussi à démontrer que le tablier en acier était la solution optimale. L'action menée dans cette direction a convaincu les entreprises et le maître d'ouvrage. Le groupe Eiffage qui l'avait bien compris, a remporté ce projet avec l'architecte britannique Sir Norman Foster.

C'est la plus grande poutre métallique jamais construite au monde jusqu'à présent. La durée de construction de l'ouvrage a été de 36 mois et 500 ouvriers étaient présents sur le chantier en période de pointe.

Le viaduc de Millau est un bel exemple de l'évolution récente des ponts à haubans. Il existe, en effet, peu d'exemples de pont haubané à travées multiples qui constituent une solution très élégante pour le franchissement des grandes vallées ou des estuaires.

Ce type d'ouvrage nécessite des études particulières. Par exemple, quand une travée quelconque est chargée par la circulation routière, la tension dans les haubans augmente, créant ainsi une flexion importante dans les deux pylônes situés de part et d'autre de cette travée. Ceci amène un soulèvement des deux travées adjacentes car il n'existe pas d'ancrage par les haubans de retenue habituels, à l'arrière, au niveau d'une culée ou d'une pile, comme dans les ouvrages haubanés classiques à grande travée. Bien sûr, la hauteur et l'élanement des piles amplifient ce phénomène.

Il est donc nécessaire de donner une rigidité interne à l'ouvrage et ceci est obtenu par le pseudo encastrement des pylônes sur les piles, ces dernières étant dédoublées en partie supérieure et les pylônes possédant une forme de Y renversé. En d'autres termes, les tours sont construites «en continu».

L'altitude de l'ouvrage est de 670 mètres dans une région où des problèmes de gel et de salage existent en hiver. Sa hauteur maximale est de 343 mètres par rapport au lit de la rivière.

Au niveau du profil en long, la distance entre le Tarn et la culée sud est de 1752 mètres alors qu'elle n'est que de 708 mètres jusqu'à la culée nord. Le viaduc est en légère courbe et il possède une pente de 3 % (74 mètres de dénivelée entre le Nord - plus bas - et le Sud).

Le profil en travers (figure 2) comporte deux chaussées à deux voies de 3,50 mètres avec une bande d'arrêt d'urgence de 3,0 mètres et une bande dérasée de 1 mètre du côté du terre plein central, lui-même de 4,45 mètres de largeur. La largeur totale est égale à 27,75 mètres.

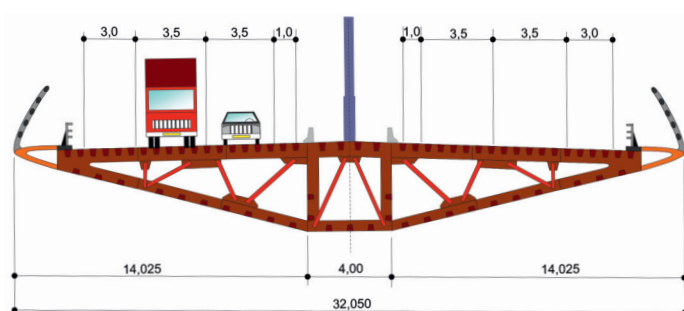


Figure 2 – Dimensions transversales de l'ouvrage.

L'ouvrage comprend 7 piles en béton dont la plus haute, P2 (figure 3) atteint 245 mètres sans son pylône. Elle a pulvérisé le record du monde de plus de 60 mètres. La plus petite mesure tout de même plus de 77 mètres. Pour être plus précis, selon le relief, les hauteurs des piles sont respectivement :

- pile P1 : 94,50 mètres,
- pile P2 : 244,96 mètres,
- pile P3 : 221,05 mètres,
- pile P4 : 144,21 mètres,
- pile P5 : 136,42 mètres,
- pile P6 : 111,94 mètres,
- pile P7 : 77,56 mètres.

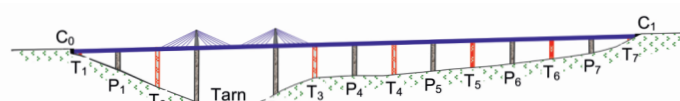


Figure 3 – Repérage des piles et des palées provisoires.

Les piles possèdent les dimensions suivantes :

- dans la direction longitudinale : 16 à 17 mètres,
- dans la direction transversale : variable de 10 mètres en tête à 27 mètres en pied pour la pile la plus haute (photo n°2),
- les piles sont dédoublées sur les 90 mètres supérieurs où une précontrainte est installée à l'aide de 8 câbles 19T15 (19 torons\* de 15 mm de diamètre en acier à haute résistance).

Les piles sont dédoublées pour posséder une flexibilité compatible avec la dilatation thermique de l'ouvrage qui peut atteindre 0,60 mètre à chaque extrémité.



Photo n°3 – Vue des piles P1 et P2 et de la culée nord.  
(Photo J.-P. Muzeau)

L'ouvrage est conçu pour résister à des vents de 200 km/h. Si cette vitesse apparaît importante, c'est qu'au sol généralement, la végétation et les obstacles freinent le vent. A cette altitude, les vitesses sont beaucoup plus importantes. Pendant les travaux, la vitesse maximale enregistrée a avoisiné les 135 km/h. Des essais préalables en soufflerie ont été réalisés au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) de Nantes pour évaluer notamment le comportement aérodynamique de l'ouvrage. Ils ont été complétés par des calculs en phase de construction et de service réalisés par le Bureau Greisch de Liège en Belgique.

## 2. LE TABLIER ET LES PYLÔNES MÉTALLIQUES.

### a. Le concept

Le tablier, entièrement métallique, est constitué d'un caisson central rectangulaire où viennent s'ancrer les haubans (figure 4 et photo n°3). Le caisson général est ensuite réalisé avec des panneaux de tôle raidis par des augets. La semelle supérieure, portant la couche de roulement, est dimensionnée pour reprendre les charges locales des essieux des véhicules. L'intérieur du caisson est protégé par un système de déshumidification, plus économique qu'un revêtement anticorrosion. L'extérieur du caisson est protégé par un revêtement classique qui donne la couleur finale du tablier.

\* Torons : produits constitués de fils enroulés les uns autour des autres.

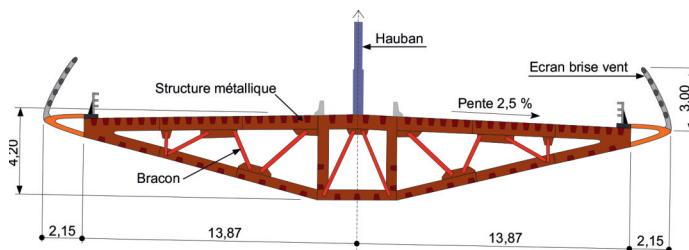


Figure 3 – Repérage des piles et des palées provisoires.

Pour toutes ces opérations, l'assemblage des éléments du tablier a été effectué dans des halles situées sur des plates-formes, derrière chaque culée.

La chaussée en asphalté doit suivre la dilatation du tablier. Son épaisseur est de 6,8 cm.

Le viaduc de Millau démontre également l'intérêt des pylônes en acier du point de vue de la rapidité de construction. Les deux pylônes encadrant la travée au-dessus du Tarn ont permis de retenir les porte-à-faux lors du lancement alors que les autres ont été amenés en place par ripage sur le tablier, puis relevés et assemblés par soudage au droit des piles. Les pylônes sont encastrés dans le tablier. Ils possèdent une rigidité suffisante pour limiter la flexibilité de l'ensemble du viaduc.



Photo n°3 – Vue dans l'axe du tablier. (Photo J.-P. Muzeau)

### b. Les aciers utilisés

La fabrication du tablier métallique a nécessité l'utilisation d'aciers HLE (à haute limite d'élasticité) pour les parties les plus délicates. En effet, le tablier est constitué par un caisson de forme aérodynamique fermé à platelage orthotrope raidi par des augets. Quant aux pylônes, ils sont en caissons rectangulaires entièrement métalliques. Tous comportent des pièces très fortement sollicitées comme les âmes du tablier soumises à des réactions de plusieurs milliers de tonnes au lancement ou les pièces d'ancrage des haubans, aussi bien dans le tablier que dans les pylônes. Il a été fait appel à des aciers de nuance S460 (460 MPa de limite d'élasticité). Sur chantier, leur utilisation ne nécessite pas de préchauffage avant le soudage.

## 3. LA MÉTHODE DE CONSTRUCTION DE L'OUVRAGE

Le viaduc de Millau aura été pour les concepteurs l'un des ouvrages dont les méthodes de construction ont été les plus difficiles à mettre au point. En effet le site montagneux rendait difficile toute construction du tablier à partir du sol sans perturber fortement la circulation locale par les engins de chantier. Par ailleurs le maître d'ouvrage s'était engagé

en matière de protections environnementales à limiter les nuisances de chantier. D'où la solution logique de lancement à partir des deux extrémités qui a été retenue par le constructeur (photo n°4).



Photo n°4 – Vue des deux extrémités pendant le lancement. (Photo J.-P. Muzeau)



Photo n°5 – Palée provisoire T4 en cours de montage. (Photo J.-P. Muzeau)

Des palées provisoires (photo n°4) étaient prévues entre chaque pile pour recouper les travées de 342 mètres sauf pour la travée la plus profonde, au-dessus du Tarn, où a eu lieu la jonction.

Ces palées provisoires, de couleur rouge, étaient visibles à des kilomètres à la ronde. Elles ont été conçues pour soutenir, en association avec les piles, le poids total du tablier pendant le lancement de l'ouvrage. La plus haute de ces palées provisoires mesurait 173 mètres. Bien sûr, il a fallu réaliser des massifs de fondations pour les supporter.

Ces éléments étaient mis en place comme des tours de grue. Les palées provisoires étaient assemblées dans une cage de télescopage, une structure métallique de 36 mètres de haut (photo n°5), munie d'un système hydraulique de levage associé à une crémaillère. Un tronçon de palée était assemblé puis hissé dans la cage. Les vérins, qui pouvaient autoriser une poussée de 2 400 tonnes, possédaient une course de 1 mètre. Une fois leur effort de poussée accompli, les vérins étaient hissés à leur tour dans la cage et étaient associés à la crémaillère pour permettre de lever la structure suffisamment pour pouvoir assembler, sous lui, le tronçon suivant. Les vérins étaient redescendus à l'aide d'une grue et repositionnés sous le nouveau tronçon. Il ne restait plus qu'à recommencer l'opération jusqu'à ce que la hauteur prévue soit atteinte.

Après clavage du pont, au dessus du Tarn, puis mise en place et réglage définitif des haubans, les palées provisoires étaient destinées à être démontées. La photo n°6 montre l'ouvrage dans cette phase où l'une des palées est en voie de démontage.



Photo n°6 - Démontage de la palée provisoire T3 après mise en place des haubans définitifs. (Photo J.-P. Muzeau)

Pour limiter la flèche aux extrémités de chaque porte-à-faux, le tablier a été haubané à chaque pylône d'about (photos n°7 et 8). Le tablier était poussé avec des équipements de lancement appelés translateurs (figure 5, photos n°9 et 10). Il était soulevé sur chaque appui par des vérins verticaux, puis poussé par des vérins horizontaux qui faisaient avancer le tablier par pas de 60 cm. La cinématique du lancement est décrite au § 7.

Ces opérations étaient synchronisées sur tous les appuis en reliant les vérins à un ordinateur.

Ce système de lancement n'induisait aucun effort longitudinal en tête des palées ou des piles, contrairement à un système de glissement classique sur patins.

Le chemin total parcouru lors de chaque phase de lancement correspondait à la distance entre une pile et une palée provisoire. A l'arrêt, l'extrémité de l'ouvrage reposait sur un type d'appui (pile ou palée provisoire) et le pylône sur un autre, comme on peut le voir sur les photos n°7 et 8.

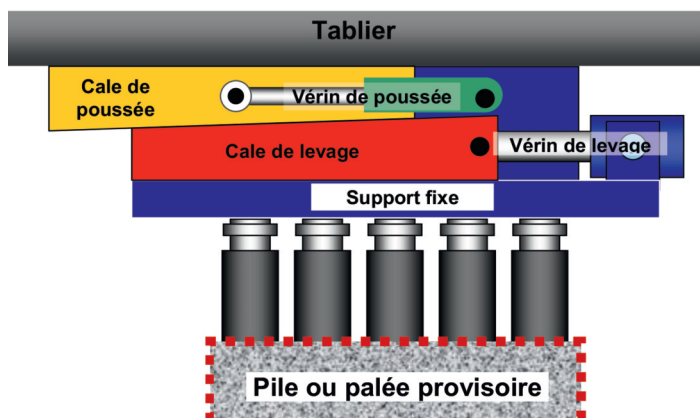


Figure 5 - Translateur.



Photo n°7 - Phase de lancement où un pylône se trouve sur une pile. (Photo J.-P. Muzeau)



Photo n°8 - Phase où un pylône se trouve sur un appui provisoire. (Photo J.-P. Muzeau)



Photo n°9 - Translateur en attente, (Photo J.-P. Muzeau)



Photo n°10 - Translateur sur une pile provisoire (Photo J.-P. Muzeau)

Les pylônes (figure 6) en forme de Y renversé, atteignent 90 mètres de hauteur au dessus du tablier. Les jambes dédoublées mesurent 38 mètres. Ils ont été assemblés sur les rives et transportés horizontalement sur le tablier avec une remorque spéciale munie de nombreux essieux, puis relevés au droit des piles. Pour ce relevage, l'entreprise a conçu un équipement particulier qui permettait de basculer un pylône en soulevant sa partie supérieure avec des vérins avaleurs de câbles.

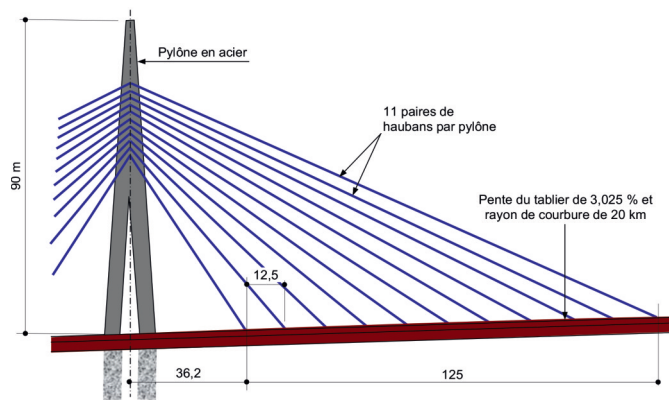


Figure 6 – Détail d'un pylône et des haubans définitifs.

En situation définitive, les pylônes sont munis de 22 haubans, onze de chaque côté disposés en demi-éventail et espacés de 12,51 mètres, soit un total de 154 haubans pour les 7 pylônes. La tension maximale dans les haubans est de l'ordre de 900 tonnes pour une capacité maximale de 2000 tonnes. Leur diamètre est 200 mm. Ils sont constitués de 55 à 91 torons en acier galvanisé.

#### 4. LA FABRICATION DE L'OSSATURE MÉTALLIQUE

Alors que les travaux des fondations démarrent sur le chantier début 2002, la fabrication des éléments du tablier métallique commencent aussi à l'usine d'Eiffel C.M à Lauterbourg, en Alsace, non loin de Strasbourg. 36000 tonnes d'acier devaient être livrés sur le chantier, soit l'équivalent en poids d'une année de production de ponts métalliques en France (figure 7).

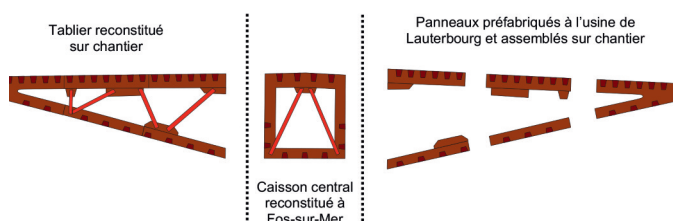


Figure 7 – Éléments du tablier

Le caisson est constitué de tôles d'épaisseur 12 et 14 mm pour la plus grande longueur avec des augets d'épaisseur 6 et 8 mm. Les panneaux raidis de 22 mètres de long en moyenne ont été fabriqués avec des machines de soudage automatiques et un robot de soudage. Ils ont été expédiés sur le chantier par camion. Les éléments du caisson central transitaient par l'usine de Fos-sur-Mer pour y être assemblés avant d'arriver sur le site également par camion.

Les éléments des pylônes sont, quant à eux, fabriqués dans l'usine Munch d'Eiffel à Nancy et assemblés complètement sur le site.

#### 5. LANÇAGE

Le tablier métallique a été mis en place par lancement sur ses appuis provisoires et définitifs au fur et à mesure de la construction des tronçons qui étaient assemblés par phases successives au droit des plates-formes aménagées derrière chacune des culées.

Toutes les grandes travées, exceptée la travée P2-P3 au dessus du Tarn, comportaient un appui provisoire à mi-travée. Pour les travées de rive, les appuis provisoires étaient implantés à 36 mètres de chaque culée, c'est-à-dire à 168 mètres des piles P1 et P7 (figure 3).

Pour franchir la distance de 171 mètres entre appuis de lancement, les 342 premiers mètres de la partie de tablier lancée étaient munis du pylône définitif (P2 côté nord et P3 côté sud) et de la moitié des haubans définitifs (2' 6 haubans) en constituant ainsi un haubanage provisoire du tablier. La figure 8 décompose la cinématique des opérations de lancement.

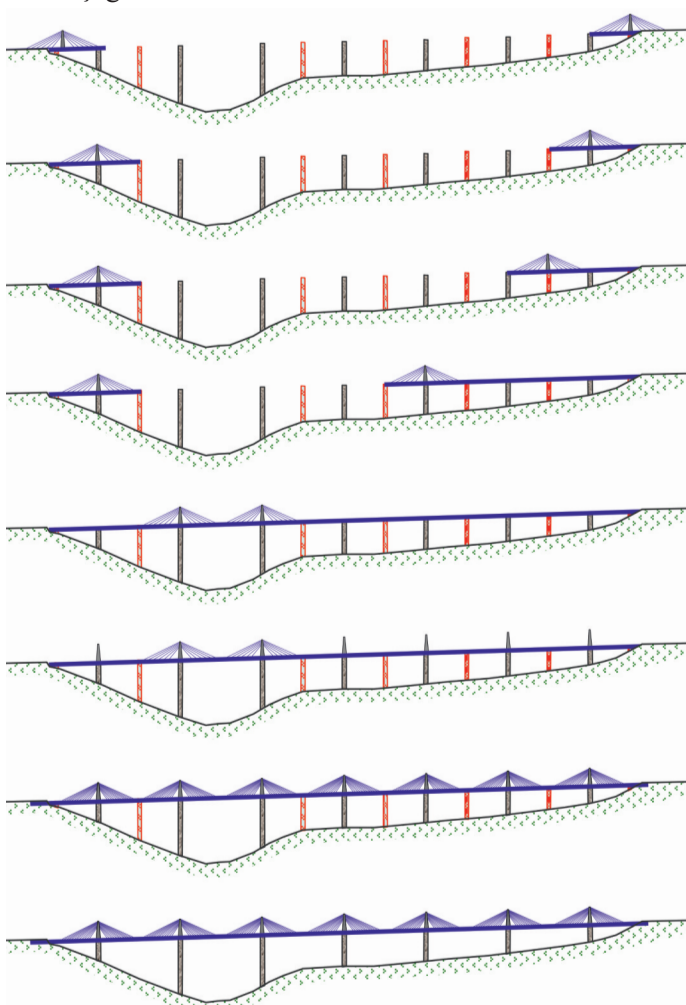


Figure 7 – Éléments du tablier

Le lancement du pont a nécessité la mise au point d'un système spécial pour éviter de créer des réactions horizontales trop importantes dans les piles. La cinématique de la translation était la suivante :

En phase initiale, le tablier reposait sur le support fixe (en bleu foncé sur les figures) puis le vérin de la cale de levage (en rouge sur les figures) était actionné (figure 9). La cale de poussée (en jaune sur les figures) venait alors en contact avec le tablier qui était soulevé de 20 millimètres. Dans la seconde phase (figure 10), les vérins de la cale de poussée se rétractaient entraînant ainsi le tablier dans



une translation de 60 centimètres. Ce déplacement durait environ 4 minutes. La cale rouge reprenait ensuite sa position initiale par rétraction du vérin de levage (figure 11). Ceci conduisait à l'abaissement du tablier qui venait reposer à nouveau sur le support fixe. La cale de poussée pouvait alors reprendre sa position initiale (figure 12). Un autre déplacement était alors être initié par une nouvelle action sur le vérin de levage (figure 13). Ces actions se répétaient jusqu'à ce que le déplacement total corresponde à la distance entre une pile et un appui provisoire. Il fallait 3 jours pour effectuer un lancement complet de 171 mètres.

