

# CONTROLE DES MOUVEMENTS DES YEUX DANS L'ESPACE 3D

[zoi.kapoula@gmail.com](mailto:zoi.kapoula@gmail.com)

Tel 0624420014

Zoï Kapoula, Directeur de Recherche au CNRS, chef d'équipe

IRIS, Physiopathologie de la Vision et Motricité Binoculaire

CNRS FR2022

UFR Biomédicale

Université Paris Descartes

45, rue des Saints-Pères

75006 Paris, France

email: [zoi.kapoula@parisdescartes.fr](mailto:zoi.kapoula@parisdescartes.fr), [zoi.kapoula@gmail.com](mailto:zoi.kapoula@gmail.com)

<http://www.biomedicale.parisdescartes.fr/IRIS-Physiopathologie-de-la-vision.html>

Pour consulter l'actualité de l'équipe:

<http://fondation.parisdescartes.fr/regard-et-motricite-binoculaire/>

startup ORASIS - Eye Analytics & Rehabilitation ([orasis-ear.com](http://orasis-ear.com))

# **GENERALITES**

## **I - L'ETUDE DES MOUVEMENTS DES YEUX**

Les mouvements des yeux attirent l'attention des neurophysiologistes, des ingénieurs, des physiciens, des médecins, des psychologues. Le but ultime de tous ces chercheurs, quelque soit le niveau du système nerveux qu'ils étudient, est de comprendre comment s'effectue la transformation d'un événement sensoriel en une sortie motrice et quelles sont les stratégies utilisées par le système nerveux central dans le contrôle oculomoteur. L'étude des mouvements des yeux représente aujourd'hui une occasion unique de scruter le fonctionnement du cerveau et ceci pour des raisons fonctionnelles, conceptuelles et techniques.

1) Tout d'abord, l'appareil oculomoteur effecteur ("oculomotor plant"), consistant du globe oculaire et de sa musculature extrinsèque est organisé de façon simple, certaines de ses caractéristiques étant les suivantes :

- La rotation de l'oeil dans un plan est provoquée par la contraction de deux muscles seulement ;
- Les muscles sont droits et leurs fibres sont parallèles de sorte que la force de chaque fibre soit directement appliquée sur le globe ;
- l'innervation des muscles obéit à la règle de réciprocité, selon laquelle les antagonistes se relâchent pendant que les agonistes se contractent.

La simplicité la plus importante de l'appareil oculomoteur est le fait que l'oeil réside à l'abri de l'orbite osseuse, qui le protège des forces mécaniques et des perturbations externes. L'absence de réflexe myotatique (contraction réflexe d'un muscle lors de son propre étirement) chez les muscles extra-oculaires, (Keller et Robinson, 1971) est sans doute liée au fait que ces muscles ne sont pas utilisés à appliquer de force à des objets externes mais à la charge constante du globe oculaire (Robinson, 1981a). Ces caractéristiques uniques de l'appareil oculomoteur permettent d'établir une relation directe entre l'activité neuronale produisant le mouvement de l'oeil et ce mouvement lui-même (Robinson, 1970).

2) On peut distinguer différentes classes de mouvements oculaires : chacune d'elles a son propre substrat anatomique et son organisation physiologique dont beaucoup d'éléments sont maintenant identifiés. Chacun de ses systèmes a sa propre fonction (voir plus loin). Ceci est un avantage considérable, car comprendre la fonction qu'un système neurophysiologique vise à atteindre, est essentiel pour la mise au point des expériences critiques et l'interprétation des données.

3) Le développement des techniques et des méthodes expérimentales sont souvent à la base du progrès scientifique. Au niveau comportemental, il est relativement facile d'enregistrer les mouvements des yeux et de

procéder à des analyses quantitatives. C'est en 1901, que Dodge et Cline ont mis au point la première méthode objective d'enregistrement des mouvements des yeux en photographiant le reflet cornéen. Depuis on assiste à une évolution extraordinaire dans ce domaine : le chercheur d'aujourd'hui dispose de diverses méthodes hautement précises et élaborées, lui permettant une investigation affinée du comportement oculomoteur, (par exemple la méthode lentille de contact/champ électromagnétique inventée par Robinson en 1963).

D'autre part, la possibilité d'enregistrer l'activité neuronale chez l'animal éveillé, combinée avec la simplicité de l'appareil périphérique, a beaucoup fait progresser nos connaissances sur les circuits neuronaux qui sous-tendent les divers systèmes oculomoteurs. A la fin des années soixante, des travaux pionniers de Fuchs et Luschei (1970), Robinson (1970) décrivaient le comportement des motoneurones au cours des fixations oculaires et des saccades. Keller et Robinson (1972) ont étudié l'activité neuronale pendant les mouvements de vergence, Skavenski et Robinson (1973) celle pendant des mouvements induits par le système vestibulaire. Des acquisitions plus récentes dans ce domaine sont remarquables surtout pour les systèmes saccadique et vestibulaire (Berthoz, 1984).

Du fait de la simplicité de son appareil périphérique, le système oculomoteur fût un cas idéal pour appliquer l'analyse des systèmes et les principes de cybernétique dans son étude. Ces concepts peuvent s'appliquer non seulement au niveau périphérique ou immédiatement prémoteur mais aussi à un niveau supérieur. Ainsi des modèles biocybernétiques de plus en plus complexes apparaissent pour formuler des hypothèses quantitatives et précises sur le contrôle oculomoteur, hypothèses qui peuvent être testées expérimentalement.

## **II - FONCTION DES MOUVEMENTS DES YEUX**

Les différents types de mouvements des yeux peuvent être classés d'après leur mode d'incitation (mouvements volontaires et mouvements réflexes), d'après leur caractère physique (mouvements lents et mouvements brusques), d'après la direction du déplacement des deux yeux (mouvements de version et mouvements de vergence). La classification qui nous paraisse la plus intéressante est celle d'après leur fonction.

D'un point de vue téléologique, il semble que tous les mouvements oculaires se sont développés ou ont amené à se développer pour servir la vision. Ainsi les mouvements des yeux peuvent être classés en deux classes correspondant à deux caractéristiques fondamentales du système visuel :

1) L'analyse visuelle est meilleure lorsque l'image sur la rétine est stable. En effet, l'acuité visuelle commence à se dégrader dès que l'image bouge avec une vitesse supérieure à 2.5 deg/sec (Westheimer et McKee, 1975). Par conséquent, des déplacements brusques de la tête ou du corps constitueraient une source de perturbation importante pour le système visuel : si les yeux ne bougeaient pas, le mouvement de la tête causerait

un glissement de l'image sur la rétine qui affecterait la vision. Pour une meilleure vision, le mouvement de la tête doit être compensé, quelque soit son amplitude. A cette fin, on dispose de réflexes oculomoteurs puissants - les réflexes vestibulaires et optokinétiques - dont la finalité est de stabiliser l'image du monde environnant sur la rétine pendant le mouvement de la tête ou du corps.

2) Chez l'homme et chez les animaux dotés d'une fovéa - région de la rétine caractérisée par une densité élevée de cônes - c'est celle-ci qui procure une meilleure acuité visuelle et une vision détaillée des objets, d'où la préférence à utiliser cette région pour voir clair. Ceci a induit la nécessité de pouvoir déplacer les yeux indépendamment de la tête. Ces espèces ont maintenu les réflexes de stabilisation mentionnés dans le passé, mais ils ont développé d'autres types de mouvements des yeux - les saccades, les mouvements de poursuite et de vergence - dont la finalité est d'amener des images sélectionnées sur la fovéa et de les maintenir à cet endroit.

Ainsi, les mouvements des yeux ont deux fonctions principales qui répondent aux nécessités du système visuel et en particulier de la fovéa :

- a) amener et garder l'objet d'intérêt sur la fovéa.
- b) stabiliser l'image rétinienne.