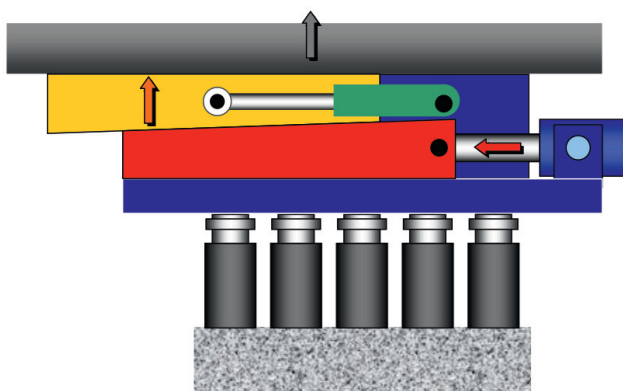


Figure 9 – Lancement. Étape 1. (photo)

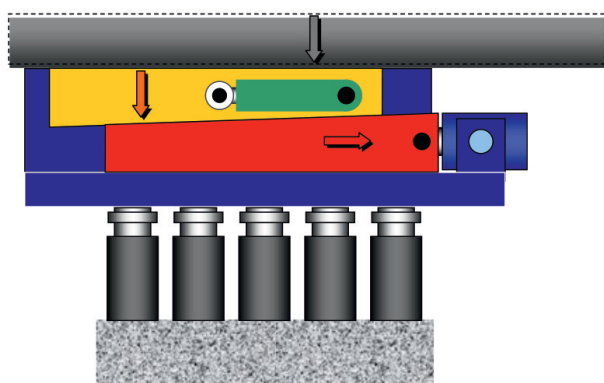


Figure 10 – Lancement. Étape 2.

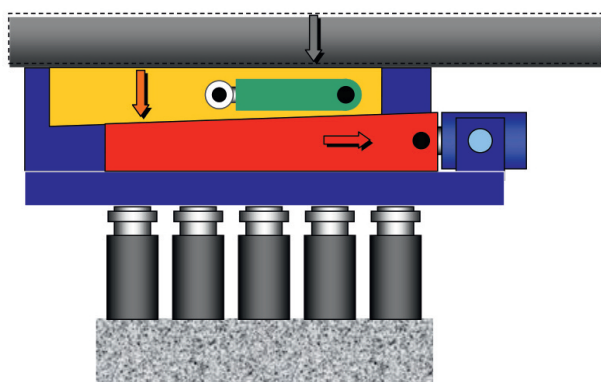


Figure 11 – Lancement. Étape 3.

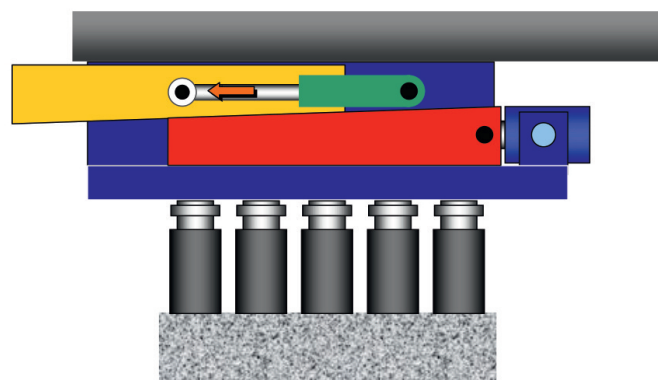


Figure 12 – Lancement. Étape 4.

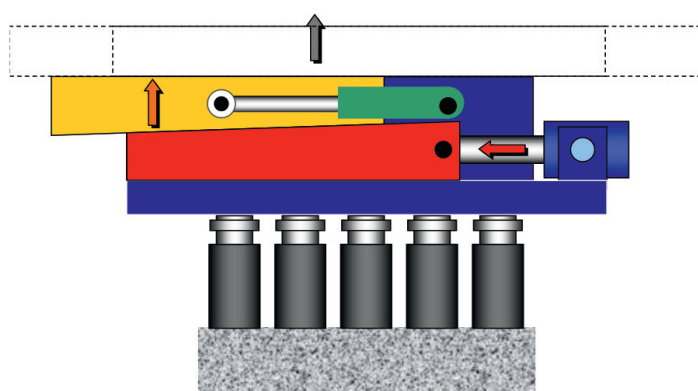


Figure 13 – Lancement. Étape 5.

Ce système de lancement est comparable à une griffe d'entraînement<sup>2</sup> du tissu sur une machine à coudre.

Tout le système hydraulique pour la poussée du tablier était commandé par un ordinateur de contrôle, mais chaque système possédait une commande locale pour effectuer les mouvements des patins de façon indépendante et contrôler ainsi la hauteur et l'angle du tablier. Et, sophistication extrême, le système de translateurs permettait de faire avancer, mais aussi reculer le tablier, en cas de mauvais calage.

C'est un total de 64 translateurs (photo n°11) qui ont permis de lancer l'ouvrage et il a fallu 8 lancements pour amener le tablier en position définitive (photos n°12 et 13). Pour des raisons de sécurité, le lancement ne pouvait pas avoir lieu si le vent dépassait 75 km/h. Les relevés et les prévisions météo étaient donc de grande importance.



Photo n°11 – Translateurs sur une palée provisoire (Photo J.-P. Muzeau)

<sup>2</sup> Nom communiqué à l'auteur par trois membres de l'ADASTA ayant assisté à la conférence. Je les remercie au passage.



Photo n°12 – L'ouvrage avant le dernier lancement. (Photo J.-P. Muzeau)



Photo n°13 – L'ouvrage après clavage des deux tronçons. (Photo J.-P. Muzeau)

L'extrémité avant du porte-à-faux était également munie d'un avant- bec (photo n°14) pour faciliter l'accostage sur les différents appuis, en particulier sur P1, T2, T6 et P7 où un relèvement était à effectuer du fait de la différence de niveau de 4,80 mètres entre la plate-forme de montage à l'arrière des culées et la hauteur définitive des piles.

La stabilité du tablier en phases de lancement, vis-à-vis des effets aérodynamiques du vent était assurée naturellement par la section du tablier en forme de caisson profilé.



Photo n°14 – Avant bec (Photo J.-P. Muzeau)

## 6. LA CONCESSION

Maître d'ouvrage et concessionnaire de l'équipement pour une durée de 75 ans (avec une garantie de 120 ans), le groupe Eiffage a investi 400 M€ dans ce projet.

Si l'autoroute A75 est gratuite sur l'ensemble de son parcours, un péage est exigé pour emprunter le viaduc de Millau. En 2004, pour les voitures, il coûtait 4,90 € en temps normal et 6,50 € en période de vacances. En 2018, il coûte respectivement 8,30 € et 10,40 €.

L'estimation de la fréquentation est de 12 000 véhicules/jour dès l'ouverture pour atteindre 30 000 véhicules/jour en pleine saison dans une quinzaine d'années.

## CONCLUSION

Bien que la mise en circulation soit initialement prévue le 10 janvier 2005, c'est le 14 décembre 2004 que Jacques Chirac, Président de la République Française, a inauguré l'ouvrage, c'est-à-dire trois ans, jour pour jour, après la cérémonie de la pose de la première pierre.

La mise en service effective pour les premières voitures a eu lieu deux jours après, le 16 décembre 2004, juste avant la période des vacances de Noël permettant ainsi à la Société Eiffage de commencer à rentabiliser l'ouvrage.

Ce viaduc, hors normes par sa hauteur, est un symbole pour la ville de Millau et pour toute la technologie du Génie Civil en ce début du nouveau millénaire (photo n°15). L'acier qui a toujours su répondre au défi des grands ouvrages et qui ont marqué l'histoire de la construction, démontre ici de nouveau ses possibilités en tant que matériau d'avenir.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] HOORPAH, Wassodev

*Le viaduc de Millau* - Conception de l'ouvrage et démarrage des travaux. Journées Sidérurgiques Internationales JIS, Paris, 12 décembre 2001, paru dans les Cahiers de l'APK, n°31, octobre 2002.

[2] OTUA – *Bulletin Ponts Métalliques*, n°23, 2004.



Photo n°15 – Le viaduc en service. (Photo J.-P. Muzeau)



# LA BACTERIORHODOPSINE, RHODOPSINE PARMIS LES AUTRES

**Michel GENDRAUD**

*Agrégé de Physiologie-Biochimie*

*Professeur honoraire de Physiologie végétale de l'Université Blaise Pascal*

*Membre de l'ADASTA*

## Introduction

En 1971, deux biochimistes allemands, Dieter Oesterhelt et Walter Stoeckenius, publièrent dans Nature New Biology, sous forme d'une lettre à l'éditeur, l'article intitulé «Rhodopsinlike Protéin from the Purple Membrane of *Halobacterium halobium* ». Ils montraient que la bactérie pourpre des milieux hyper-salés (Mer Morte, Grand Lac Salé...) devait sa couleur à cette protéine membranaire, de la superfamille des rhodopsines (du grec ancien ῥόδον, *rhodon*, « rose » et de ὄψις, *opsis*, « vue »).. Cette révélation fit grand bruit dans le monde scientifique puisque les rhodopsines alors connues étaient les rhodopsines rétinienne responsables de la vision crépusculaire. Cette protéine fut nommée bactériorhodopsine et porte toujours ce nom, bien que depuis 1977 *Halobacterium* ne soit plus une bactérie mais une archée, sans changer de nom pour autant (figure 1).

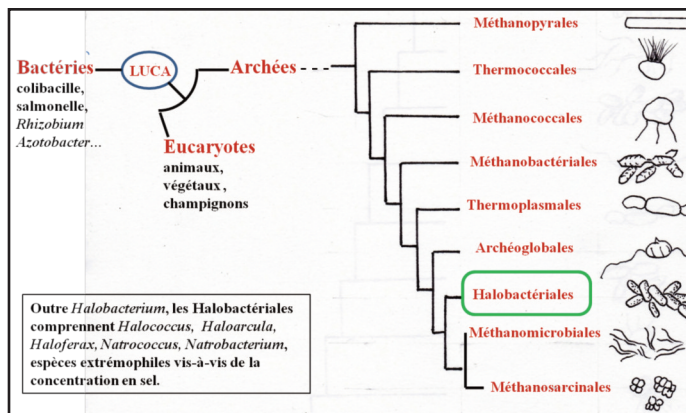


Figure 1.- Place (cadre vert) des Halobactériales avec un dessin de cellules en bâtonnets de *Halobacterium* parmi les êtres vivants. Les autres archées évoquées ici sont méthanogènes ou thermophiles extrêmes.

## La bactériorhodopsine, sa structure, son fonctionnement

La bactériorhodopsine est une petite protéine de 26 kDa constituée d'une chaîne de 248 acides aminés et d'un chromophore, le rétinol, lié à la lysine 216 par une base de Schiff protonée. Cette définition s'éclaircira après quelques rappels.

Une protéine (figure 2) est un polycondensat d'acides aminés, c'est-à-dire une chaîne de ces entités liées entre elles, après élimination d'eau, par des liaisons peptidiques. Dans la chaîne, les acides aminés sont numérotés depuis l'extrémité amine libre jusqu'à l'extrémité carboxyle libre. La chaîne se replie spontanément dans la configuration spatiale la plus stable, ce qui entraîne des structures en spirale, dites hélices  $\alpha$ , et implique que des résidus d'acides aminés aux numéros très éloignés se retrouvent parfois proches dans l'espace. La chaîne de bactériorhodopsine, comme toutes les opsines, a une structure en sept hélices  $\alpha$  transmembranaires (figure 3). *In situ* dans la membrane, ces chaînes s'associent en un homotrimère à symétrie cylindrique.

Le chromophore (du grec ancien *chrôma*, « couleur » et *phoros*, « qui porte ») est le rétinol, trouvé dans la rétine sous forme aldéhyde, d'où sa terminaison en *al*. Son précurseur métabolique est un carotène, mais le rétinol est aussi le produit d'oxydation du rétinol, alcool primaire qui n'est autre que la vitamine A.

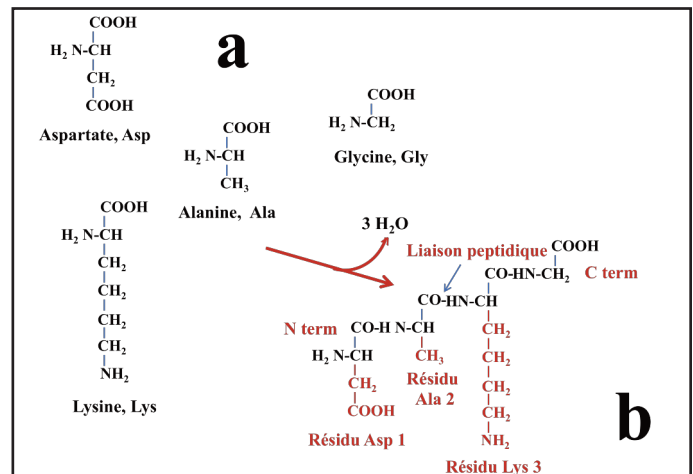


Figure 2.- Exemple de polycondensation d'acides aminés conduisant à une protéine; a, acides aminés libres, leur nom et l'abréviation couramment utilisée ; b, polycondensat des 4 acides aminés précédents qui met en évidence la liaison peptidique, les résidus d'acides aminés, leur numérotation et les extrémités amine libre (N term) et carboxyle libre (C term). Le terme aspartate est préféré à celui d'acide aspartique même quand la molécule est représentée sous forme non ionisée, car dans la cellule l'ionisation existe sans pour autant être toujours connue avec précision.

De par sa structure, ses doubles liaisons conjuguées (figure 4), le rétinol absorbe la lumière visible, il est donc coloré (orangé à l'état libre) et mérite ainsi le nom de chromophore.

Une base de Schiff (du chimiste allemand Hugo Schiff) contient une double liaison C=N. Celle de la bactériorhodopsine s'établit par élimination d'eau entre la fonction aldéhyde du rétinol et la fonction amine du résidu lysine 216 (figure 4). Comme dans d'autres édifices moléculaires, l'ammoniaque par exemple, l'azote peut devenir quaternaire en acceptant un ion  $H^+$ , un proton. Par l'environnement immédiat et la liaison à la lysine, le pic d'absorption de la lumière par le rétinol de la bactériorhodopsine est décalé par rapport au rétinol libre ; pourpre, il absorbe dans le vert jaune, la couleur complémentaire.

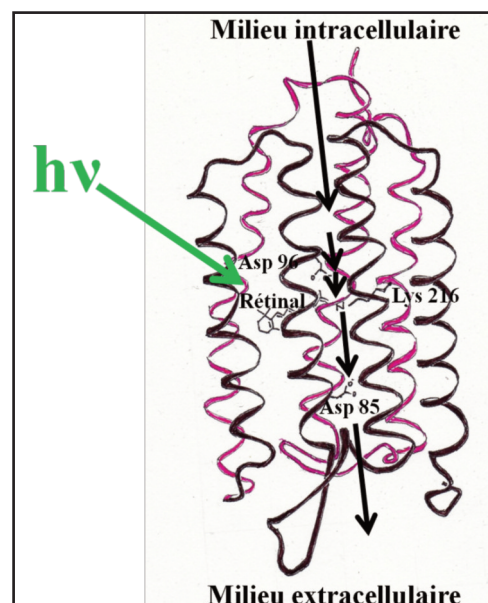


Figure 3.- Une illustration de la structure et du fonctionnement de la bactériorhodopsine. Les 7 hélices de l'opsine sont représentées ainsi que la position des points de passage des protons et leur trajet (flèches noires)

Il s'avéra que la bactériorhodopsine est un canal ionique transmembranaire capable de transférer des ions  $H^+$  à travers la membrane sous l'effet de la lumière, c'est une pompe à  $H^+$ , une pompe à protons. La seconde appellation est la plus utilisée, tout en sachant que, en milieu aqueux, le proton est pris en charge par une molécule d'eau sous la forme d'ion hydronium  $H_3O^+$ .

Dans les années 1990, Richard Henderson, biologiste britannique, prix Nobel de Chimie 2017 avec Jacques Dubochet et Joachim Frank, ayant déterminé la structure fine de la bactériorhodopsine par cryomicroscopie électronique, écrivait dans le Journal of Molecular Biology: «En particulier, la structure suggère que les changements de pK de la base de Schiff doivent être le moyen par lequel l'énergie lumineuse est convertie en pression de pompage des protons dans le canal. L'aspartate 96 est sur le chemin entre le cytoplasme et la base de Schiff et l'aspartate 85 est sur le chemin entre la base de Schiff et la surface extracellulaire».

Pour préciser son propos, il convient d'ajouter que le pK mesure l'affinité d'un édifice moléculaire pour le proton. Dans le cas présent, plus le pK de déprotonation est grand plus grande est l'affinité de l'édifice pour le proton.

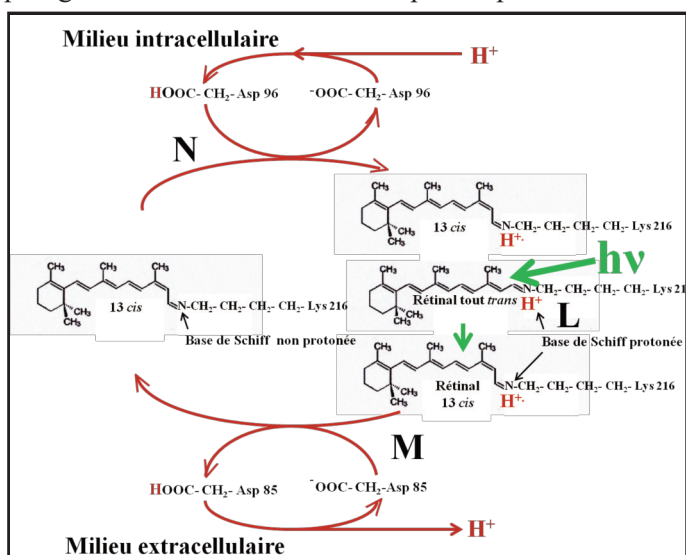


Figure 4.- Fonctionnement de la bactériorhodopsine : représentation des sauts des protons d'une étape à l'autre entretenus par l'isomérisation du rétinol après absorption de l'énergie lumineuse, hv. L, M, N, états du photo-cycle au niveau de la base de Schiff, sans préjuger de leur impact dans la structure spatiale de la bactériorhodopsine.

Actuellement, ce mécanisme, dénommé photo-cycle, est présenté comme suit (figure 4):

- **Etat L** : l'excitation de la bactériorhodopsine par un photon à 568 nm de longueur d'onde déclenche le passage de la forme tout trans protonée à la forme 13 cis protonée du rétinol,

- **Etat M** : le rétinol 13 cis transfère le proton de sa base de Schiff au carboxylate du résidu aspartate 85,

- **Etat N** : le rétinol 13 cis re-protonne sa base de Schiff par un proton pris au carboxyle du résidu aspartate 96, qui avait tiré ce proton de l'intérieur de la cellule. En même temps, le proton de l'aspartate 85 est expulsé vers l'extérieur de la cellule.

- le rétinol re-protoné retrouve sa configuration tout-trans et la protéine, dont les charges électriques internes se sont rééquilibrées, reprend sa conformation initiale en passant par un **état O**. Chaque cycle dure *in vivo* de 10 à 20 ms.

Vu autrement, un proton pris dans un des deux compartiments que sépare la membrane fait dans la protéine une série de «rebonds» pour atteindre l'autre compartiment. Ces étapes sont l'aspartate 96, la base de Schiff, l'aspartate 85 (figures 3 et 4). Le mouvement est entretenu par la lumière vert jaune qui, en isomérisant le rétinol de la base de Schiff, abaisse son pK, diminue son affinité pour le proton au point de la dé-protoner. Bien d'autres études ont été faites concernant le

fonctionnement de la bactériorhodopsine, les dernières en date mettent en jeu le laser femtoseconde, elles sortent du cadre de cet article.

## La bactériorhodopsine et la théorie chimiosmotique

Depuis 1961, la théorie chimiosmotique formulée par Peter Mitchell (Prix Nobel de Chimie 1978) postulait que «l'intermédiaire de haute énergie» dans les processus cellulaires de transduction énergétique producteurs d'ATP, comme la respiration et la photosynthèse est un gradient de concentration de  $H^+$  transmembranaire. Jusque là, ce rôle était attribué à un hypothétique thioester qui, bien évidemment, ne fut jamais découvert. L'ATP, adénosine triphosphate est un composé biologique ubiquitaire riche en énergie, elle est considérée comme la « devise énergétique du vivant».