Toutefois, une stabilisation parfaite affecterait la perception (Ditchburn, 1973) mais la performance des sous-systèmes oculomoteurs de stabilisation n'est pas non plus parfaite.

### **III - BREVE DESCRIPTION FONCTIONNELLE DES SYSTEMES OCULOMOTEURS**

#### **Réflexe vestibulo-oculaire**

Sa fonction est de maintenir momentanément l'axe visuel constant pendant les mouvements de la tête ou du corps. Le mouvement de la tête entraîne un mouvement lent compensateur de l'oeil dans l'orbite, d'amplitude égale et de direction opposée à celle du mouvement de la tête. Ce réflexe est issu des analyseurs labyrinthiques des canaux semi-circulaires détectant l'accélération angulaire de la tête. Sa latence est seulement de 10 msec (Biguer et Prablanc, 1981) et il est d'une importance primordiale pour la survivance, car il permet de voir pendant que l'on se déplace. Le circuit élémentaire des voies neuronales, qui relie les canaux avec les muscles extra-oculaires, est un arc à trois neurones (ganglion vestibulaire, noyaux vestibulaires et noyaux oculomoteurs). Les connexions vestibulo-oculo-motrices indirectes sont multineuronales et sont également importantes (Lorente de No, 1933; Berthoz et al., 1981).

Cheron et al. (1985), Cannon et Robinson (1985) ont pu démontrer que des neurones vestibulaires secondaires sont le siège d'une importante activité intégrative (processus de transformation du signal de vitesse en

signal de position) qui est à la base de tous les mouvements oculaires. La plupart des mouvements naturels de la tête sont petits et entraînent des petits mouvements oculaires compensateurs. Des mouvements amples de la tête ou une rotation prolongée du sujet provoque des nystagmus : Il s'agit de l'enchaînement rythmique rapide d'un mouvement continu qui compense approximativement la rotation du corps (phase lente), interrompu par un mouvement rapide "saccadé" dirigé dans le sens opposé (phase rapide). Les phases rapides réorientent l'oeil à la direction de la rotation et servent sans doute à empêcher l'oeil d'atteindre des limites mécaniques (déviation extrême de l'oeil dans l'orbite d'où des mouvements appropriés ne seraient plus possibles). Néanmoins, les phases rapides semblent être plus qu'un mécanisme de recentration de l'oeil dans son orbite. Tout d'abord, elles surviennent bien avant que l'oeil atteigne des limites mécaniques. Elles sont extrêmement rapides avec des vitesses maximales d'environ 500 deg/sec recentrant l'oeil dans un minimum de temps. Elles sont anticipatrices par rapport au mouvement de la tête et servent, sans doute, à permettre l'examen de la nouvelle image du monde venant de la rotation du sujet (Jones, 1964). Ainsi les phases rapides ne se différencient pas des saccades volontaires d'après leur fonction mais plutôt d'après leur mode d'incitation (Robinson, 1981b).

### Système optokinétique

A cause des propriétés mécaniques des canaux semi-circulaires, le système vestibulo-oculaire ne peut assurer la stabilisation du regard dans l'espace que pour de brèves rotations. Lors d'une rotation prolongée dans le noir, on observe que le nystagmus vestibulaire se réduit progressivement et après 30 sec, les yeux deviennent stationnaires. Dans la vie réelle, des rotations prolongées surviennent lors d'activités sportives. La dégradation des mouvements vestibulaires compensateurs entraverait la vision à cause du glissement rétinien. La solution est fournie par le système visuel lui-même : Le glissement des images sur la rétine stimule le système optokinétique qui, alors entreprend la fonction de stabilisation de l'image, en maintenant des mouvements oculaires compensateurs.

Ainsi, les systèmes vestibulo-oculaire et optokinétique sont complémentaires. Les deux ensembles assurent la stabilité de l'image du monde environnant sur la rétine, lors des rotations brèves ou prolongées, lentes ou rapides. Leur relation étroite et symbiotique se manifeste par le fait que, l'activité des neurones vestibulaires est aussi modulée par des informations d'origine visuelle sur le glissement rétinien. Ainsi la décharge de ces neurones reflète la combinaison des entrées labyrinthiques et des entrées visuelles (Waespe et Henn, 1977).

### Le système de poursuite

Le développement de la poursuite est clairement associé avec l'évolution de la fovéa. Sa fonction principale est de permettre une vision claire et continue d'objets mouvants dans un monde environnant stable. Les mouvements de poursuite sont médiatisés par un réflexe de pistage visuel qui détecte la vitesse de l'image d'un

objet mouvant au travers de la fovéa, et produit des mouvements oculaires dont la vitesse est approximativement égale à celle du mouvement de l'image rétinienne.

Une cible mobile peut être poursuivie soit par les yeux seuls, soit par des mouvements céphaliques et oculaires coordonnés. Dans le dernier cas, les mouvements de poursuite servent à annuler le réflexe vestibulo-oculaire ; La stabilisation de l'oeil dans l'espace, par ce réflexe, amènerait l'image de l'objet à poursuivre en dehors de la fovéa. Ainsi, certains auteurs pensent que l'origine de l'évolution du système de poursuite serait la nécessité d'annuler le réflexe vestibulo-oculaire, lors des mouvements de pistage céphaliques (Robinson, 1981). Toutefois, l'annulation du réflexe vestibulo-oculaire et la poursuite ne sont pas tout-à-fait identiques.

La troisième fonction du système de poursuite est de supprimer des mouvements involontaires, tels que la dérive (ou glissade) survenant lors de fixation, qui, sans doute, sont dus à des fluctuations de la décharge des neurones. La vitesse supérieure, dont le système de poursuite est capable, n'est pas limitée à 30-40 deg/sec comme on croyait. Meyer et al. (1985) ont observé que des sujets normaux peuvent poursuivre des cibles mouvantes à 100 deg/sec avec un gain de 90%. L'image rétinienne d'un objet mobile n'est pas le seul stimulus incitant des mouvements oculaires de poursuite.

Certains individus sont capables de poursuivre leur doigt dans le noir ou encore une cible imaginaire. IL semble donc qu'outre les informations rétinienne, des informations sur le mouvement d'une cible, venant d'autres systèmes sensoriels, ou des représentations internes du mouvement d'une cible dans l'espace, peuvent aussi inciter des mouvements de poursuite.

### Le système saccadique

Chez les primates, la fonction de la saccade est directement liée à la présence de la fovéa. Leur fonction, décrite clairement par Dodge (1903), est de déplacer les yeux de sorte que l'objet d'intérêt puisse être vu avec le centre de la rétine. Les espèces démunies de fovéa font également des mouvements saccadiques précédant des mouvements actifs ou non de la tête. Certains auteurs (par exemple Robinson, 1981) considèrent que ces mouvements oculaires peuvent aussi être appelés "saccades" ; car ils servent à une stratégie visuelle consistant à diriger le regard vers le sens de l'orientation de la tête. Les phases rapides du nystagmus, mentionnées dans le passé, dirigent le regard vers l'orientation du déplacement du corps ou de la tête pour permettre l'examen de l'image du monde et sont aussi qualifiées comme des saccades. Ainsi, le terme de "saccades", recouvre un nombre de comportements divers ;

- les phases rapides (saccades de réflexe), sont les comportements les plus rudimentaires.
- les déplacements volontaires des yeux avec la tête stable, vers des cibles sélectionnées, sont les comportements les plus élaborés (saccades volontaires).

Les structures corticales et sous-corticales participantes à la production des saccades volontaires, sont aujourd'hui de mieux en mieux connues.

### Mouvements de Vergence

Ce sont des mouvements disjonctifs, pendant lesquels les déplacements des deux yeux s'effectuent en direction opposée. On peut discerner deux types principaux des mouvements de vergence.