Or, la respiration et la photosynthèse sont le fait d'organites, la mitochondrie et le chloroplaste, dont les membranes concernées par un gradient de  $H^+$  convertible en énergie chimique, en ATP, présentent un haut degré de sophistication. La bactériorhodopsine était un exemple simplissime de pompe à protons. Walter Stoeckenius s'associa alors à Ephraïm Racker, qui étudiait l'ATP synthase mitochondriale. Par sonication, ils préparèrent des liposomes, vésicules en bicouche de phospholipides de soja, dans lesquelles ils insérèrent la bactériorhodopsine de l'archée *Halobium* et l'ATP synthase de cœur de boeuf (figure 5). Le succès de l'expérience reposait sur le « bon vouloir » des deux protéines à adopter l'orientation correcte au moment de leur insertion dans la membrane liposomiale. C'est ce qui arriva ! Après éclaircissement, des ions  $H^+$  étaient pompés à l'intérieur des liposomes et en présence d'ADP et de  $P_i$  dans le milieu, de l'ATP était synthétisé ! Racker et Stoeckenius publièrent ces résultats en 1974. La théorie chimiosmotique est aujourd'hui très largement établie et on sait que l'ATP synthase réalise cette interconversion énergétique, en dissipant le gradient de manière couplée à la synthèse d'ATP chez les trois domaines du vivant, bactéries, archées, eucaryotes.

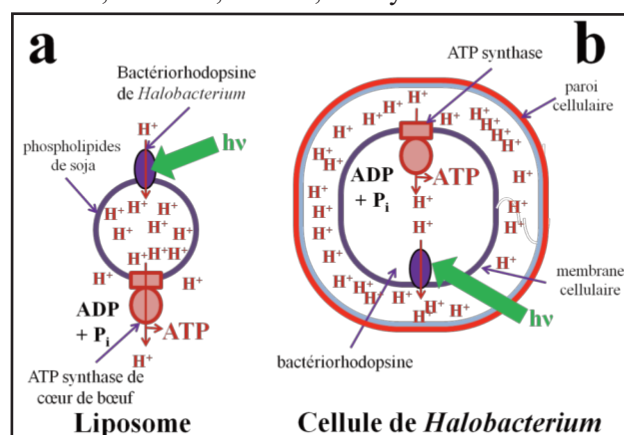


Figure 5.- a, Schématisation de l'expérience de Stoeckenius et Racker ; b, rôle de la bactériorhodopsine en place dans la membrane de l'archée *Halobacterium* : excréter des protons qui, par la force proton motrice ainsi créée, rentreront via l'ATP synthase en permettant la synthèse d'ATP.

## La bactériorhodopsine et la bioénergétique

Naturellement incluse dans une membrane, la bactériorhodopsine est donc capable d'utiliser l'énergie lumineuse pour assurer le transfert unidirectionnel d'ions  $H^+$  entre les deux compartiments séparés par cette membrane. Elle peut le faire jusqu'au point où l'énergie représentée par l'accumulation différentielle d'ions  $H^+$  égalera, en valeur absolue, l'énergie lumineuse incidente. La variation d'enthalpie libre correspondant à ce transfert obéit à l'équation de Nernst (figure 6), elle dépend de la différence de potentiel électrique  $\Delta\psi$  entre les deux compartiments, et de la différence transmembranaire de concentration en ions  $H^+$ ,  $\Delta pH$ . La force proton motrice,  $\Delta p = \Delta\psi - 0,06 \Delta pH$ , est cette même variation

d'enthalpie libre, exprimée en volts, suite à la simplification de l'équation initiale (division par F, remplacement de R et T par leurs valeurs, concentrations de H<sup>+</sup> exprimées en pH).

Comme l'indique la figure 6, si aller d'un compartiment 1 à un compartiment 2, dans le cas le plus simple où Δψ est négligeable, correspond à une différence de pH de 4 unités, la force proton motrice sera de -0,24V. Elle est négative, exergonique, et le transfert envisagé est possible.

Le transfert inverse est endergonique, impossible à moins qu'il ne soit couplé à un apport extérieur d'énergie comme le fait la bactériorhodopsine avec la lumière.

La figure 6 montre une analogie hydraulique avec cette situation énergétique, le pompage turbinage. Pour cela, il faut deux lacs voisins, mais à une altitude différente, ce sont les compartiments 1 et 2. La déclivité entre eux correspond à la membrane. Le pompage prend l'eau du lac d'en-bas pour la déverser dans le lac d'en-haut en utilisant une énergie venue d'ailleurs : c'est ce que fait la bactériorhodopsine avec l'énergie lumineuse. Le stockage de l'eau dans le lac d'en-haut est un stockage d'énergie puisque, retournant au lac d'en-bas, elle fera tourner les turbines d'une centrale hydroélectrique, c'est le turbinage, ce que font les protons retournant au compartiment 2 en faisant tourner l'ATP synthase. Faire tourner l'ATP synthase n'est pas une métaphore, cette machine nanométrique entièrement protéique tourne comme une centrale. Un rotor, enchâssé dans la membrane est entraîné par le courant d'ions H<sup>+</sup> ; ce rotor est solidaire d'un axe dont la rotation déforme le stator, extérieur à la membrane, activant alternativement chacun des 3 sites catalytiques de sa surface. Après un tour de rotor, 3 ATP ont été synthétisés.

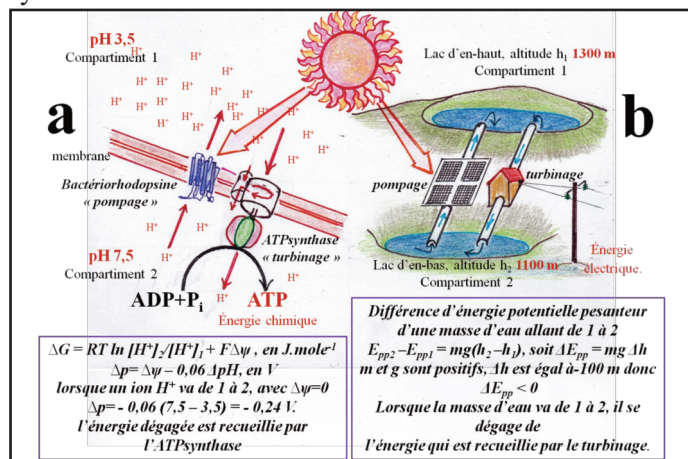


Figure 6. - Analogie entre l'énergétique membranaire prévalant au couplage des activités bactériorhodopsine et ATP synthase (a) et le pompage-turbinage entre deux plans d'eau séparés par une déclivité (b)..

## La bactériorhodopsine et la nanoinformatique

Depuis quelques années, cette protéine sensible à la lumière intéresse les informaticiens qui voient en elle un fort potentiel de stockage d'information, avec des 0 et des 1 de taille moléculaire. Mais le photo-cycle de la bactériorhodopsine dure entre 10 et 20 millisecondes et ne s'arrête jamais (figure 7). Pour stocker des données, il faut des états stables. Pour cela, la protéine doit se trouver dans un état particulier, l'état Q qui ne fait pas partie du photo-cycle habituel et qui n'est pas facile à obtenir. Une archée voisine de *Halobacterium halobium*, *Halobacterium salinarum* a été modifiée génétiquement pour produire une bactériorhodopsine passant plus facilement sous la forme Q. Il suffit d'illuminer la forme O en lumière rouge pour que O devienne P puis Q, stable. La lumière bleue ramène la bactériorhodopsine dans son état initial bR. Il est donc possible de coder les chiffres binaires 0 et 1 par Q et bR et de stocker l'information (figure 7).

Pour mettre en oeuvre ce stockage, des mémoires tridi-

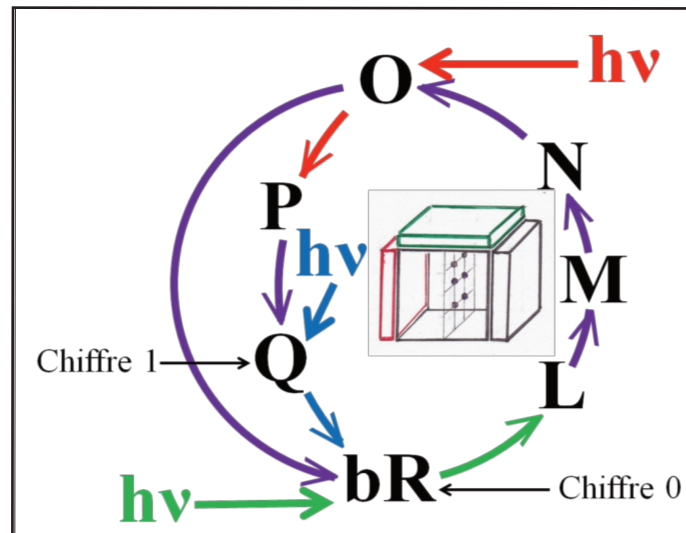


Figure 7.- Principe du stockage d'information par la bactériorhodopsine. Un flash de lumière vert jaune absorbé par la bactériorhodopsine dans son état initial bR déclenche une cascade d'états L, M, N, O et retour à bR, à moins que l'état O ne reçoive un flash de lumière rouge, auquel cas la bactériorhodopsine rejoindra l'état P puis Q stable pendant des mois. Le flash rouge porte l'information des 1, donc les formes Q représentent les 1. Les formes O qui n'ont pas reçu de rouge reviennent à l'état bR, chiffre 0. La lecture se fait sous lumière rouge très faible absorbée par bR et non par Q. Un flash de lumière bleu renvoie les formes Q à l'état bR. Au centre du cycle, un cube de bactériorhodopsine pour stockage d'information est schématisé entouré d'un réseau laser rouge (à gauche), d'un réseau laser vert jaune (au dessus) et d'un détecteur (à droite).

mensionnelles expérimentales ont été mises au point, à partir d'un cube de molécules de bactériorhodopsine placées entre deux réseaux de lasers perpendiculaires l'un à l'autre et un détecteur placé derrière le cube. Un cube de quelques centimètres cubes pourrait stocker jusqu'à 50 To. Une difficulté est d'obtenir à bas coût des quantités notables de bactériorhodopsine. L'Université de technologie chimique Dimitri Mendéléiev de Moscou a programmé des recherches dans ce sens.

## D'autres rhodopsines et la connaissance du cerveau

La bactériorhodopsine est une des rhodopsines d'origine procaryotique. Toutes les protéines de la superfamille des rhodopsines sont dépendantes de la lumière et leur répertoire est vaste. Chez les archées halophiles extrêmes, ce sont des pompes à protons, mais aussi des pompes à chlorures comme l'halorhodopsine. Cette dernière est à la base de l'optogénétique, technique d'exploration du cerveau de l'animal de laboratoire. Elle consiste à implanter dans un neurone le gène de la protéine et à le faire s'exprimer de sorte que, lors d'un éclaircissement par fibre optique, l'halorhodopsine laisse entrer un ion chlorure ce qui hyper-polarise le neurone et lui seul. D'autres rhodopsines, d'origine algale, comme la channel-rhodopsine de *Chlamydomonas*, sont utilisées pour faire entrer un cation et hypo-polariser le neurone. (figure 8).

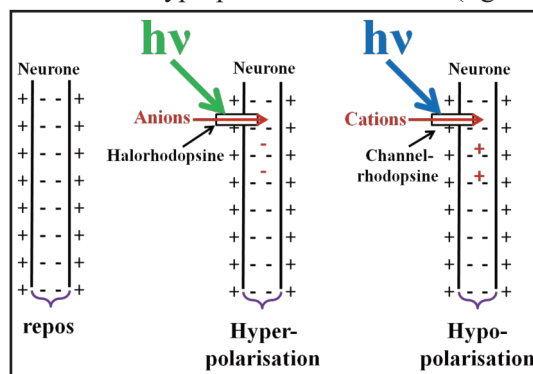


Figure 8.- Optogénétique : modulations de la polarisation d'un neurone, génétiquement modifié par une rhodopsine, par l'action de la lumière sur cette rhodopsine).

## Encore d'autres rhodopsines, partout dans les océans

La découverte de rhodopsines dans les océans date du début du XXI<sup>e</sup> siècle, elle est venue par la métagénomique, cette approche qui consiste à analyser l'ADN présent dans un milieu donné, l'océan par exemple. L'idée est comparable à celle de lire quelques pages prélevées au hasard dans une bibliothèque pour connaître la diversité des ouvrages qu'elle renferme. Un premier fragment d'ADN provenant de l'océan Pacifique fut trouvé porteur d'un gène de rhodopsine associé à un gène typiquement bactérien. L'analyse confirma que la protéine codée par ce gène était bien une pompe à protons à sept hélices transmembranaires, elle fut nommée protéorhodopsine.

Plusieurs études suggèrent que les bactéries à protéorhodopsine sont abondantes et ubiquistes dans les communautés microbiennes de tous les océans du globe. Le séquençage massif d'un échantillon de 1500 litres d'eau de la mer des Sargasses a récemment confirmé cette abondance (743 gènes de protéorhodopsine parmi 1164 fragments de génome typiquement bactérien). Dans la bibliothèque évoquée plus haut, cela signifierait que 7 ouvrages sur 10 auraient un chapitre protéorhodopsine.

L'abondance de ces gènes est mal comprise. Selon certains auteurs elle proviendrait surtout de transferts horizontaux d'un micro-organisme à l'autre et ils permettraient à ceux qui le possèdent de collecter un appoint d'énergie par la lumière dans les eaux de surface.

## Pour conclure : que font les rhodopsines dans la biosphère ?

*Halobacterium halobium* et *Halobacterium salinarum* sont des archées capables de respirer en présence d'oxygène pour obtenir l'ATP dont elles ont besoin. Leur membrane contient les transporteurs d'électrons et l'ATP synthase fonctionnels nécessaires. Si l'oxygène vient à manquer, l'archée équipe sa membrane de bactériorhodopsine qui, couplée à l'ATP synthase permet une synthèse d'ATP quasi-directe par la lumière.

Le site d'attachement du chromophore dans la septième hélice est particulièrement conservé chez toutes les rhodopsines, ce qui montre son importance dans leur fonctionnement, pourtant force est de constater que leur rôle a évolué au sein du vivant. Certes, il s'agit toujours d'une molécule photoréceptrice mais, chez les procaryotes, elle est dans un circuit collecteur d'énergie alors que dans l'oeil animal, le circuit est celui de l'information. Il existe une étape intermédiaire bien connue, celle du stigma de *Chlamydomonas*. Cette algue verte unicellulaire, devenue un modèle biologique

(il existe un *Chlamydomonas* Resource Center) depuis quelques décennies, possède un unique chloroplaste et deux grands flagelles qui assurent sa motilité. Sur le flanc du chloroplaste se trouve un point orangé, parce que riche en caroténoïdes, le stigma (eyespot des anglo-saxons). Ce stigma, œil rudimentaire capte la lumière et, selon son intensité, informe les flagelles de la nécessité de se rapprocher ou de s'éloigner de la source lumineuse. Le photorécepteur du stigma est une rhodopsine de type archéen, canal ionique pour un cation, probablement la channelrhodopsine évoquée plus haut. Le génome de cet eucaryote atypique, décrypté en 2007, combine certaines caractéristiques spécifiques aux plantes à d'autres propres aux animaux. Dans cet organisme original, peut-être proche de la cellule eucaryote fondamentale, le circuit collecteur d'énergie est assuré par la chlorophylle «libérant» ainsi la rhodopsine pour l'information.

## Bibliographie

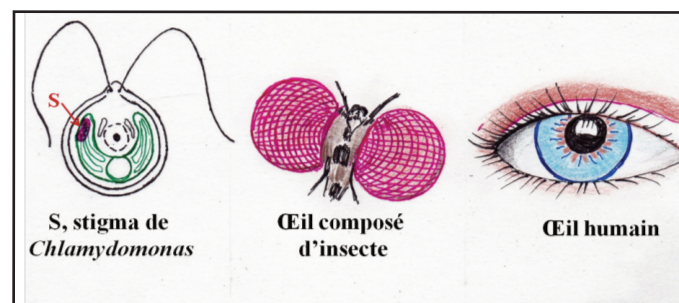


Figure 9.- Abordant la collecte d'information lumineuse dans le stigma d'un eucaryote unicellulaire, *Chlamydomonas*, les rhodopsines ont élargi cette fonction aux animaux, vertébrés et invertébrés.).

Henderson R., Baldwin J.M., Ceska T.A. Zemlin F., Beckmann E., Downing K.H., 1990.- Model for the structure of bacteriorhodopsin based on high-resolution electron cryomicroscopy. *J. Mol. Biol.*, **213**(4), 899-929.

Mitchell P., 1961.-Coupling of phosphorylation to electron and hydrogen transfer by a chemiosmotic type of mechanism. *Nature*, **191**, 144-8.

Oesterhelt D., Stoeckenius W., 1971.- Rhodopsin-like protein from the purple membrane of *Halobacterium halobium*. *Nat. New Biol.*, **233** (39), 149-52.

Racker E., Stoeckenius W., 1974.- Reconstitution of Purple Membrane Vesicles Catalyzing

Ligjt-driven Proton Uptake and Adenosine Triphosphate Formation. *J. Biol. Chem.*, **249**, 662-663.



# RECOMMANDATIONS ALIMENTAIRES ET PRÉVENTION NUTRITIONNELLE : IMPACTS DU DEGRÉ DE TRANSFORMATION DES ALIMENTS

**Anthony FARDET**

*CHARGÉ DE RECHERCHES EN ALIMENTATION PRÉVENTIVE & HOLISTIQUE*

*Université Clermont Auvergne, INRA, UNH, Unité de Nutrition Humaine, CRNH Auvergne, F-63000 Clermont-Ferrand, France - Courriel : anthony.fardet@inra.fr*

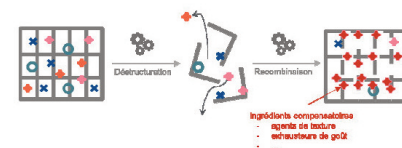
## Une brève histoire de la transformation alimentaire : vers l'ultra-transformation...

La transformation des aliments a depuis toujours accompagné l'évolution de l'homme, permettant d'après certains le développement cérébral (1<sup>ère</sup> transition du cru au cuit suite à la domestication du feu : -500 000 à -1 million d'années), l'essor des grandes civilisations (2<sup>ème</sup> transition des chasseurs-cueilleurs aux agriculteurs éleveurs : -12 000 ans) puis des grandes villes (3<sup>ème</sup> transition des aliments traditionnels aux aliments industriels : fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle et invention de la conserve) <sup>(1)</sup>. Pourtant il y a une 4<sup>ème</sup> transition dont personne ne parle : celle des produits transformés à ultra-transformés (PUT) dans les années 80. Cette transition marque un tournant dans l'alimentation humaine car depuis seulement 30-40 ans l'humanité consomme de nouveaux aliments qu'elle n'avait jamais consommés auparavant, à savoir des aliments artificiels (avec de nouvelles matrices créées de toutes pièces par l'Homme) ayant subi des transformations drastiques (cracking/fractionnement extrême, cuisson-extrusion...) et des ajouts d'ingrédients et/ou d'additifs de type «cosmétique» et d'origine strictement industrielle - que personne ne peut trouver en faisant ses courses !

Il est étonnant de constater, même si ce n'est qu'une association et non une causalité, que l'explosion des prévalences des maladies chroniques - que je qualifie d'hyper-industrialisation - et la baisse de l'espérance de vie en bonne santé sont concomitantes avec l'arrivée massive de ces «faux» aliments dans les rayons de nos supermarchés, fastfoods, supérettes, cantines scolaires et autres lieux de restauration collective. Alors oui il y a aussi la baisse de l'activité physique, l'augmentation de la pollution, certainement aussi des facteurs génétiques et psycho-sociaux (solitude, stress), mais l'alimentation reste le facteur principal car nous mangeons 2 à 3 fois par jour et nous mourrons si nous arrêtons de manger alors que ce n'est pas le cas si nous arrêtons le sport, si nous sommes seuls ou dans un environnement pollué, du moins pas aussi rapidement ! De plus le levier le plus facilement actionnable à court terme est bien notre alimentation : en effet si je mange «mal» je peux dès aujourd'hui changer mon acte d'achat alors que je mettrais plus de temps à reprendre le sport, diminuer la pollution de l'environnement ou ma solitude. Quant à ma génétique...