A) vergence de fusion : l'alignement précis des axes visuels est nécessaire pour une vision fovéale binoculaire de l'objet d'intérêt. Si les images de l'objet ne tombent pas sur des endroits correspondant de deux rétines, l'objet est localisé en deux directions visuelles séparées (diplopie). C'est donc la disparité des images rétiniennes qui stimule une réorientation bien déterminée des deux axes visuels pour qu'ils se coupent sur l'objet en question.

B) vergence d'accommodation : ces mouvements sont stimulés par le flou des images sur la rétine et sont associés par des réponses d'accommodation du cristallin et de constriction de la pupille. Ils surviennent en réponse au passage du regard d'un objet à un autre plus ou moins éloigné.



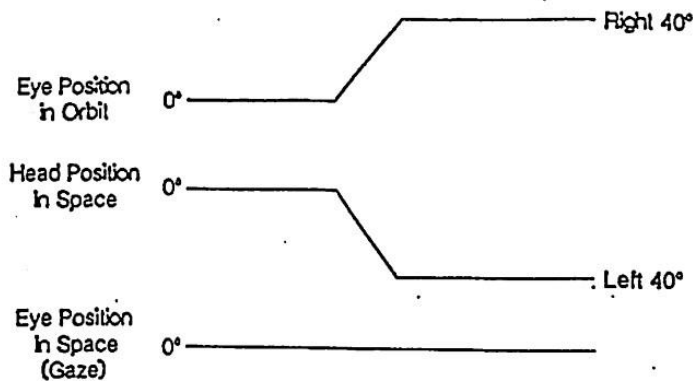
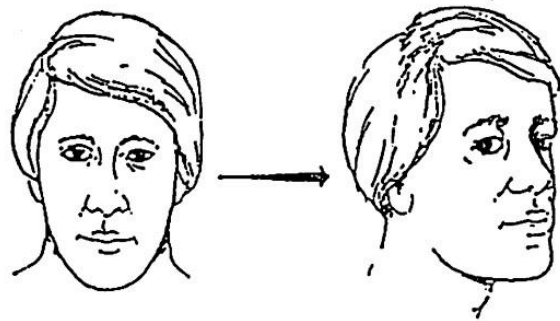
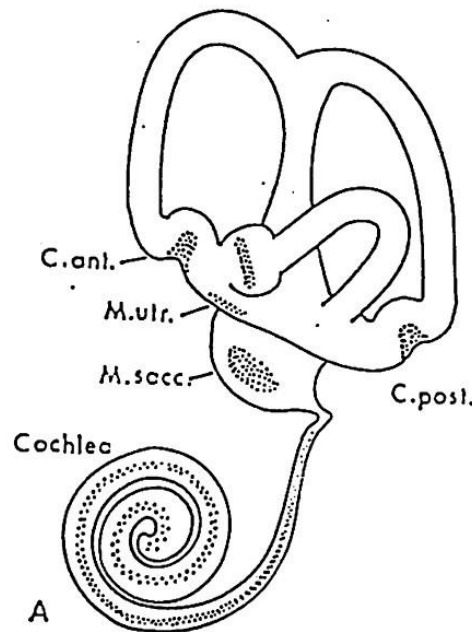


Figure 1-3. The function of the vestibulo-ocular reflex. As the head is rapidly turned to the left, the eyes move by a corresponding amount in the orbit to the right. Below, head position in space and eye position in the orbit are plotted against time. Because the movements of head and eye in orbit are equal and opposite, the sum, eye position in space (the angle of gaze or gaze), remains zero (bottom equation). If gaze is held steady, then images do not slip on the retina and vision remains clear.

$$\text{EYE}_{\text{space}} = \text{EYE}_{\text{orbit}} + \text{HEAD}_{\text{space}}$$