Les PUT sont tout d'abord caractérisés dans leur formulation par l'ajout d'ingrédients et/ou additifs cosmétiques à usage principalement industriel - et ayant subi un procédé de transformation excessif - pour imiter, exacerber ou restaurer des propriétés sensorielles (texture, goût et couleur) (Figure 1). La seule présence d'un de ces agents cosmétiques (texturant ou colorant ou exhausteur de goût) suffit à définir un PUT car les vrais aliments n'en ont pas besoin : ils se suffisent à eux-mêmes. On distingue deux grands groupes de PUT : 1) les « faux » aliments («fake foods») possédant une matrice artificielle à partir de la recombinaison d'ingrédients et/ou

Figure 1 : Qu'est-ce qu'un aliment ultra-transformé ?



### Définition :

Un aliment ultra-transformé est un aliment dans lequel on détecte au moins l'ajout :

- soit d'un **ingrédient ultra-transformé** (fractionnement excessif de sa matrice originale)
- soit d'un **additif cosmétique** (qui modifie la forme, l'aspect, le goût, la texture du produit) et/ou **additif évalué à risque pour la santé**

Il peut aussi s'agir d'un procédé pénalisant appliqué directement au produit fini.

### Deux grandes catégories :

- Les aliments recombinaison : peu de vrais aliments, matrices artificielles... ("fake foods")
- Les plats préparés avec ingrédients et/ou additifs industriels de type "cosmétiques"

additifs avec très peu de vrais aliments types barres chocolatées, sodas, yaourts à boire, etc. ; et 2) les plats préparés industriels ou les snacks sucrés, salés ou gras qui sont à base de vrais aliments mais qui contiennent des ingrédients et/ou additifs d'origine strictement industrielle et «cosmétiques». Ainsi pouvez-vous trouver un saucisson traditionnel non ultra-transformé et son équivalent ultra-transformé (avec ajout de dextrose !), de même pour beaucoup de plats traditionnels français. Pour mieux comprendre prenons l'exemple d'un verre : vous le cassez ; pour le réparer et le reconstituer vous utilisez de la colle ; vous obtenez un nouveau verre mais pas tout à fait le même car il a fallu ajouter un ingrédient : la colle ; un texturant/liant dans le cas des aliments reconstitués.

Il était donc important de distinguer, au sein des aliments transformés, les PUT, ceux qui posent réellement problème pour la santé lorsqu'ils sont consommés régulièrement et constituent la base de notre alimentation. Les PUT sont aussi le reflet de notre société de consommation où l'aliment s'est mis au service de la technologie pour toujours plus de profit et de gain de temps. En outre ces PUT ont des formules très standardisées à travers le monde et sont fabriqués à partir des mêmes ingrédients eux-mêmes produits massivement via la monoculture intensive de quelques espèces végétales (blé, maïs, soja...). De plus les calories animales qu'ils contiennent viennent dans la plupart des cas d'animaux élevés de façon intensive dans des conditions généralement peu respectueuses de leur bien-être. Le PUT est donc un concept holistique qui regroupe à lui tout seul toute la dérive de notre système : en diminuant leur consommation pour en faire des produits de niche nous recréerons alors un cercle vertueux stimulant biodiversité de l'agriculture, viande de meilleure qualité (élevages extensifs plus respectueux du bien-être animal), respect des petits paysans et agriculteurs, et protection de notre santé. Cette cible n'est donc pas anodine !

Le passage massif des «vrais» aux «faux» aliments dans les années 80<sup>(2)</sup> est donc le reflet du passage d'une technologie alimentaire au service de l'aliment à un aliment au service de la technologie.

## Les recommandations : quel bilan ?

Les PUT sont le fruit de la pensée réductionniste qui ne considère l'aliment que comme une seule somme de nutriments et de calories interchangeable. Sur cette base on a donc fractionné les aliments puis recombina les ingrédients et nutriments dans de nouvelles matrices artificielles ou « fake foods ». **On ne peut donc pas élaborer des recommandations nutritionnelles efficaces à long terme si l'on n'a pas identifié la relation fondamentale de transitivité entre «pensée réductionniste», «PUT» et «maladies chroniques d'industrialisation».**

Jusqu'à aujourd'hui les recommandations nutritionnelles se sont principalement basées sur l'approche réductionniste par nutriment, ce que les anglosaxons appellent le «Nutritionism» ou «réductionnisme nutritionnel». Un des pionniers à avoir pointé les risques de cette approche est Gyorgy Scrinis, un enseignant-chercheur australien. Il définit trois phases dans le Nutritionism (3) :

1) la période du 'Quantifying Nutritionism' plutôt contrôlée par les chercheurs (environ 1850-1950): le focus principal des scientifiques était de découvrir et de quantifier les nutriments dans les aliments, et les besoins nutritionnels de l'organisme, afin notamment de lutter contre les maladies de déficiences nutritionnelles ;

2) la période du 'Good-and-Bad Nutritionism' plutôt contrôlée par les pouvoirs publics (commence au début des années 60) : le focus est ici mis sur les nutriments à éviter ou à réduire, et ceux à privilégier afin de lutter contre le développement des maladies chroniques ; **c'est le début des premières recommandations nutritionnelles au niveau national ;**

3) la période du "Functional Nutritionism" plutôt contrôlée par les industries agro-alimentaires (du milieu des années 90 à nos jours) : les aliments sont considérés comme fonctionnels en relation avec la santé de l'organisme afin notamment d'optimiser notre santé ou de corriger certains déséquilibres. L'accent est mis sur des nutriments «positifs»

Puis dans un article plus récent, Gyorgy Scrinis analyse les dangers du Nutritionism appliqué à la technologie pour le développement de nouveaux aliments, notamment vis-à-vis de la reformulation, l'enrichissement («fortification») et la fonctionnalisation («aliments fonctionnels») (4; 5). Il explique qu'une telle approche permet aux industriels de l'agroalimentaire de mettre sur le marché, sous couvert d'innovation pour notre santé, une multitude de nouveaux aliments en les reformulant, les enrichissant ou les fonctionnalisant.

Cependant, compte-tenu du développement toujours croissant des maladies chroniques liées à l'alimentation dans nos sociétés occidentales, et aujourd'hui dans les pays émergents, on observe que la reformulation des aliments a échoué à enrayer ces «épidémies». Avec comme seule approche la composition nutritionnelle, les formulations des aliments sont infinies mais pour l'heure aucun bénéfice pour notre santé n'en a résulté.

Or la plupart des index nutritionnels développés dans le monde («Traffic lights», Nutriscore, SENS, SAIN-LIM, Yuka...) pour aider le consommateur à faire de meilleurs choix alimentaires sont réductionnistes car basés sur la seule composition en quelques nutriments des aliments, et parfois - mais rarement - les additifs. Bien que constituant une première étape dans un effort louable de classer les aliments pour le consommateur le risque majeur de ces scores est d'encourager les industriels à reformuler leurs aliments - souvent déjà ultra-transformés - pour passer du rouge au vert et de remplacer sel, sucre et gras par de nouveaux additifs et ingrédients industriels de type cosmétiques (colorants, texturants et édulcorants) non pris en compte dans le calcul du score. Ainsi beaucoup de ces scores classent comme bons

pour la santé des PUT alors qu'on sait qu'une consommation excessive de ces aliments est associée à beaucoup de dérégulations métaboliques (6; 7; 8). En outre ce sont les plus défavorisés qui consomment le plus les PUT : par un effet «pervers» paradoxal ces scores pourraient donc encourager ces populations à continuer à consommer des PUT «moins gras, salés, sucrés» plutôt que de vrais aliments.

La plupart des recommandations et des régimes alimentaires sont donc basés sur des nutriments : «moins gras, salé, sucré», hypocaloriques, hyperprotéinés, moins riches en cholestérol, sans gluten, moins riches en acides gras saturés/trans, etc. Ce qui ne garantit pas de mieux consommer. Par exemple de très nombreux produits «sans gluten» sont des PUT ; de même pour l'alimentation bio ou végétane où on peut trouver beaucoup de PUT. D'autres recommandations sont basées sur des aliments comme les «5 fruits et légumes par jour», donnant des indicateurs simples et faciles à retenir. Mais sans doute faudrait-il préciser 5 fruits et légumes «peu transformés» ?

Si les recommandations nutritionnelles nationales ont le mérite d'avoir proposé des repères nutritionnels sur des bases scientifiques solides, la prochaine étape sera indubitablement d'aller vers des recommandations plus holistiques prenant en compte de nouvelles dimensions comme le degré de transformation des aliments, le bien-être animal, la protection de l'environnement et la dimension sociale de l'acte de manger, ce que les brésiliens ont été les premiers à faire en 2014 (9). Dans ce guide national les nutriments sont secondaires et la porte d'entrée est le degré de transformation des aliments.

## Vers une approche plus holistique de l'alimentation ?

Rappelons que le réductionnisme est une approche qui consiste à expliquer le tout à partir des parties tandis que l'holisme est une approche qui considère que le tout est différent de la somme des parties.

Aussi plutôt que de consommer des aliments fonctionnels ou enrichis pour compenser à la base un régime alimentaire déséquilibré dans une logique curative réductionniste, il faudrait revenir à une alimentation globale à base de vrais aliments complexes pas, peu ou modérément transformés dans une logique préventive et holistique (10; 11). C'est le point de vue défendu par Colin T Campbell, un chercheur américain en biochimie nutritionnelle : ce qu'il définit par le «Wholism» en faisant un jeu de mots entre «Holism» et «Whole» (12). Sur la base de ses travaux de recherche et de son expérience il propose de revenir à une alimentation végétale complexe peu transformée, ce qu'il appelle le « Whole Plant-based Food Diet » ou WPFDF (12). Dans sa fameuse étude épidémiologique chinoise de grande envergure, il a observé que les populations adhérent le plus à des produits végétaux peu transformés étaient les moins malades, et qu'une alimentation riche en produits animaux et très transformée était associée à une augmentation significative du risque de développer des maladies chroniques (12). Il cite notamment des travaux de recherche des années 80 où des diabètes de type 2 ont pu être totalement ou partiellement inversés en revenant à une alimentation à base de produits végétaux peu transformés, et ceci en seulement quelques semaines. Il n'y a donc pas de fatalité et il semblerait qu'une alimentation équilibrée à base d'aliments complexes peu transformés soit un atout majeur pour prévenir les maladies chroniques.

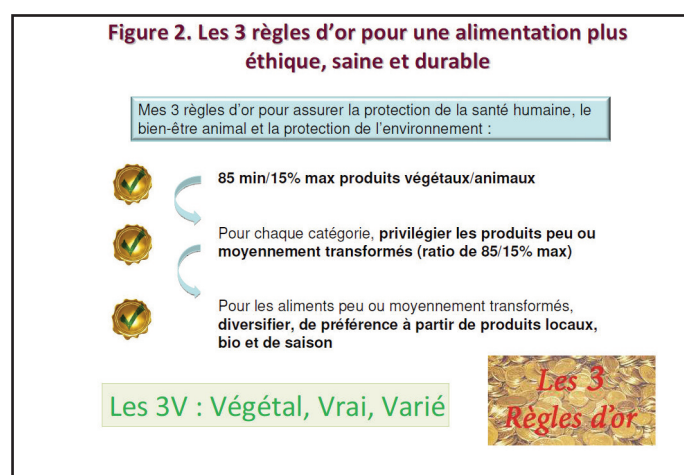
Ses travaux rejoignent les conclusions auxquelles j'ai abouti, à savoir le régime protecteur universel, tel que défini par la science, est un régime qui obéit à la règle holistique des 3V pour Végétal, Vrai, Varié (10). Cette règle est simple et s'affranchit de la « dictature » des nutriments qui n'apporte que de la confusion dans l'esprit du grand public et ne fait le jeu que des industriels. L'approche par nutriment crée un fossé entre «ceux qui savent» et les autres donnant le contrôle



à « ceux qui savent » sur les autres. Alors que l'approche holistique redonne le pouvoir de l'alimentation au grand public qui peut se l'approprier simplement.

D'ailleurs tous les régimes protecteurs reconnus comme le régime méditerranéen, Okinawa, flexitarien, prudent ou végétarien obéissent à peu de choses prêt à cette règle des 3V ; et toutes les « zones bleues » de la planète avec le plus grand pourcentage de centenaires adoptent ce type de régime alimentaire. Suivre cette règle simple suffit à satisfaire tous nos besoins nutritionnels, à protéger notre santé, à diminuer la maltraitance animale et restimuler la biodiversité environnementale. Pour être plus précis je la définis comme les Trois Règles d'Or pour une alimentation saine, durable et éthique (**Figure 2**) : 1) 85% minimum par jour de calories végétales (2-3 portions maximum/jour de produits animaux) ; 2) 15% maximum de calories ultra-transformées (2 portions maximum/jour) ; et 3) Pour les aliments peu ou moyennement transformés mangez varié, si possible bio, local et de saison. C'est tout. Pas besoin d'en savoir plus pour les personnes qui n'ont pas suivi de formation en alimentation.

Bref : avec une approche holistique tout redevient simple tandis qu'avec une approche réductionniste exclusive tout devient confus et compliqué.



## Conclusions : Vers la prise en compte du degré de transformation des aliments ?

Le lien entre alimentation et santé repose avant tout sur le degré de transformation des aliments : cela n'est plus à démontrer. Ce paramètre doit donc être intégré dans les recommandations nutritionnelles nationales, quitte à déplaire aux industriels.

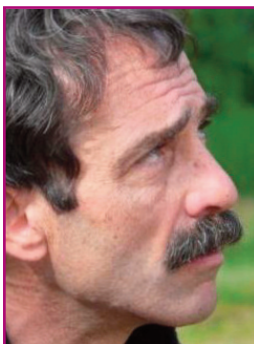
Par ailleurs, pour diminuer la consommation des PUT je pense qu'il y a trois actions à mener : 1) éduquer et informer le consommateur ; 2) enseigner l'alimentation préventive et holistique dès l'âge de 3-4 ans ; et 3) faciliter l'accès pour tous aux « vrais » aliments de bonne qualité nutritionnelle. En outre les PUT sont une bonne cible pour recréer un cercle vertueux pour la planète car derrière ces aliments il y a aussi la maltraitance animale, la destruction de l'environnement, des petits paysans, de la vie sociale et des traditions culinaires. Les produits animaux dans les PUT sont en effet généralement issus d'animaux élevés en conditions intensives bien souvent peu soucieuses de leur bien-être ; et les ingrédients à la base de leur fabrication sont généralement issus de monocultures intensives coûtant cher à l'environnement. En effet ces produits ont des formulations très standardisées mondialement ne favorisant pas la biodiversité et menaçant aussi les traditions culinaires des pays. Pour dire les choses autrement : si les PUT sont peu chers pour le porte-monnaie ils sont très onéreux pour la planète dans son ensemble.

Le réductionnisme nutritionnel « dogmatique » n'a fait que créer toujours plus de confusion dans l'esprit des gens, menant de façon extrême à l'orthorexie que l'on pourrait

appeler la maladie du « manger juste ». Alors que l'alimentation est quelque chose de si simple : bien manger est très facile. Avec un retour à l'éducation à l'alimentation on peut même se demander si un jour les recommandations nutritionnelles nationales ne deviendront pas tout simplement inutiles...

## Bibliographie pour aller plus loin

- Fardet A (2018) Les aliments ultra-transformés. Les risques pour la santé de l'hyper-industrialisation des aliments. *Santé Science et Conscience* **14**, 60-69.
- Monteiro CA, Moubarac JC, Cannon G *et al.* (2013) Ultra-processed products are becoming dominant in the global food system. *Obesity Reviews* **14**, 21-28.
- Scrinis G (2013) *Nutritionism - The Science and Politics of Dietary Advice* Columbia University Press.
- Scrinis G, Monteiro CA (2018) Ultra-processed foods and the limits of product reformulation. *Public Health Nutr* **21**, 247-252.
- Scrinis G (2015) Reformulation, fortification and functionalization : Big Food corporations' nutritional engineering and marketing strategies. *The Journal of Peasant Studies* **43**, 17-37.
- Monteiro CA, Geoffrey Cannon, Jean-Claude Moubarac *et al.* (2018) The UN Decade of Nutrition, the NOVA food classification and the trouble with ultra-processing. *Public Health Nutrition* **21**, 5-17.
- Monteiro C, Cannon G, Levy R *et al.* (2016) The star shines bright. *World Nutrition* **7**, 28-38.
- Monteiro CA, Cannon G, Moubarac JC *et al.* (2015) Dietary guidelines to nourish humanity and the planet in the twenty-first century. A blueprint from Brazil. *Public Health Nutrition* **18**, 2311-2322.
- Ministry of Health of Brazil, Secretariat of Health Care, Primary Health Care Department (2014) *Dietary guidelines for the Brazilian population*. São Paulo.
- Fardet A, Rock E (2018) Reductionist nutrition research has meaning only within the framework of holistic thinking. *Advances in Nutrition*. DOI: 10.1093/advances/nmy044.
- Fardet A, Rock E (2014) Toward a new philosophy of preventive nutrition: from a reductionist to a holistic paradigm to improve nutritional recommendations. *Advances in Nutrition* **5**, 430-446.
- Campbell CT, Jacobson H (2013) *Whole: Rethinking the Science of Nutrition*. BENBELLA BOOKS.



# LES PARCS NATIONAUX FRANÇAIS

**Alex CLAMENS**

*Enseignant SVT en classe préparatoire BCPST  
Lycée Blaise Pascal - Clermont-Ferrand*

C'est le 1<sup>er</sup> mars 1872 que le premier parc national du monde a été créé aux Etats Unis à Yellowstone sur 8 991 km<sup>2</sup> des états du Montana et du Wyoming. John Muir, l'un des principaux artisans des parcs américains, justifiait en ces termes cette nouvelle politique de conservation en 1898 : «Des milliers de citoyens fatigués, énervés ou trop civilisés commencent à réaliser que partir à la montagne, c'est rentrer à la maison, que l'étendue sauvage est une nécessité et que les parcs et réserves sont source de vie». L'objectif était alors clairement de créer des alternatives à une vie moderne trépidante et artificialisée. Depuis cette date, 60 parcs nationaux ont été créés aux Etats-Unis sur 211 000 km<sup>2</sup> cumulés dans le but de conserver les paysages et les objets naturels et historiques et la vie sauvage qui s'y trouvent, ainsi que de permettre d'en profiter d'une manière qui les préserve dans le même état pour les générations futures. Depuis, ce modèle a fait école, et aujourd'hui pratiquement tous les pays du monde ont créé des parcs nationaux, même si le terme ne recouvre pas partout exactement le même type de gestion ni le même degré de protection. On comptabilise environ 6 500 parcs nationaux dans le monde et leur surface concerne plus de 4 millions de km<sup>2</sup> (voir Heritier & Laslaz, 2008).

Par rapport aux parcs français, les parcs étasuniens se distinguent sur plusieurs points. Ils sont institués sur des terres fédérales, le service des parcs nationaux est donc chez lui ce qui facilite l'application des réglementations. Ensuite, leur origine est à rechercher dans une certaine frustration des habitants de ce pays de ne pas posséder comme ceux de la vieille Europe d'un patrimoine historique et architectural. C'est donc dans les monuments naturels que les intellectuels ont recherché une alternative aux pyramides égyptiennes et aux cathédrales gothiques. Autre différence, dans les parcs des origines, les gestionnaires ont appliqué à la nature une certaine vision binaire du monde, partagé entre bons et méchants. En vertu de cette approche, les prédateurs ont été pourchassés par les gardes et les loups de Yellowstone furent ainsi totalement éradiqués. Ces parcs, qui accueillent aujourd'hui 84 millions de visiteurs annuels, ont été dès le début largement ouverts au public, au moyen de routes et d'infrastructures d'accueil. Enfin, leurs habitants originels, les amérindiens, en ont été éliminés, soit physiquement, soit par déportation.



Figure 1 - Rappel de la réglementation à l'entrée du coeur du Parc national des Ecrins. Photo Alex Clamens.