## Réponse Vestibulo-oculaire (VOR) diminue avec le temps

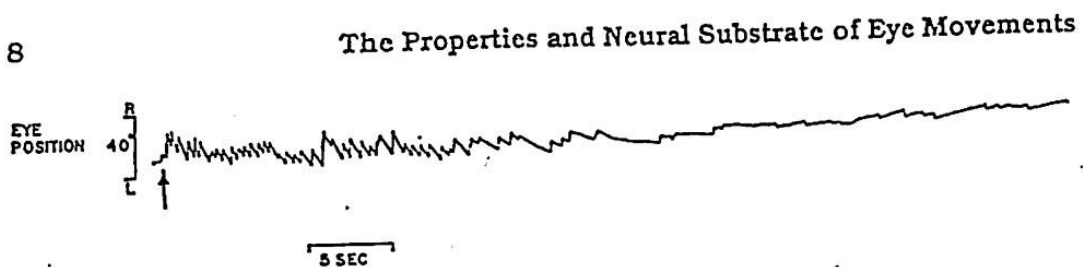


Figure 1-4. Oculogram of the vestibulo-ocular response to sustained rotation. Horizontal eye position is plotted against time. At the arrow, the subject starts to rotate, in darkness, at 50 deg/sec, and this velocity is maintained throughout the record. Initially there is a brisk nystagmus consisting of vestibular slow phases that hold gaze steady during the head rotation and quick-phases that not only reset the eyes to prevent them from lodging at the corners of the orbit but move them into the direction of head rotation. After about 30 seconds of rotation, the nystagmus (i.e., the vestibular response) dies away. Because of the mechanical limitations of the semicircular canals, the motion detectors cannot accurately inform the brain about sustained rotations. Eventually, nystagmus develops in the opposite direction (reversal phase); this represents the effect of vestibular adaptation, a phenomenon discussed in Chapter 2.

Nystagmus Optokinétique (OKN):  
Glissement Rétinien

↓  
VOR + OKN assurent stabilisation du  
regard pour des rotations longues

## POURSUITE

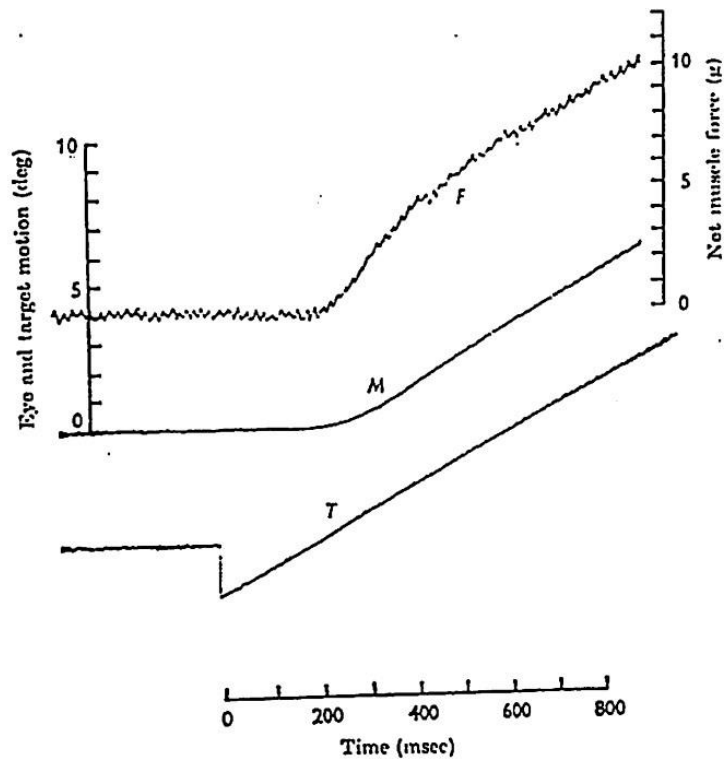
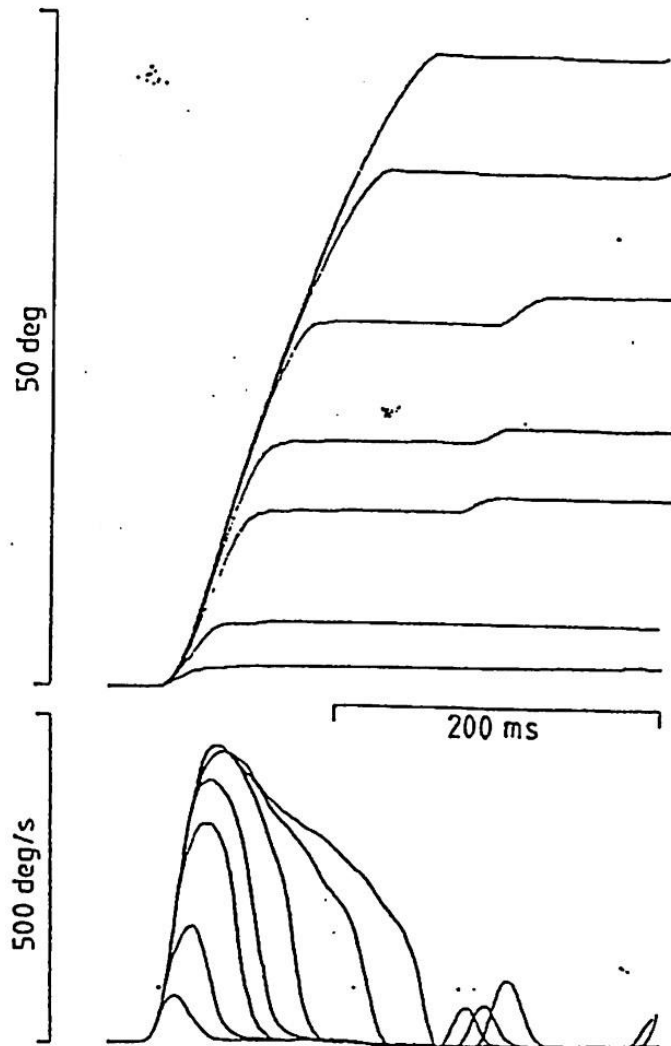