Cette politique d'élimination de populations autochtones pour créer des espaces protégés n'est pas propre aux Etats Unis et se retrouve largement dans les pays en voie de développement (voir Clamens, 2016). Les grands parcs africains ou indiens ont tous été créés en déplaçant de force, et parfois avec violence, les habitants des lieux. A part l'Inde, qui reconnaît en abriter 1,6 million, aucun pays ne tient les comptes de cette nouvelle classe de réfugiés que l'on peut appeler réfugiés de la conservation, sans doute car on ne comptabilise que les populations que l'on indemnise. Les estimations mondiales de leur nombre avancées par l'ONU, l'UICN et quelques universitaires varient de 5 millions à plusieurs dizaines de millions. Charles Geiser, (université Cornell), estime pour sa part que leur nombre en Afrique dépasse les 14 millions (Muller 2007). Comme l'écrit Smajda (in Laslaz et al. 2014), en Afrique comme ailleurs en Asie, «les politiques de parcs nationaux et de réserve, de par leur appropriation initiale par les chasseurs et les forestiers, puis par leur orientation vers le développement d'un tourisme orienté vers un public aisé, se sont traduites par une marginalisation accrue des populations économiquement les plus démunies».

La France s'est dotée tardivement d'une législation permettant de créer des parcs nationaux (pour une approche historique voir Leynaud, 1985 ; Merveilleux du Vignaux, 2003 ; Larrère et al. 2009). La loi de 1960 qui permet leur création passa en grande partie inaperçue dans une loi générale d'orientation agricole. Elle résultait de la rencontre de quatre volontés ou philosophies. Déjà à l'époque les scientifiques s'inquiétaient de la disparition de nombre d'espèces animales et végétales et réclamaient la création de zones dévolues à leur protection. Des intellectuels comme Georges Duhamel, ou des élus locaux comme Gilbert André, souhaitaient des lieux où les urbains puissent se ressourcer à l'abri de la vie moderne et qui préservent en même temps les sociétés montagnardes traditionnelles et leurs valeurs. Des chasseurs, comme le docteur Marcel Couturier, s'inquiétaient de la disparition du grand gibier de montagne et réclamaient de grandes réserves pour le protéger. Enfin, certains politiques, et les administrations de l'agriculture, réfléchissaient à des mesures permettant de limiter l'exode rural et la désertification des campagnes et en particulier des montagnes.



Figure 2 - Le vallon de la Leisse dans le parc national de la Vanoise. Photo Alex Clamens

C'est de l'interaction de ces différentes volontés que naquit la loi de 1960 sur les parcs nationaux. Selon cette loi, un parc national était un espace protégé par une réglementation interdisant certaines activités humaines et en limitant d'autres mais au sein desquels les activités traditionnelles (agriculture, élevage et exploitation forestière) continuaient à s'exercer à peu près librement. On retrouvait là la volonté de préserver des lieux de la vie moderne tout en maintenant les pratiques des sociétés rurales et en protégeant la faune, la flore et les paysages. Au sein de ces parcs, des réserves intégrales pouvaient être délimitées afin de protéger strictement les espèces vivantes et leurs milieux de vie (vœux des scientifiques). Enfin, s'inspirant des idées de l'architecte Denys Pradelle, les législateurs avaient prévu la possibilité de créer autour du parc une zone périphérique qui devait recevoir des améliorations d'ordre économique, culturel ou social tout en rendant plus efficace la protection de la nature dans le parc (vœux des administrations et des collectivités locales). En application de cette loi, sept parcs nationaux ont été créés : la Vanoise (1963), Port-Cros (1963), les Pyrénées (1967), les Cévennes (1970), les Ecrins (1973), le Mercantour (1979) et la Guadeloupe (1986). Les parcs nationaux sont à distinguer des parcs naturels régionaux. Un parc naturel régional est un outil d'aménagement du territoire dans des espaces ruraux présentant un intérêt naturel et culturel. Ils sont créés par le ministère de l'environnement sur des projets élaborés par les régions sans enquête d'utilité publique contrairement aux parcs nationaux. Aucune réglementation ne s'y applique.

Ils sont gérés grâce à une charte qui est un engagement contractuel des communes qui fixe les grands objectifs de développement du territoire. Cinquante-deux parcs naturels régionaux ont été créés en France depuis 1967. Les limites des parcs nationaux reflètent la difficulté qu'il y a eu à les créer. Le parc des Pyrénées, long de 105 km et large de 500 m à l'endroit où il est le plus étroit, laisse en dehors de sa protection la majorité des forêts peuplées par l'ours en 1967 tout en tolérant en son sein les pratiques forestières à l'origine de la disparition de l'espèce. Le parc de la Vanoise est quasi dépourvu de forêt et s'étend essentiellement sur des zones de rochers et de glaciers. La complexité des limites de celui des Cévennes, ou même du Mercantour, témoigne des longues tractations lors de leur genèse.



Figure 3 - Bouquetin des Alpes. Photo Alex Clamens.

Certains secteurs très riches biologiquement et constituant des entités écologiques ont cependant pu être intégrés dans ces zones protégées comme le vallon de Mollières (Mercantour) ou celui de Valsenestre (Ecrins). Résultat de compromis, ou imposé contre l'avis des collectivités locales (Mercantour), les parcs ont eu de la peine à s'affirmer lors de leurs premières années d'existence, et cette situation persiste pour certains d'entre eux. Quant aux zones périphériques,

originalité des parcs français, elles n'ont jamais atteint leurs objectifs car les décrets d'application de la loi de 1960 ne leur en donnèrent pas les moyens. Aucune coordination de leur développement n'a été mise en place, et leur aménagement n'a jamais été conçu dans l'objectif de rendre plus efficace la protection dans le parc. Les zones périphériques, quand elles ont été créées, se sont limitées à regrouper les communes recevant des subventions spéciales dans le but de compenser les contraintes générées par la création du parc et du coup l'administration des parcs se concentra sur la protection intégrale des zones centrales.

Afin de revitaliser la politique des parcs nationaux, de redonner une existence au concept de zone périphérique en ouvrant le parc sur l'extérieur et sur les collectivités locales, tout en rendant possibles des assouplissements du cadre réglementaire dans la zone centrale afin de créer des parcs outre-mer et en zone urbaine, une nouvelle loi sur les parcs nationaux a été votée en 2006 (voir une analyse dans Alban & Hubert, 2013). Les objectifs généraux de la nouvelle loi sont similaires à ceux de 1960 : «Un parc national peut être créé à partir d'espaces terrestres ou maritimes, lorsque le milieu naturel, particulièrement la faune, la flore, le sol, le sous-sol, l'atmosphère, les eaux, les paysages et, le cas échéant, le patrimoine culturel qu'ils comportent, présentent un intérêt spécial et qu'il importe d'en assurer la protection en les préservant des dégradations et des atteintes susceptibles d'en altérer la diversité, la composition, l'aspect et l'évolution». Mais aujourd'hui un parc national comporte deux zones. Le coeur, correspond aux zones centrales des anciens parcs, et comme pour elles une réglementation y interdit certaines activités humaines et en restreint d'autres. L'innovation de la nouvelle loi est qu'un parc comporte aussi une zone de libre adhésion, délimitée par le décret de création, qui englobe des communes, ou parties de communes, qui ont une continuité écologique avec le coeur. Dans cette zone hors coeur, une charte définit des orientations de protection, de mise en valeur et de développement durable. Elle s'appuie sur une carte des vocations qui identifie les modalités d'utilisation de l'espace sur l'ensemble du coeur et de la zone d'adhésion. Cette charte, document contractuel, est élaborée collectivement par le parc, les élus locaux et les intervenants du territoire (agriculteurs, éleveurs, professionnels du tourisme...)



Figure 4 - Paysage du causse Méjean marqué par l'activité humaine, Parc national des Cévennes. Photo Alex Clamens

Une fois ce texte rédigé, il est soumis au vote des conseils municipaux des communes concernées. En cas de vote positif, la commune fait partie du parc, en cas de vote négatif elle n'en fait pas partie. Un des engagements des communes signataires est de rendre leurs Plans Locaux d'Urbanisme en conformité avec les objectifs de la charte. Par contre, les votes des communes ne concernent pas les secteurs de leur territoire inclus dans le coeur du parc, délimité par le décret

une fois l'enquête d'utilité publique effectuée et que ce vote ne remet pas en cause. En application de la nouvelle loi les zones périphériques des parcs créés selon la loi de 1960 sont devenues zones de libre adhésion. Et suite à la nouvelle loi, trois parcs nationaux ont été créés : La Réunion (2007), La Guyane (2007) et Les Calanques (2012). L'élaboration des chartes des parcs fut un long travail. Au terme de leur rédaction elles sont passées devant les conseils municipaux des communes de la zone d'adhésion et le taux d'approbation fut assez variable d'un parc à l'autre. Pour le parc national des Ecrins 90% des communes donnèrent un vote positif. Il faut dire que ce parc avait anticipé la loi en proposant une charte aux communes avant 2006 et que sa création n'avait pas soulevé de fortes oppositions. On peut noter cependant que les refus émanèrent de communes sans activité économique significative, à la population vieillissante et qui auraient dû bénéficier d'une revitalisation grâce au parc. Deux parcs, nés avec difficulté, virent leur charte approuvée par une majorité de communes : les Cévennes (72%) et le Mercantour (75%). Pour le premier, créé en 1970, les habitants se sont rendu compte que l'institution avait protégé leur cadre de vie tout en maintenant les populations humaines sur place et enrichi la biodiversité (la population permanente du cœur est passé de 400 à 600 habitants pendant que 11 espèces de vertébrés faisaient leur retour). Pour le second, créé en 1979, le parc représente un label de qualité touristique que tout le monde connaît alors qu'avec le réchauffement climatique les stations de ski que les élus projetaient et que le parc a empêché de créer constitueraient aujourd'hui une charge financière insoutenable. Dans les Pyrénées 77% des communes ont adhéré mais une opposition nette apparaît entre les Hautes-Pyrénées où les votes oui ont dominé, et les Pyrénées Atlantiques où les non l'ont emporté. On retrouve 50 ans après la création du parc les mêmes oppositions que celles qui prévalaient en 1967, l'opposition en Béarn venant d'une longue tradition d'indépendance des vallées pyrénéennes vis-à-vis du pouvoir central et aussi du problème de l'ours. L'institution n'a pas réussi à convaincre et les relations avec les élus sont restées tendues. Mais le gros échec a été la Vanoise où seules deux communes (7%) ont signé.

Cet échec s'explique car l'espace protégé se situe au milieu du plus grand domaine de ski d'Europe et il apparaît aux élus comme un obstacle insoutenable à leur volonté d'aménager la montagne. Le retour du loup a encore accru les tensions (pour ce parc voir Laslaz, 2004).

Bientôt 60 ans après la première loi, les parcs nationaux français ont été redynamisés par la loi de 2006. Si les cœurs restent des territoires encore un peu mis sous cloche à l'abri des activités humaines, les parcs nationaux peuvent devenir, grâce aux chartes, des lieux d'échange entre les intervenants des territoires qui collaborent à sa gestion, des acteurs du développement durable et des zones de référence pour la biodiversité. Grâce à la présence de leur personnel sur le terrain, ils assurent des suivis d'espèces, de milieu et de changement de paysage. Leur rôle pédagogique est également fondamental. S'ils n'ont pas réussi à empêcher la régression de certaines espèces (ours en Béarn, tétras-lyre en Vanoise) ils ont permis à d'autres de reconstituer leurs populations (gypaète, bouquetin). Les tensions persistent encore avec les populations locales autour de certains problèmes (aménagement pour le ski en Vanoise, loups dans l'ensemble des parcs de montagne) mais on assiste aussi à une intégration progressive des parcs dans les projets de territoire menés par les élus locaux.

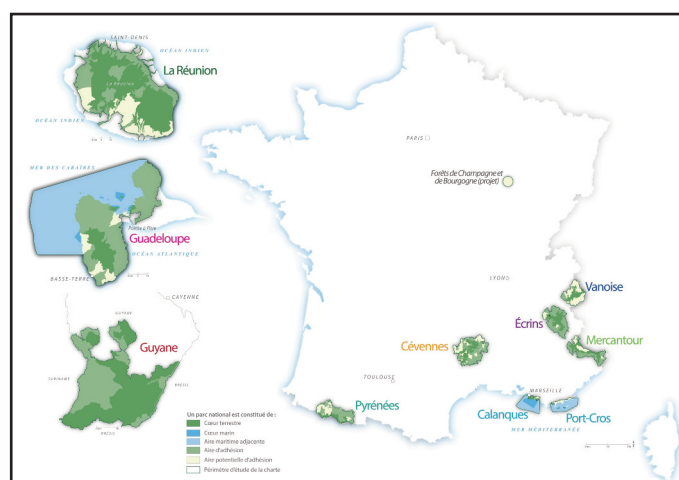


Fig 5 - Carte des parcs nationaux français

## Bibliographie

Alban N. & Hubert G. 2013

*Le modèle des parcs nationaux à l'épreuve du territoire.*  
VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement, 13 (2).

Clamens A. 2016

*Les parcs nationaux africains et la protection de la biodiversité : l'envers du décor du jardin d'Eden.*  
*Biologie-Géologie*, 1 : 91-98.

Héritier S. & Laslaz L. (Dir.) 2008

*Les parcs nationaux dans le monde.*  
*Protection, gestion et développement durable.*  
Ellipses.

Laslaz L. 2004

*Vanoise, 40 ans d'un Parc National.*  
*Bilan et perspectives.*  
L'harmattan.

Laslaz L., Gauchon C., Duvel M. & Héritier S. (Dir.) 2014

*Les espaces protégés. Entre conflits et acceptation.*  
Belin.

Larrère R., Lizet B. & Berlan-Darqué M. (Dir.) 2009

*Histoire des parcs nationaux. Comment prendre soin de la nature ?*  
Editions Quae.

Leynaud E. 1985

*L'Etat et la nature : l'exemple des parcs nationaux français.*  
Parc national des Cévennes, Florac.

Merveilleux du Vignaud P. 2003

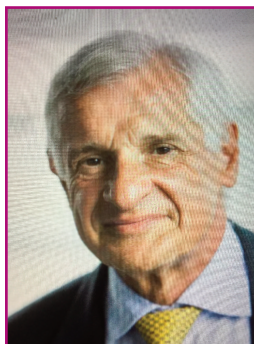
*L'aventure des parcs nationaux.*  
L'Atelier Technique des Espaces Naturels.

Muller A. 2007

*L'envers des parcs naturels. Les tribus victimes de l'écologie.*  
Courrier International n° 851,  
22février 2007.

Voir aussi le portail des parcs nationaux de France et les sites des différents parcs.

<http://www.parcsnationaux.fr/fr>



**Jean CHAZAL**

*Professeur des universités, Neurochirurgien*

*Doyen honoraire de la Faculté de Médecine de Clermont-Ferrand*

# LES TRAUMATISMES CRANIENS ET CÉRÉBRAUX DANS LE SPORT DE HAUT NIVEAU ET LE RUGBY EN PARTICULIER

La traumatologie crâno-encéphalique atteint le centre qui dirige notre vie. C'est un chapitre particulier et complexe (1), justifiant une prise en charge très spécifique ; ses conséquences peuvent associer des troubles neurologiques divers, des désordres psycho-affectifs et des symptômes affectant le corps tout entier.

Dans la pratique du sport de haut niveau quel qu'il soit, les références bibliographiques sont peu nombreuses et de faible niveau de certitude. Le rugby est un sujet d'actualité, source de nombreuses controverses, avec des enjeux multiples, ceux de la santé des joueurs, mêlés aux enjeux financiers et politiques.

## HISTORIQUE

Pour mieux comprendre les alertes actuelles sur le sujet, Il n'est pas sans intérêt d'évoquer les origines du rugby, décrit comme un sport d'affrontement et de combat, mais aussi comme une activité sportive spécifique, porteuse de valeur telle que «le rugby, école de la vie».

Ces origines sont lointaines (2) (3), remontant à l'*Haspartum* romain, qui se pratiquait à deux équipes sur un terrain séparé en deux par une ligne, avec à chaque extrémité une autre ligne matérialisant le but. L'objectif était de s'emparer du ballon lancé au-dessus de la ligne médiane, et de le porter à la main au-delà de la ligne adverse. Il fallait s'imposer physiquement, pousser l'adversaire, l'écartier, faire des passes... Ce jeu, à l'origine des sports d'équipes populaires, a traversé le temps avec des règles imprécises voire inexistantes, variables selon les époques. Certains (2) ont évoqué à son sujet et à propos de son évolution, une guerre civilisée ou une guerre sans guerre.

Une des étapes les plus connues vers la création du rugby a été la «*Soules*» du moyen âge, opposant deux équipes sans limitation du nombre de participants, d'une extrême brutalité, où il n'était pas interdit de mettre KO l'adversaire; le but était de faire avancer, à la main ou au pied, un ballon aux formes inhabituelles, fait d'une vessie de porc rempli de foin, et de le déposer dans le camp adverse.

Dans la première moitié du 19<sup>ème</sup> siècle, William Web Ellis, élève de la Rugby School en Angleterre, avec l'aval des dirigeants de cette école privée, aurait inventé le rugby, du même nom que la ville où elle se trouvait. Des règles étaient établies, pour se démarquer des autres jeux de ballon, particulièrement du football. Dans la deuxième moitié de ce même siècle, des règles plus précises étaient écrites au moment où le rugby connaissait son premier grand développement dans les clubs et à l'université.

Il a même été dit que le rugby était un sport universitaire, en remarquant qu'il occupait non seulement les pieds, mais aussi les mains et le cerveau...

La brutalité et la violence, dangereuses pour la santé des joueurs, devaient être canalisées ; l'idée d'un sport d'évitement apparaissait alors clairement, basée sur un déploiement stratégique, avec des combats individuels et collectifs. L'objectif ne devait pas être l'élimination de l'adversaire par

sa force et son adresse, comme dans la boxe, sport d'une extrême violence pour l'extrémité crâno-cérébrale, mais d'arriver à une autre fin, celle de marquer un essai.

Dans les écoles et dans les clubs, avant l'ère professionnelle, des joueurs de gabarits comparables s'affrontaient. Dans les lignes arrières, un demi d'ouverture (n° 10), poste clé dans la distribution du jeu, ne mesurait pas plus de 1,75 m pour un poids de 70 à 75 kg. Il affrontait des joueurs venant comme lui des arrières, ou des avants troisièmes lignes ailes (n°6 et 7), de corpulence comparable, sans gros écart.

Le combat existait, mais l'évitement devait prendre l'ascendant sur l'affrontement direct. Des blessures se produisaient, mais générées par des chocs entre joueurs de la même force physique.

Les traumatismes de l'extrémité crâno-encéphalique étaient moins violents, mais pouvaient se compliquer comme aujourd'hui de commotions cérébrales, au pire d'hémorragies intracrâniennes. Le diagnostic était incertain, voire méconnu, particulièrement avant que les phénomènes physiopathologiques ne soient mieux compris, grâce aux progrès des méthodes exploratrices et notamment de l'imagerie cérébrale (le scanner à la fin des années 70 et l'IRM 10 ans plus tard). L'avènement de la médecine du sport et son entrée dans les écoles et les clubs ont également joué un rôle important.

## EPIDEMIOLOGIE

Les enquêtes épidémiologiques et particulièrement les données fournies par les instances du rugby (ligues, fédérations et World Rugby) doivent être analysées avec précaution, compte tenu des incertitudes et de l'hétérogénéité de leurs recueils, avec la prise en compte des commotions, mais aussi des autres blessures susceptibles d'atteindre le joueur (4). Une forte augmentation de l'incidence des commotions cérébrales est cependant admise par tous, avec une fragilité plus marquée des jeunes et des féminines. Les commotions représenteraient entre 10 et 30 % de l'ensemble des blessures survenant au rugby, avec une moyenne de 10 commotions/1000 joueurs-heure (5).

## ANATOMIE

Le cerveau n'est pas un viscère quelconque. Sa vascularisation contribue à ses caractéristiques biomécaniques ; les artères constituent un secteur «résistif» rigide, et les veines un secteur «capacitif» très compliant. D'une extrême richesse, elle assure un apport énergétique considérable, représentant en moyenne 30% de l'énergie circulante. Le parenchyme comporte le tissu neuronal assurant les différentes fonctions cérébrales, protégé par le tissu glial décrit comme le tissu nourricier et le «garde du corps» des neurones, l'ensemble baignant dans les espaces liquidiens intercellulaires ou interstitiels. Ces derniers communiquent avec le liquide cérébrospinal, dynamique, sous pression, renouvelé par un mécanisme continu de sécrétion-résorption au taux de 500 ml par 24 heures, de localisation extra cérébrale dans les espaces sous-arachnoïdiens, et intra cérébrale dans les ventricules (Fig. 1).

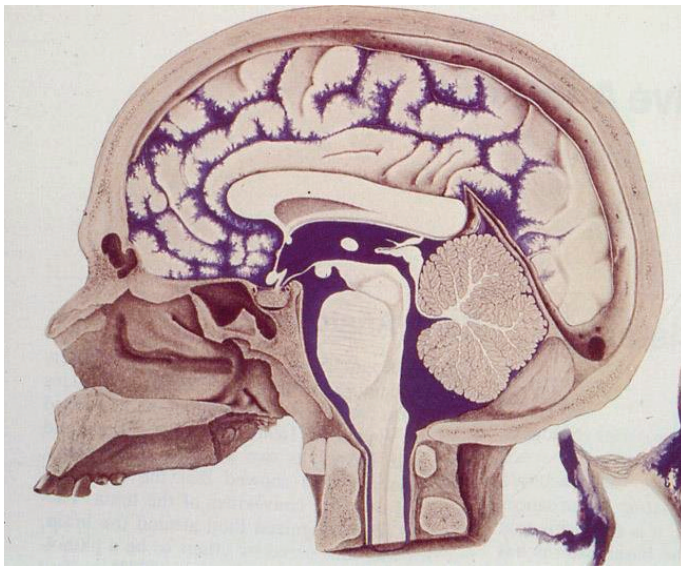


Fig 1 : Dessin de W. Dandy (1886-1946), neurochirurgien américain, illustrant parfaitement une coupe sagittale de l'extrémité crânio-encéphalique, avec le liquide cébrospinal (en bleu), intra et extra-cérébral.

Les propriétés biomécaniques du cerveau en font une structure plutôt molle, de consistance viscoélastique, un peu comme une éponge. Le liquide cébrospinal situé autour du cerveau circule dans un espace d'épaisseur variable selon les individus et les conditions physiologiques (position couchée, debout, effort, repos...). Ce liquide joue le rôle d'amortisseur en cas de choc, et de vecteur de substances chimiques indispensables au fonctionnement cérébral.

La masse encéphalique est entourée d'enveloppes méningées, dont une épaisse, accolée à la face interne des os de la boîte crânienne, la dure-mère ; elle reçoit de la surface du cerveau sous-jacent des veines de drainage, dites ponts, traversant l'espace liquidien. Sur sa face externe, elle comporte par ailleurs des vaisseaux, artères et veines, parfois incrustés dans l'os.

La boîte crânienne contenant l'ensemble est une structure rigide, de consistance dure et inextensible.

## BIOMECHANIQUE

L'anatomie particulière de l'extrémité crânio-encéphalique et l'organisation physiologique unique du tissu cérébral expliquent la complexité du champ pathologique susceptible de se produire en cas de choc crânien direct ou indirect.

Le choc direct comporte un impact sur le cuir chevelu et la boîte crânienne sous-jacente.

Le choc indirect ne comporte pas d'impact ; mais l'extrémité crânio-encéphalique subit un mouvement brutal d'accélération et de décélération, d'autant plus violent que la vitesse à laquelle il se produit, est élevée.

La dissipation de l'énergie mise en jeu par le traumatisme provoque dans le cerveau des dysfonctionnements. A sa surface et sur ses enveloppes, des lésions plus ou moins sévères, plus ou moins étendues, plus ou moins évolutives peuvent se produire. Les conséquences c'est-à-dire les troubles cliniques, temporaires et/ou définitifs, sont de nature et de gravité variées, d'installation immédiate ou différée.

Que le choc soit direct ou indirect, il est difficile d'en définir les caractéristiques biomécaniques exactes. Mais, il existe une « loi de proportionnalité » entre ces caractéristiques et les lésions provoquées, en phase aiguë et à long terme. Cette loi explique en partie la classification des traumatismes crâniens en trois niveaux : légers (*mild*), de gravité moyenne (*moderate*), graves (*severe*) (1).

Dans le domaine de la traumatologie crânienne au rugby, à propos des commotions cérébrales, on parle le plus souvent de traumatismes légers (*mild*).

Les observations nous montrent que la tête subit de fortes accélérations et/ou décélérations. Elle est accélérée par le coup qui la met en mouvement, ou décélérée par l'obstacle qui la freine ou la stoppe. Ce même mécanisme d'accélération/décélération est en jeu dans le mouvement de « coup de fouet » de la tête, insuffisamment maintenue par la musculature cervicale et la charnière crânio-cervicale (6).

L'exemple le plus schématisé en pathologie est le syndrome du bébé secoué, dont la tête posée sur une région cervicale à faible tonicité, subit des mouvements d'accélération/décélération d'avant en arrière, avec ébranlement du cerveau mobile dans sa boîte crânienne (Fig. 2).



Fig 2: Bébé secoué. La tête est accélérée d'avant en arrière. Le cerveau est séparé de l'enveloppe osseuse et méningée par un espace liquidien traversé par les veines ponts.

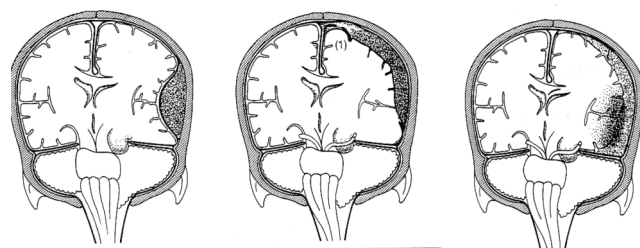
Les lésions produites dépendent de la direction de l'accélération subie, linéaire ou angulaire, déterminant la direction imposée à la tête et les grandeurs physiques mise en jeu.

## LES LÉSIONS ET LEURS MÉCANISMES PHYSIOPATHOLOGIQUES

Deux grands types de lésions sont susceptibles de se produire : les hémorragies intracrâniennes, les commotions cérébrales.

### LES HÉMORRAGIES INTRACRÂNIENNES

Dans le cas d'un impact direct compliqué d'une fracture de la boîte crânienne, la dure-mère et ses vaisseaux, accolés ou incrustés, peuvent se déchirer. Il se produit alors une hémorragie, un hématome extradural (fig. 3 A), pouvant se développer «à bas bruit» pendant plusieurs heures, avec au début un intervalle clinique dit libre, sans symptômes. Dans un premier temps, l'éponge cérébrale tolère la compression ; dans un deuxième temps, sa compliance s'épuise et les symptômes apparaissent sous la forme de céphalées, de vomissements, de somnolence, et à l'extrême de paralysie et de coma. Dès le premier trouble clinique, l'urgence neurochirurgicale est absolue. L'hématome doit être évacué et le vaisseau blessé coagulé.



A- hématome extradural B- hématome sous dural aigu C- hématome sous dural et contusion de la surface cérébrale

Fig. 3 (d'après Cohadon F.)

Hormis ce cas particulier de l'hématome extradural, dans le cas d'un choc direct ou indirect, il peut se produire un ébranlement ou un secouement de la masse encéphalique, dans son enveloppe rigide et inextensible. Une des conséquences est la déchirure des veines-ponts, avec une hémorragie à la surface du cerveau ; il se constitue alors un hématome sous-dural aigu (*fig. 3 B*), qui est également une urgence neurochirurgicale absolue, avec le risque de l'installation rapide d'une hypertension intracrânienne mortelle. La pression intracrânienne trop élevée entre en concurrence avec la pression artérielle assurant la perfusion cérébrale, et à terme, il se produit un arrêt circulatoire. Les premiers

symptômes apparaissent rapidement après le traumatisme, le plus souvent sous la forme de céphalées et de vomissements.

Les hémisphères cérébraux d'un poids total moyen de 1,100 Kg semblent être les structures les plus exposées. Ils peuvent être touchés en surface, sous la forme de contusions caractérisées par un aspect de piqueté hémorragique souvent associé à un hématome sous dural (*fig. 3 C*).

L'architecture particulière du crâne, de forme ovoïde allongée, explique que les contusions se localisent le plus souvent aux extrémités antérieures (lobe frontal et lobe temporal) ou postérieure (lobe occipital) des hémisphères, où des pressions positives se produisent, quels que soient le point d'impact et l'accélération subie (linéaire ou angulaire). Ces contusions peuvent être limitées en surface et difficilement visibles en imagerie particulièrement au scanner, ou étendues en profondeur avec une extension détruisant plus largement la substance cérébrale.

## LES COMMOTIONS

Les problèmes posés par les commotions cérébrales sont plus complexes.

Dans le monde du sport, leur gravité et leurs effets délétères ont été longtemps banalisés, avec une prise de conscience plus précoce dans les pays anglophones qu'en France (7).

Les mécanismes en jeu ne sont pas parfaitement connus. Leur complexité est liée à un certain nombre de facteurs déjà cités, difficiles à analyser, particulièrement le lieu exact du point d'impact, la direction imposée à la tête, les grandeurs physiques mises en jeu, leur valeur quantitative, leur durée d'application, le taux de l'accélération, linéaire, angulaire ou rotatoire.

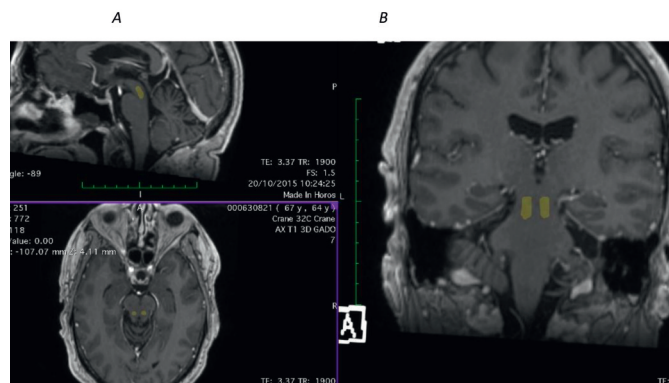
Il est cependant admis que les contraintes résultant d'une accélération à composante plutôt angulaire transmettent un ébranlement à l'encéphale, dont le centre de rotation est le mésencéphale.

Cette structure, située à la partie haute du tronc cérébral, devient vulnérable en cas d'ébranlement des hémisphères cérébraux. Il s'agit en effet d'une tige fragile de deux centimètres de diamètre environ, enchâssée à la base des deux hémisphères d'un poids moyen de 550 grammes chacun (*Fig. 4*). Les forces mises en jeu s'appliquent directement sur les axones (8) conduisant le signal électrique et donc l'information le long des voies, courtes ou longues, entre les différents centres neuronaux, de localisation superficiels dans le cortex, ou profonde dans les noyaux gris centraux et le tronc cérébral.

La formation réticulée du mésencéphale (9), particulièrement impliquée à ce niveau dans la régulation de la vigilance (veille-sommeil) et dans le système activateur ascendant du cortex encéphalique, serait ainsi l'épicentre de la secousse. Elle pourrait subir des altérations neuronales fonctionnelles temporaires (troubles de la conscience, difficultés de la perception du monde extérieur), ou structurales définitives pouvant se compliquer à l'extrême d'un coma durable.

Pour d'autres auteurs, si le centre du mouvement est bien le mésencéphale, les contraintes atteignent en premier lieu la

périphérie de l'encéphale, avant de devenir centripètes vers le tronc cérébral et le mésencéphale, en fonction de la violence de l'impulsion subie (1) (10).



**Fig 4:** IRM encéphalique A- coupe sagittale médiane en haut, horizontale en bas, passant par le mésencéphale (en rouge). B- coupe frontale passant par le mésencéphale enchâssé à la profondeur des deux hémisphères. Le corps calleux est la structure située au-dessus des 2 ventricules latéraux, remplis de liquide cérébrospinal (en noir sur le cliché).

Il est important de préciser qu'entre la perte de connaissance brève et le coma végétatif, le degré des dysfonctionnements ou des lésions générées ne dépend pas de la nature des mécanismes en cause, mais seulement de la grandeur des forces physiques mises en jeu. Autrement dit, si l'accélération angulaire est minime, seules les zones superficielles sont touchées et il se produit une simple suspension fonctionnelle par dépolarisation ; c'est la commotion «simple». Si les forces en jeu deviennent plus importantes, la dépolarisation s'étend en profondeur et les lésions apparaissent. Quand elles atteignent le tronc cérébral, les troubles de la conscience sont évidents, éventuellement prolongés, et à l'extrême irréversibles.

Le corps calleux (*fig. 4 B*), commissure ou voie de communication la plus importante entre les deux hémisphères, pourrait être soumis à des phénomènes de cisaillement par l'ébranlement de chacun d'eux. Son rôle est d'assurer une harmonisation des différentes fonctions ; son atteinte se traduit par des troubles cliniques complexes et variés, dits de disconnexion inter-hémisphérique, dont les plus connus sont la perte de la coordination des mouvements (ataxie), les pertes d'équilibre, les pertes de mémoire.

Sur le plan neurobiologique, il est admis qu'un ébranlement entraînerait une excitation neuronale concomitante d'une dépolarisation des membranes plus ou moins étendue ; il se produirait alors des mouvements ioniques transmembranaires anormaux (fuite extracellulaire de potassium, flux de sodium et de calcium), et une libération en excès de neurotransmetteurs modifiant le fonctionnement cérébral (11). Parmi eux, le glutamate altère la transmission synaptique inter neuronale (12) alors que l'acétylcholine activerait un système inhibiteur. Ces processus pourraient être à la base de la perte de connaissance initiale, et du ralentissement de certaines activités comportementales. Le trafic neuronal est perturbé dans le tronc cérébral, lieu de libération de l'acétylcholine, et à distance, au niveau des récepteurs cholinergiques avec des dommages cellulaires à plus long terme ou même définitifs. Ces résultats sont issus de l'expérimentation animale et leur application en clinique humaine doit être prudente dans l'explication des séquelles neurologiques et psycho-affectives.

Un autre mécanisme a été décrit de longue date (13). Il compare d'une part la commotion avec perte de connaissance à une crise d'épilepsie généralisée comportant des crises tonico-cloniques, et d'autre part la commotion sans perte de connaissance avec une crise d'épilepsie de type absence. Cette théorie repose sur le fait qu'après l'impact, le cerveau se trouverait en état d'hyperexcitabilité, consécutif à une dépolarisation étendue des membranes neuronales. Cette théorie, séduisante, reste marginale pour certains auteurs (1) (9).

A la phase aiguë, au moment du traumatisme et dans les suites immédiates, il est difficile de quantifier l'importance de l'excitation neuronale déclenchée, et de prévoir sa toxicité potentielle. Un rétablissement du déséquilibre ionique par les pompes sodium/potassium est nécessaire, avec une demande énergétique cellulaire importante, et une surconsommation de glutamate.

Cette cascade d'évènements est susceptible de s'intriquer avec des réponses vasculaires inadaptées, à l'échelle de la microcirculation, comportant le risque d'effets potentialisateurs délétères à l'échelle moléculaire.

Si les désordres induits par la dépolarisation rendent compte de la perte de connaissance et de la symptomatologie initiale, la toxicité potentielle de ces désordres neuronaux explique les troubles cliniques secondaires. L'altération plus ou moins durable du traitement du signal dans les réseaux neuronaux concernés, généralement les plus complexes, pourrait expliquer l'altération de fonctions telles que la coordination du mouvement, les troubles de l'équilibre, la mémoire, l'attention-concentration, les capacités visuo-constructives, l'humeur et le sommeil.

Des désordres endocriniens sous la forme d'une diminution du taux de cortisol circulant sont également décrits, particulièrement chez les enfants ou les adolescents (14). La physiopathologie de ce désordre est incertaine, mais pourrait être liée à un dysfonctionnement de l'axe hypothalamo-hypophysaire, véritable tour de contrôle de notre système endocrinien, situé à la base des hémisphères, au-dessus du mésencéphale.

Un point particulier doit être évoqué, celui des accélérations intenses et soutenues qui surviennent d'emblée. Elles sont à l'origine de phénomènes plus mécaniques, sous la forme d'étirements et de déformations, compliqués de troubles vasculaires et oedémateux. Les axones subissent alors des altérations structurales définitives à type d'élongations ou de ruptures, pouvant atteindre plusieurs millions de neurones.

## LES CONSEQUENCES A LONG TERME

Les commotions cérébrales, quels que soient leur mécanisme et leur gravité, posent le problème de leurs conséquences à long terme (15) et particulièrement de l'encéphalopathie chronique post-traumatique.

Parmi les facteurs aggravants et de mauvais pronostic, la répétition des chocs crâniens et le «second impact» paraissent déterminants.

L'expérimentation animale montre clairement une plus grande vulnérabilité cérébrale à un second impact et à la répétition des chocs. En clinique humaine, les observations semblent indiquer que la gravité des conséquences est d'autant plus importante que le sujet est encore symptomatique et en phase de récupération (16) (17).

Sur le plan des mécanismes et de la physiopathologie, l'expérimentation révèle la présence d'une accumulation de protéine tau devenue anormale par excès de phosphorylation, alors même qu'elle est impliquée dans la construction, l'architecture et la stabilité des neurones. Ce phénomène s'associe à une production accrue de protéines alpha bêta-amyloïdes anormales, issues de la chaîne métabolique «amyloïdogénique» normale ; ces protéines ne jouent plus, dès lors, leur rôle protecteur dans la plasticité neuronale et finissent par s'agglutiner en plaques amyloïdes, localisées dans les zones commotionnées et à distance de celles-ci (18).

Ces lésions neuropathologiques sont trouvées dans la maladie d'Alzheimer, avec la présence de plaques amyloïdes anormales en périphérie des artérioles corticales. La conséquence serait un dysfonctionnement du tissu glial, avec des mécanismes chimiques complexes aboutissant à une dégénérescence neurofibrillaire (19).

Aux Etats-Unis, l'examen macroscopique de cerveaux d'anciens boxeurs (20) a révélé une augmentation de la taille des ventricules cérébraux, compatible avec une hydrocéphalie. Celle-ci pourrait être la conséquence d'un trouble de la circulation-résorption du liquide cérébrospinal, à la suite de microhémorragies passées inaperçues, générant des réactions inflammatoires et un colmatage partiel des voies de circulation du liquide. Des zones d'atrophie du cortex cérébral et du cervelet ont aussi été observées, avec à l'examen microscopique des dépôts de plaques amyloïdes et une dégénérescence neurofibrillaires autour des vaisseaux corticaux.

En 2012, l'Ecole de Boston (21) a publié un travail dont l'importance est considérable dans la compréhension de l'encéphalopathie chronique post-traumatique. Soixante-quatre cerveaux d'athlètes ayant subi des traumatismes crânio-encéphaliques à répétition ont été examinés. Macroscopiquement, des atrophies corticales et une augmentation de la taille du système ventriculaire a été relevée dans certains cas, les plus symptomatiques, sous la forme de syndromes démentiels. A l'examen microscopique, des dégénérescences neurofibrillaires ont été trouvées de façon localisée ou diffuse, ainsi que la présence de protéine tau en péri-vasculaire, et de façon plus inconstante de dépôts de protéines bêta-amyloïdes. Différentes régions encéphaliques étaient concernées, frontale, temporale, basale hypothalamique. Des séquelles d'hémorragies punctiformes étaient plus rarement décrites.

Les variations interindividuelles dans la sensibilité aux traumatismes crânio-encéphaliques et dans leurs conséquences, nous invitent à évoquer des facteurs génétiques de prédisposition ou de protection.

Le risque de développer une maladie d'Alzheimer serait dix fois plus important chez les sujets ayant des antécédents de traumatisme crânien et porteurs de l'homozygotie E4 à l'endroit de l'apo lipoprotéine E (22). Cette protéine, chez les sujets homozygotes E4, serait défectueuse pour le drainage des protéines bêta-amyloïdes dans les suites du traumatisme, dont l'accumulation est toxique pour le système glial et donc neuronal. En revanche, le rôle protecteur de l'absence de E4 n'est pas clairement prouvé et doit faire l'objet d'études complémentaires.

En synthèse, la corrélation des résultats de l'expérimentation animale et des autopsies d'athlètes victimes de traumatisme crâniens répétés, avec les caractéristiques neuropathologiques de la maladie d'Alzheimer (accumulation de protéines tau, d'alpha-bêta-amyloïdes, de plaques amyloïdes, dégénérescences neurofibrillaires, atrophie corticale), tend à démontrer que l'encéphalopathie chronique post-traumatique s'apparente à une maladie dégénérative type Alzheimer.

Le point d'ombre est le facteur déclenchant, ou épine irritative, qui par définition est différente pour les maladies dégénératives type Alzheimer sans traumatisme et l'encéphalopathie post-traumatique. Comme dans beaucoup de situations pathologiques, il convient d'évoquer l'intrication de mécanismes génétiques facilitateurs ou protecteurs ainsi que de facteurs environnementaux ou épigénétiques du même type.

La physiopathologie de la survenue d'une maladie de Parkinson ou d'une maladie de Charcot post-traumatique est moins bien connue. Dans les formes atypiques de Parkinson, la dilatation des ventricules cérébraux pourrait jouer un rôle ainsi qu'une accumulation de protéines anormales.

## DIAGNOSTIC CLINIQUE ET COMPLEMENTAIRE

Sur le terrain, en cours de compétition, le diagnostic est difficile à l'exception de la survenue d'une perte de connaissance qui ne se produit que dans 15 % des commotions (23).



Dans les autres cas, en l'absence de perte de connaissance, les symptômes, quel qu'ils soient (troubles de l'équilibre, désorientation temporelle et spatiale, troubles de la mémoire immédiate, de l'attention-concentration, céphalées, vomissements...), peuvent être la conséquence de la commotion cérébrale elle-même ou de désordres multiples, dont le diagnostic est incertain. Il peut s'agir d'une fatigue extrême, d'un trouble métabolique (hypoglycémie par exemple), d'un trouble de l'hydratation, ou même de la commotion d'autres structures, les plus exposées étant le cœur et le système nerveux neuro-végétatif, le plexus coeliaque dans la cavité abdominale en particulier, véritable centre périphérique du fonctionnement des viscères de la cavité abdomino-périnéale.

Les explorations complémentaires, et particulièrement l'imagerie par scanner ou mieux par IRM, sont sans anomalies dans l'immense majorité des cas, notamment si une évolution favorable intervient dans les quelques minutes, les quelques heures ou même les quelques jours qui suivent le traumatisme.

Dans un deuxième temps, certaines séquences IRM, diffusion, tractographie, spectroscopie, IRM fonctionnelle, encore du domaine de la recherche clinique pour l'exploration des commotions cérébrales (24), trouvent des anomalies :

- en diffusion, diminution des index d'anisotropie (diffusion des molécules d'eau dans le sens des fibres à l'état normal), associée en tractographie à un appauvrissement de certains faisceaux de fibres neuronales dans la substance blanche (Fig.5) ;

- en spectroscopie, modification du pic de N-acétylaspartate (fabriqué dans les neurones, jouant un rôle dans la myélinisation à partir du tissu glial, et la production énergétique mitochondriale) ;

- en IRM fonctionnelle, modification du signal au cours de tâches cognitives, particulièrement dans le domaine de la mémoire épisodique (25), ou de travail (26).

Certains auteurs estiment qu'il s'agit d'anomalies «subtiles» ou discrètes, difficiles à caractériser, mais essentielles pour le pronostic et le retour éventuel au jeu (27).

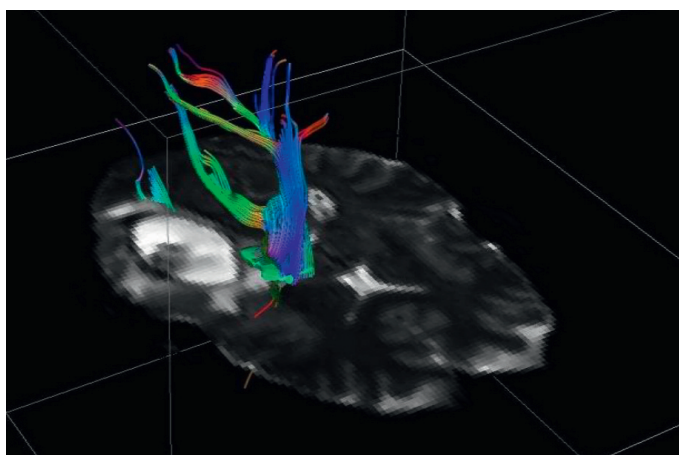


Fig.5 : IRM, coupe horizontale passant par un foyer hémorragique, avec en limite des faisceaux de fibres axonales (en bleu et vert).

Les tests neuropsychologiques cliniques et l'électrophysiologie, particulièrement les potentiels évoqués cognitifs (28), constituent une aide précieuse au diagnostic. Ils n'interviennent cependant que secondairement une fois les phases aiguë et subaiguë passées.

Des recherches ont été conduites sur le dosage dans le sang de marqueurs tels que la protéine gliale S 100 bêta dont le taux est corrélé de façon hautement significative à la survenue d'un traumatisme crânien. Le passage dans le sang de cette protéine, présente dans les cellules gliales et le liquide

interstitiel, serait le résultat d'une rupture de barrière hémato-encéphalique et donc d'une souffrance cérébrale (29). Certains clubs utilisent ce dosage pour argumenter le diagnostic clinique de commotion et exercer une surveillance biologique. L'autorisation de reprendre l'entraînement et la compétition n'est accordée qu'après le retour au taux de base propre à chaque joueur enregistré en début de saison (30).

Les commotions constituent un champ pathologique particulier, avec dans la grande majorité des cas, après la phase initiale, un retour à la normale, sans prédiction possible de la survenue d'une encéphalopathie chronique post-traumatique à long terme. Le diagnostic de lésions microscopiques, non visibles en imagerie conventionnelle, ne peut être évoqué qu'en présence de troubles neurologiques ou psycho-affectifs persistants, authentifiés alors par les tests neuropsychologiques, les explorations en imagerie fonctionnelle et les potentiels évoqués cognitifs.

## L'AVENIR

La pratique du rugby moderne, professionnel, inquiète.

Les commotions cérébrales se multiplient, dans le contexte d'une augmentation de l'ensemble des blessures. Les chocs sont violents, l'évolution du jeu se tourne vers l'affrontement direct, au détriment de l'évitement. Le gabarit des pratiquants, particulièrement des professionnels, a considérablement augmenté depuis une quinzaine d'années. Le rapport de la taille au poids est donné par l'Indice de Masse Corporel (IMC). La normalité physiologique de l'IMC veut qu'un homme de 180 cm pèse 75 Kg. Il est aujourd'hui courant de voir un joueur de rugby peser 100 kg pour une taille comprise entre 185 et 190 cm. Ce surpoids est exclusivement lié à l'augmentation de la masse musculaire, la masse grasseuse se trouvant le plus souvent à des taux inhabituellement bas, autour de 10 %, le taux «normal» pour un homme étant de 17 %.

Les os, les articulations, les tendons et les viscères, dont fait partie le cerveau, n'ont pourtant pas suivi l'évolution de la musculature, que ce soit dans leur composition ou dans leur solidité. Ces structures sont soumises à des forces physiques majeures, à l'origine de blessures plus nombreuses et plus graves.

Les dangers fonctionnels et vitaux des blessures soulignent la nécessité d'une information rigoureuse des encadrements sportifs, médicaux et paramédicaux, jusqu'aux instances au plus haut niveau. Les lésions ostéo-articulaires bénéficient des progrès de l'imagerie pour leur diagnostic et de ceux de la médecine et de la chirurgie pour leur traitement.

Les viscères et particulièrement le cerveau posent des problèmes plus complexes. Le traitement curatif de la commotion n'existe pas. La seule conduite à tenir est le repos et/ou l'arrêt du sport en cause. Les séquelles à long terme sont imprévisibles, avec le spectre de l'encéphalopathie chronique post-traumatique, notamment en cas de traumatismes répétés.

Le port du casque, sujet à controverse, est un moyen de protection efficace contre les chocs directs comportant le risque d'une fracture de la boîte crânienne. Par contre, il est facile de comprendre son inefficacité sur les secouements ou les ébranlements de la masse cérébrale, que ces derniers surviennent à l'occasion d'un choc direct ou indirect. Certains évoquent même une cause d'aggravation des commotions, la tête portant le casque étant plus lourde et dès lors soumise à des mécanismes d'accélération/décélération plus forts.

## RÉFÉRENCES :

- 1- Cohadon F, Castel JP, Richer E, et al., Les traumatisés crâniens, de l'accident à la réinsertion, *Arnette*, 3<sup>e</sup> éd., 2008.
- 2- Cain N, Rugby, Histoire du Rugby, le jeu du Rugby, Flammarion, 2007.
- 3- Bouthier D, Le rugby, PUF, *Que sais-je*, 2007.
- 4- Fitzpatrick AC, Naylor AS, Myler P, Robertson C, A three-year prospective cohort study of rugby league match injuries from the European Super League, *J Sci Med Sport*, 2018, feb. 21 (2) : 160-165.
- 5- Gardner A, Iverson G., Levi CR, et al., A systematic review of concussion in rugby league, *Br J Sports Med*. 2015; 49 : 495-498.
- 6- Ommaya AK, Grubb RC, Naumann RA, Coup and contre coup injury. Observations on the mechanics of visible brain injuries in the rhesus monkey, *J Neurosurgery*, 1971 ; 35 : 503-516.
- 7- Vidalin H, Chermann JF, Stiernon T ... Chazal J, Les commotions cérébrales et le sport, *J Traumatol Sport*, 2010 ; 27 : 83-93.
- 8- Gennarelli TA, Thibault LE, Adams JH et al., Diffuse axonal injury and traumatic coma in the primate, *Ann. Neurol*, 1982 ; 12 : 564-574.
- 9- Ropper AH, Gorson KC, Concussion, *N Engl J med*, 2007 ; 356 : 166-172.
- 10- Buki A, Povlishock JT, All roads lead to disconnection ? Traumatic axonal injury revisited, *Acta Neurochir*, 2006 ; 148 : 181-194.
- 11- Giza CC, Hovda DA, The new neurometabolic cascade of concussion, *Neurosurgery*, 2014; 75 : 524-533.
- 12- Katayama Y, Becker DP, Tamura T, Hovda DA, Massive increases in extracellular potassium and the indiscriminate release of glutamate following concussive brain injury, *J Neurosurg*, 1990; 73 : 889-900.
- 13- Walker A.E, The physiological basis of concussion: 50 years later, *J Neurosurgery* 1994, 81(3) : 493-494.
- 14- Ritchie EV, Emery C, Debert CT, Analysis of serum cortisol to predict recovery in pediatric sport-related concussion, *Brain inj.*, 2018 ; 32(4) : 523-528.
- 15- De Beaumont L, et al., Brain function decline in healthy retired athletes who sustained their last sports concussion in early adulthood, *Brain*, 2009, 132 (3) : 695-708.
- 16- Zemper, E.KD, Two years prospective of relative risk of a second cerebral concussion, *Am J Med Rehabil*, 2003, 82(9) : 653-659.
- 17- Laurer HL, Bareyre FM et al., Mild head injury increasing the brain's vulnerability to a second concussive impact, *J Neurosurg*, 2001, 95(5) : 859-870.
- 18- Uryu KH, Laurer H et al., Repetitive mild brain trauma accelerates. Abeta deposition, lipid peroxidation, and cognitive impairment in a transgenic mouse model of Alzheimer amyloidosis, *J Neurosci*, 2002, 22(2) : 446-454.
- 19- Dubois B, Feldman H, Jacova C. et al., Research criteria for the diagnosis of Alzheimer's disease: revising the NINCDS-ADRDA criteria, *Lancet neurol*, 2007, - : 734-746.
- 20- Corsellis JA, Bruton CJ, Freman-Brown D, The aftermath of boxing, *Psychol Med* 1973; 3 270-303.
- 21- McKee AC, Stern RA, Nowinski CI, et al, The spectrum of disease in chronic traumatic encephalopathy, *Brain*, 2012 ; 136 : 43-64.
- 22- Mayeux R, Ottman P, Maestre G et al., Synergistic effects of traumatic head injury and apolipoproteine epsilon 4 in patients with Alzheimer's disease, *Neurology*, 1995 ; 45: 555-557.
- 23- Dikmen S, Machamer J et al., Rates of symptom reporting following brain injury, *J Int Neuropsychol soc*, 2010 ; 38: 2045-2049.
- 24- Aoki Y, Inokuchi R et al., Diffusion tenseur imaging studies of mild traumatic brain injury : a meta-analysis, *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2012, 83 : 870-876.
- 25- Ford JH., Giovanello KS, Guskiewicz KM, Episodic memory in former professional football players with a history of concussion : an event-related functional neuroimaging study, *J Neurotrauma*, 2013, 30 : 1683-1701.
- 26- Palacios EM, Sala-Llonch R, Junque C et al., White matter integrity related to functional working memory networks in traumatic injury, *Neurology*, 2012, 78 : 852-860.
- 27- Guenette JP, Shenton ME, Koerte IK, Imaging of concussion in young athletes, *Neuroimaging Clin N Am*, 2018, 28(1) : 43-53.
- 28- Thériault M, Investigations par les potentiels évoqués des effets de multiples commotions cérébrales chez les athlètes, Thèse Ph.D., -Recherche et intervention, psychologie option. neuropsychologie clinique, 2009, Université de Montréal.
- 29- Plaines UE, Morganti-Kossmann MC, Rancan N et al., S 100 beta reflects the extent of injury and outcome whereas neurological specific enolase is a better indicator of neuroinflammation in patients with severe traumatic injury, *J Neurotrauma*, 2001, 18 : 491-511.
- 30- Bouvier D, Duret T, Abbot M, Stiernon T, Pereira B, Coste A, Chazal J, Sapin V, Utility of S100B serum level for the determination of concussion in male rugby players, *Sports Med*, 2017, apr; 47(4) : 781-789.

# UNE JOURNÉE EN CORRÈZE

(Compte-rendu rédigé par Michel MASSAUX)

Le 5 juin 2018, un groupe de 37 participants prenait joyeusement la route de la Corrèze par l'autoroute A89. La journée s'annonçait ensoleillée, mais les jours précédents incitaient à la méfiance ; les plus prudents d'entre nous s'étaient munis de parapluies, la suite montrera qu'ils avaient été bien inspirés...

Le premier objectif de la sortie était la visite, à partir de 10 heures, de la fabrique d'accordéons MAUGEIN, près de Tulle, la dernière encore en activité en France.

L'entreprise a été créée en 1919, sous la forme d'un petit atelier occupant 4 ouvriers, par Jean MAUGEIN, précédemment accordeur de pianos. Le succès venant, Jean s'associe avec ses deux frères Antoine et Robert en fondant la Société Maugein Frères, dont la réputation gagna rapidement la France entière. Produisant initialement des instruments diatoniques, l'Entreprise s'orienta, à partir de 1925, vers la fabrication, plus élaborée, d'accordéons chromatiques, ce qui exigea deux déménagements successifs dans des locaux plus vastes, toujours à Tulle.

En 1945, Georges, le fils d'Antoine, rejoint la Manufacture qui bénéficie de l'engouement populaire pour l'accordéon : c'est l'effet simultané de l'après-guerre et du succès d'un instrumentiste corrézien très actif : Jean SEGUREL, qui met en valeur avec brio le folklore local.

En 1984, il faut moderniser les méthodes de fabrication. L'entreprise s'installe dans la zone industrielle de Mulatet, à la sortie de Tulle, sur la route de Brive, dans un environnement campagnard, loin des bruits de la ville.

C'est là que nous étions attendus, peu après 10 h. La visite commence dans une salle d'exposition où sont réunis des accordéons de toutes sortes, depuis les plus anciens comportant une douzaine de touches, jusqu'à ceux d'aujourd'hui qui en possèdent au moins 10 fois plus. À côté d'instruments pour débutants, qui peuvent être produits en petites séries, MAUGEIN réalise des accordéons personnalisés dont les caractéristiques ont été définies par l'instrumentiste lui-même. De ce fait, la fabrication est purement manuelle. Assurée par un personnel très spécialisé, dont 30% de femmes, elle comporte un aspect artistique qui associe harmonieusement tradition et modernisme. Il faut plus de 100 heures de travail pour produire un accordéon, en partant des matières premières (bois, métaux, carton, tissu, feutre,...) jusqu'au montage et surtout aux nombreux réglages qu'exigent les divers mécanismes de commande. Le poids d'un instrument peut atteindre 13 kg, et le prix jusqu'à 15.000 €. Le marché actuel ne faiblit pas, car certains compositeurs introduisent l'accordéon pour diversifier les sonorités symphoniques dans des concerts de musique moderne.

Après ce tour d'horizon de l'activité de l'entreprise, nous suivons les étapes de la fabrication, en nous arrêtant à chaque poste de travail, notre guide nous expliquant en détail les opérations qui y sont effectuées. Le parcours commence par un atelier consacré à l'ébénisterie. C'est là qu'on réalise la «caisse» de l'accordéon, les «sommiers», supports internes aux formes complexes qui canalisent l'air dans l'instrument, les cadres et les soufflets qui assurent la mise en pression du volume interne nécessaire à la production des sons. On utilise ici le carton pour les soufflets, et surtout le bois pour la caisse et les sommiers. L'essence privilégiée est l'aulne : c'est un bois léger, qu'on laisse sécher plusieurs années. Il est facile à travailler, sans se fendre, et surtout ses qualités acoustiques sont remarquables. D'autres bois, plus durs, sont également



Collection des accordéons Maugein de tous âges  
(photo Gérard Mouillaud - Adasta)

transformés ici en petits composants : cales, taquets, baguettes, mis en œuvre au montage final.

L'atelier suivant prépare les pièces maîtresses de l'instrument, les «plaquettes musique». La source sonore repose sur le principe de l'anche libre, lamelle métallique mise en vibration par la poussée de l'air qui s'exerce sur elle. Elle est découpée dans une bande d'acier spécial, puis usinée et meulée... Chaque anche fournit une note, dont la justesse est affinée sur machine. Elle est ensuite fixée sur la «plaquette musique» en duralumin. Dans un accordéon chromatique, chaque plaquette comporte 2 anches identiques, donc produisant la même note, à l'extension ou à la compression du soufflet.

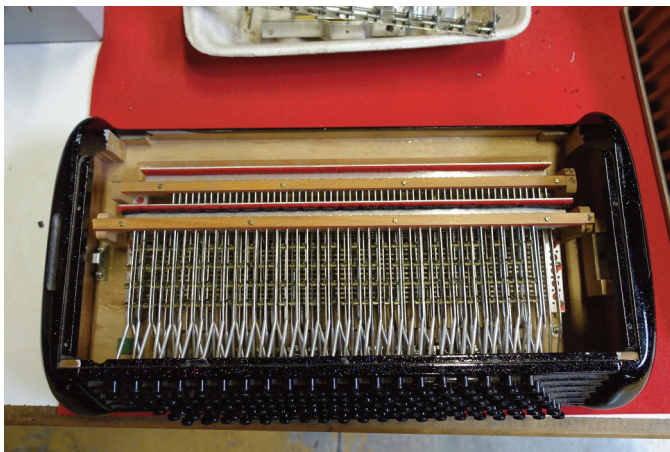
Les plaquettes sont ensuite collées à la cire d'abeille dans des alvéoles ménagées sur les sommiers. Le nombre de ceux-ci est fixé par la tessiture choisie pour l'instrument. Il faut procéder alors à un contrôle minutieux des sommiers : cette opération est réalisée par un spécialiste ayant l'oreille «intégrale», percevant très exactement la note voulue sans l'aide d'un instrument auxiliaire. Cela suppose, bien sûr, un long apprentissage !

La troisième étape, fondamentale, est la construction des claviers. La disposition des touches varie suivant le système adopté : italien (le plus répandu), belge ou français.

À la main DROITE, on trouve généralement, sur 4 rangs, 72 touches ; elles actionnent des tiges métalliques qui aboutissent à des soupapes commandant l'ouverture ou la fermeture du passage de l'air vers les anches correspondantes ; il faut également des ressorts pour rappeler les touches, en assurant le «nerf», mais aussi la douceur, du clavier.

À la main GAUCHE, de 60 à 120 boutons permettent d'obtenir des accords pré-établis qui interviennent surtout dans le répertoire concertant. Sous la «table» du clavier se trouve une véritable forêt de tiges d'acier, assemblées par soudure électrique, puis ajustées une à une pour réaliser les accords voulus : majeurs, mineurs ou autres. C'est là que la personnalisation de l'instrument prend toute son importance, en jouant sur la puissance des sons émis.

La dernière étape est le MONTAGE. Elle consiste à assembler la multitude d'ensembles, de sous-ensembles et de pièces détachées (jusqu'à 8.000 !), constituant un accordéon. L'opération est, on s'en doute, très minutieuse. Elle s'achève par une longue séquence de réglages qui concernent les différents mécanismes. C'est seulement quand l'instrument a franchi tous les tests de contrôle qu'il est estampillé «bon pour le service».



Mécanisme monté (photo André Schneider – Adasta)

L'organisation parfaite de la visite nous amena vers midi à la fin du parcours dans les ateliers. Il était temps de rejoindre le restaurant « A nos papilles », dans le village très coquet de Saint-Viance, au Nord de Brive. Ce fut une halte très appréciée, dans un cadre reposant, où le service attentionné nous régala d'un excellent repas.

Le programme de l'excursion mentionnait un passage à la chapelle du Saillant, sur la commune de Voutezac, près d'Allassac, pour admirer des vitraux dessinés par Marc Chagall. Pour ne pas retarder notre rendez-vous aux ardoisières, l'après-midi, nous avons décidé d'annuler cette étape, qui risquait d'être trop brève, et d'aller directement à Travassac, près de Donzenac, toujours dans les environs de Brive.

Le trajet, par une route pittoresque mais sinueuse, nous amena à admirer l'architecture élégante de l'habitat rural. C'est une véritable leçon de géologie appliquée qui nous fut offerte. On passe, en quelques kilomètres, d'un village construit en grès rouge à un secteur où dominent les schistes. C'est l'une des caractéristiques majeures de la géographie physique d'un territoire appelé « BASSIN DE BRIVE », transition entre le Massif Central, continental, et l'Aquitaine, dominée par l'Océan.



Ardoise polluée par la pyrite (Photo Gérard Mouillaud – Adasta)

A travers les ères géologiques, cette région est toujours restée une dépression, parfois envahie par la mer, en bordure d'un massif granitique au relief plus affirmé, le LIMOUSIN. L'érosion permanente de celui-ci a produit de grandes quantités de sédiments qui se sont déposés dans les fosses voisines de façon sélective, en fonction de la densité et la granulométrie des matériaux entraînés.

La décomposition du granite conduit à libérer des grains de quartz qui sont restés intacts au cours de l'évolution ultérieure. Le feldspath, en revanche, s'est transformé en minéraux argileux dont la composition chimique est variable, mais qui se présentent toujours en très petits cristaux. Leur faciès en plaquettes, souvent hexagonales, favorise le litage. Le mica noir, de son côté, produit des hydroxydes de fer solubles, responsables de la couleur rouille des dépôts en place.



Vue sur les pans et une perce (photo Pierre Brye - Adasta)

Il se forme aussi des minéraux secondaires (pyrite par exemple).

Là où les sédiments contiennent une forte proportion de quartz, apparaissent des grès à grain plus ou moins fin. Autrefois, on en faisait des meules, mettant à profit le caractère abrasif du quartz. C'est par ailleurs une pierre à bâtir très estimée car elle est facile à tailler. Sa couleur dépend du liant qui a cimenté les grains : rouge s'il contient du fer, vert lorsque le dépôt s'est fait en milieu marin, où apparaît un minéral argileux particulier, la glauconie, vert-pâle à l'origine, mais qui brunit petit à petit à l'air.

Si les sédiments contiennent peu de quartz, ils sont entraînés comme de la boue et se déposent, là où le courant diminue, sous formes de «pélites» (en grec, «pelos» signifie boue). Au cours des âges, ces dépôts, initialement meubles, vont durcir en conservant une stratification très fine : ils forment alors des bancs de schistes, souvent de couleur sombre. C'est précisément le cas des schistes ardoisiers qui affleurent à plusieurs endroits dans le secteur d'Allassac, et en particulier à proximité du petit village de Travassac.

C'est là que nous sommes attendus pour une visite guidée de l'ancienne exploitation d'ardoises, ouverte au XVII<sup>ème</sup> siècle et florissante au XIX<sup>ème</sup>. L'objectif était de remplacer la couverture en chaume des habitations, peu fiable sous la neige, par des toitures en «dur», assez lourdes pour résister au vent, et surtout rigoureusement imperméables.

La réputation des ardoises corréziennes dépassa rapidement les frontières régionales. Leur résistance aux intempéries est reconnue chez les professionnels. En outre, elles sont presque toujours exemptes d'inclusions sous forme de cristaux de pyrite, FeS<sub>2</sub>, fréquentes dans d'autres gisements (le soufre provient de la présence, au cours de la sédimentation, de bactéries qui tirent l'énergie, nécessaire à leur développement, d'émanations de sulfure d'hydrogène gazeux, H<sub>2</sub>S, courantes dans les zones marécageuses lacustres).

Aujourd'hui, l'activité se limite à la production d'ardoises de remplacement, réservées aux monuments historiques nationaux, comme l'Abbaye du Mont-Saint-Michel.



Contrôle des blocs "rebillés" (photo Pierre Brye – Adasta)

Dès l'entrée sur le site, apparaissent de hautes silhouettes de pierre, dressées vers le ciel : ce sont les PANS de TRAVASSAC. Ils représentent des bancs de schiste massif, dont la lamination insuffisante ne permettait pas de cliver régulièrement les blocs «rebillés» (grossièrement équarris pour pouvoir être transportés) afin d'obtenir des ardoises d'épaisseur convenable.

Entre ces murs impressionnants, nous parcourons un sentier qui montre la hardiesse des carriers qui ont vécu ici : nous remarquons en particulier des «perces», passages périlleux à travers les pans, des passerelles ou des plateformes vertigineuses, utilisées autrefois. En épuisant progressivement les filons d'accès facile, les ardoisiers furent contraints de poursuivre l'exploitation par puits et galeries, jusqu'à plus de 100 m de profondeur. C'est le risque permanent d'inondations subites qui obligea à cesser cette activité souterraine, vers 1980.

A la sortie du parcours guidé, nous sommes invités à une démonstration de taille d'ardoises, à l'ancienne, en plein air. A partir d'un bloc extrait sur place, le cliveur commence par vérifier l'homogénéité de la pierre : le son rendu par un coup de massette est un test infailible, mais il faut l'oreille d'un professionnel ayant une longue expérience pour garantir sa qualité.



Clivage des ardoises (photo André Schneider – Adasta)

Il faut ensuite examiner minutieusement le bloc, afin de déceler d'éventuelles fissures que n'aurait pas mis en évidence le test précédent. L'opérateur recherche aussi l'orientation de la schistosité, en général peu visible, appelée par les professionnels le «fil» de la pierre.

Ces examens qualitatifs sont essentiels pour la rentabilité de l'exploitation, car ils limitent les rebuts ; néanmoins, les pertes sont importantes : on estime que sur une tonne de schiste brut, on ne peut tirer que 200 kg d'ardoises commercialisables. Les chutes sont utilisées en maçonnerie traditionnelle.

Après validation, l'ardoisier procède à l'opération emblématique du métier : le clivage. Voir naître une ardoise est, pour le profane, une source d'émerveillement, car elle se détache souvent brusquement de son support. Il faut encore vérifier sa régularité et éliminer d'éventuels défauts d'aspect. Et, pour finir, on procède à la taille, en deux formats traditionnels : carré ou ogival.

Des normes existent, qui portent sur la masse au m<sup>2</sup> de la couverture réalisée. Avec les ardoises les plus fines, on trouve 30 à 35 kg par m<sup>2</sup>. Dans les régions au climat plus hostile ou en montagne, on retiendra plutôt des épaisseurs supérieures, conduisant à 50 ou 55 kg par m<sup>2</sup>.

Au cours de la visite du site, très encaissé et dans un environnement boisé, nous n'avons pas vu s'accumuler de gros nuages noirs au-dessus de nous... Ils eurent la mauvaise idée de se déverser brutalement sur la plateforme alors que nous admirions l'habileté du cliveur... A nos profonds regrets, la démonstration fut interrompue car aucune éclaircie n'apparaissait dans un ciel complètement plombé. Il fallut même supprimer le passage au petit musée de l'ardoisière, situé à quelque distance, tant l'averse était forte. Et c'est sous des trombes d'eau que se fit la quasi-totalité du retour aux Cézeaux, après un périple original tourné vers deux activités traditionnelles en Limousin.



Le groupe de l'Adasta en visite. (Photo Gérard Mouillaud - Adasta)

## Projets de conférences (les titres sont provisoires)

**Mercredi 16 janvier**

**Originalité de la Chaîne des Puys et de la Faille de Limagne** - Espace Mandela

**Mercredi 06 février**

**Histoire, enjeux et perspectives de la métrologie** - Espace Mandela

**Mercredi 20 mars**

**Molécules bio-sourcées et bio-gaz** - Espace Mandela

**Mardi 9 avril**

**Conférence surprise sur : Musique yéyé, scientisme et pseudo science** - Espace Mandela

**Mardi 14 mai 2019**

**La croissance des plantes : Perception et sensibilité chez les plantes** - Espace Mandela

**Mercredi 12 juin 2019**

**Le cycle benzénique : brique du vivant et délétère dans certaines molécules de synthèse**

Espace Mandela

## Programme des sorties et visites

**27-28 mars 2019 :**

petit séjour à l'ouest de Limoges :

- le premier jour sera consacré à l'examen des effets de la chute d'une grosse météorite à Rochechouard
- le lendemain visite d'une fabrique de gants de luxe à Saint-Junien et d'un site thermal gallo-romain, réputé dans l'Antiquité, à Chassenon (Charente).
- Le projet de visite de l'extraction de diatomites à Murat ou Riom-ès-Montagne, et d'une verrerie spécialisée dans les flacons de parfum, à Aurillac, est reporté après les vacances d'été.

D'autres objectifs à proximité de Clermont-Fd sont programmés pour le 2<sup>ème</sup> trimestre 2019 : ils sont en préparation et des précisions seront données dans le prochain N° d'Auvergne-Sciences.

# ADASTA

Adhésions et Abonnement  
Adhésions à titre individuel : 32 €  
Adhésions à titre collectif : 85 €

L'adhésion donne droit à la revue Auvergne-Sciences, à des invitations aux conférences et aux visites d'entreprises (une participation aux frais peut être demandée lors de certaines visites).

Permanences :

*elles sont assurées par les bénévoles : lundi de 14 h à 17 h, mercredi de 14 h à 17 h  
En cas d'absence laisser un message sur répondeur ou e-mail*

Adresser le courrier à :

**ADASTA**

**POLYTECH Clermont-Ferrand**

**Campus Universitaire des Cézeaux**

**2 avenue Blaise Pascal - TSA 60206 - CS 60206 - 63178 AUBIÈRE CEDEX**



**Siège social :** 10, Rue de Bien-Assis - 63100 Clermont-Ferrand

04 73 40 51 83

e-mail : [adasta3@gmail.com](mailto:adasta3@gmail.com)

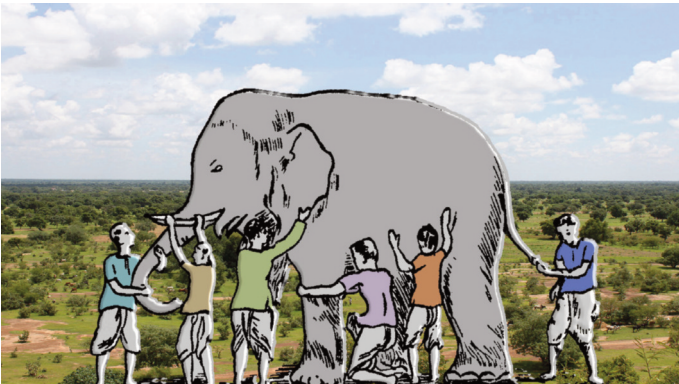
site internet : [www.adasta.fr](http://www.adasta.fr)

N° ISSN - 1166-5904  
Dépôt légal décembre 2018

# (à propos) de la Science et des Textes

par Gérard Mouillaud

*Administrateur AASTA, Technicien Institut Gay-Lussac*



## Les Six aveugles et l'éléphant\*.

Lors d'un voyage en Inde, six aveugles désiraient enfin rencontrer un éléphant, animal mystérieux dont ils avaient entendu parler.

Le premier s'approcha de l'éléphant et, alors qu'il se cognait contre son flanc plat et rugueux, déclara : « Oh surprise, un éléphant est comme un mur ! ».

Le deuxième, tâtant une défense, s'écria « rond, lisse et pointu comme ça, selon moi, cet éléphant est une sorte de lance ! »

Le troisième se dirigea vers l'animal qui lui tendit sa trompe. La tenant dans ses mains il dit : « pour moi, l'éléphant est une variété de serpent python ».

Le quatrième, entourant une patte, fut convaincu qu'un éléphant ressemblait à un tronc d'arbre !

Le cinquième, ayant palpé une oreille, dit : « vous n'y êtes pas, un éléphant est semblable à un grand éventail ! »

Le sixième s'égarant vers l'arrière de l'animal se trouva avec sa queue qui balayait l'air : « mais non, l'éléphant est comme une corde ! »

Les six aveugles discutèrent longtemps insistant sur ce qu'ils croyaient exact. Ils pensaient ne pas arriver à s'entendre, lorsqu'un homme les vit se chamailler.

« Mais que vous arrive-t-il ? » dit ce dernier.

« Nous ne pouvons pas nous mettre d'accord pour dire à quoi ressemble un éléphant ! »

Et chacun d'eux lui dit ce qu'il pensait avoir découvert. L'homme leur déclara : « **Vous avez tous tort et raison à la fois** parce que chacun a touché une partie différente de l'animal en oubliant d'en faire le tour ! »

Chacun détenait une part de vérité mais une partie seulement, oubliant que seul l'assemblage de leurs expériences pouvait conduire à une vision globale de la vérité.

Par exemple, en ce qui concerne **la nature de la lumière**, qui d'Ibn Al Aitham (1015-21), Newton, Huygens, Faraday, Maxwell ou Einstein (1905), est le plus proche de la vérité ?

Aujourd'hui, on sait que la lumière est une « warticle : wave et particule », à la fois onde et particule, chacun de ces hommes de science ayant profité des travaux des précurseurs en les enrichissant des résultats de ses propres recherches.

Ce qui nous conduit à l'encadré suivant.

*\*Fable indienne publiée dans le Courrier de l'UNESCO dans les années 70 et dont on trouve bon nombre de versions sur le net. Elle a été présentée à 140 élèves lors de la Fête de la Science 2018 en introduction de l'animation AASTA sur « La science dans notre vie, le choix des matériaux » où il était question des « fake-news » de la science.*

## Rendons à Bernard ...

C'est **Bernard de Chartres** (1130-1160) qui a écrit : « *Nanos gigantum humeris insidentes* » : **Nous sommes comme des nains juchés sur des épaules de géants.**

**Blaise Pascal** (1647), détaille la formule dans sa « Préface pour le traité du vide » :

« ... parce que, (*les Anciens*) s'étant élevés jusqu'à un certain degré où ils nous ont portés, le moindre effort nous fait monter plus haut, et avec moins de peine et moins de gloire, nous nous trouvons au-dessus d'eux. C'est de là que nous pouvons découvrir des choses qu'il leur était impossible d'aper-

cevoir. Notre vue a plus d'étendue, et, quoiqu'ils connussent aussi bien que nous tout ce qu'ils pouvaient remarquer de la nature, ils n'en connaissaient pas tant néanmoins, et nous voyons plus qu'eux. » (Pléiade, Opuscles, p.532)

C'est ensuite **Isaac Newton** (1675) qui prend la citation à son compte dans une lettre à Robert Hooke :

« *If I have seen further it is by standing on the shoulders of giants* ».

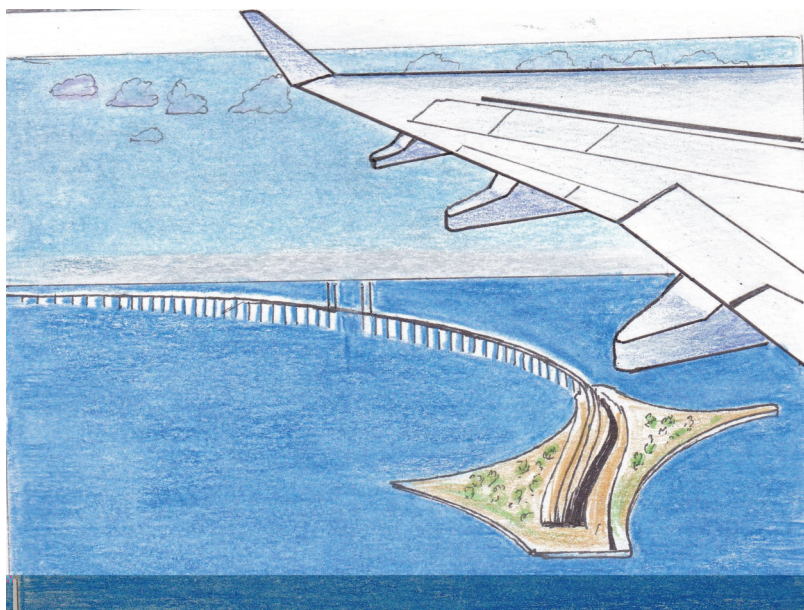
Mais Blaise Pascal nous a bien rassurés :

« S'ils sont plus grands que nous... ils ont les pieds aussi bas que les nôtres. »

## Histoires de Plantes et autres...

Par Michel Gendraud (dessins et textes)

### BIENTOT UNE FORET SUR PEBERHOLM ?



Ile au poivre par proximité avec Saltholm, l'île au sel, Peberholm est une nouvelle venue dans l'Øresund. Le passager d'un avion en approche de Copenhague, est surpris par sa position. A quelques encablures de la côte danoise, elle est l'aboutissement d'un pont parti de la côte suédoise et dont elle avale les trafics automobile et ferroviaire.

Le passager ne peut pas voir le tunnel sous marin qui prolonge le pont et conduit trains et voitures jusqu'au voisinage de l'aéroport, libérant ainsi l'espace aérien.

Peberholm fut construite en 1998 par l'Homme pour supporter cette transition. Faite de matériaux prélevés sur le fond du détroit auxquels fut ajoutée, pour les remblais, de la terre continentale, elle ne reçut aucune plantation, afin que la nature puisse s'exprimer. L'Association Botanique de Lund suit l'évolution de la végétation depuis le début, rejointe, en 2010, par l'Université de Copenhague qui étudie, sur Peberholm l'artificielle et Saltholm la naturelle, les installations spontanées de mycorhizes, ces symbioses plantes champignons indispensables au développement d'une strate arborée.

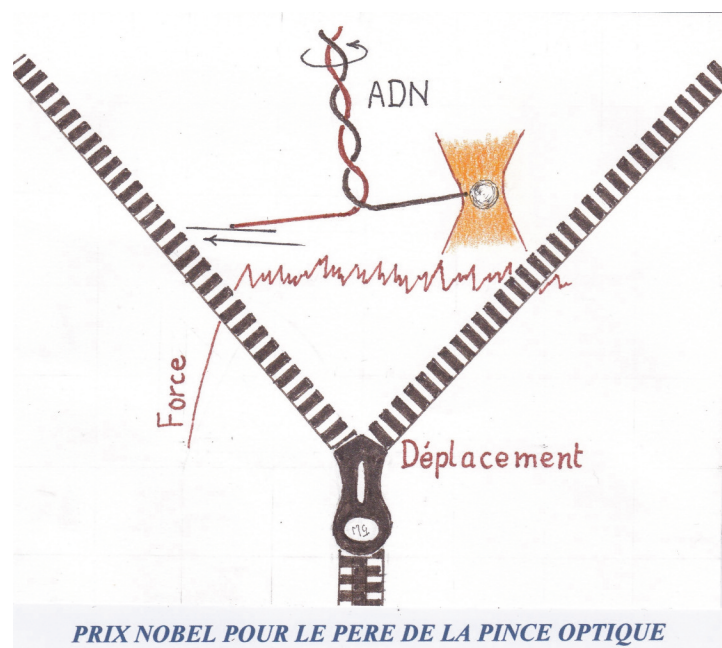
### PRIX NOBEL POUR LE PERE DE LA PINCE OPTIQUE

Arthur Ashkin est lauréat du prix Nobel de Physique 2018 pour ses travaux sur la pince optique, dispositif laser capable de piéger une microbille transparente, et qui a rendu possible la dynamique à l'échelle de la molécule unique.

Ainsi, une double hélice d'ADN dont les brins sont reliés, l'un à une lamelle mobile, l'autre à un ensemble dynamométrique fixe (microbille transparente et pince optique), est ouverte par une force d'environ 15 pN.

L'ouverture entraîne la rotation de la double hélice, sa friction avec le milieu aqueux est déduite aux fins de modélisations.

Dans la cellule, l'ouverture de la double hélice est confiée à des hélicases qui agissent à la manière du curseur d'une fermeture à glissière avec l'énergie de l'ATP. Leur défaillance cause de lourdes pathologies.



PRIX NOBEL POUR LE PERE DE LA PINCE OPTIQUE