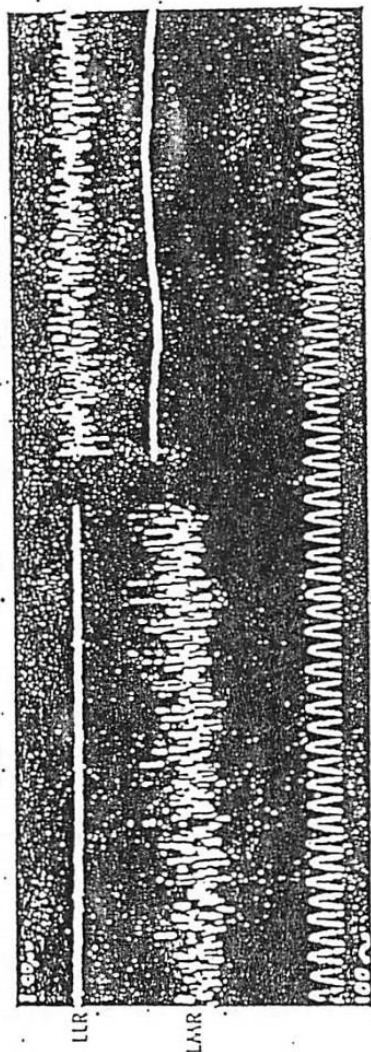
FIGURE 2. The Rashbass<sup>24</sup> experiment to determine the stimulus to pursuit movement. The target (T) initially steps 1.5 degrees to one side (thereby creating a position error on the retina) and then immediately commences a smooth movement in the opposite direction at 10 degrees per second (creating a velocity error on the fovea). If the pursuit system were responsive to a position stimulus, then the initial movement would be in the direction of the initial target step. In fact it is not, and the eye (M) commences a smooth pursuit movement in response to the smooth movement of the target, even though the initial eye movement is away from the position of the target. F is muscle force. (From Robinson,<sup>25</sup> with permission.)

# SACCADES



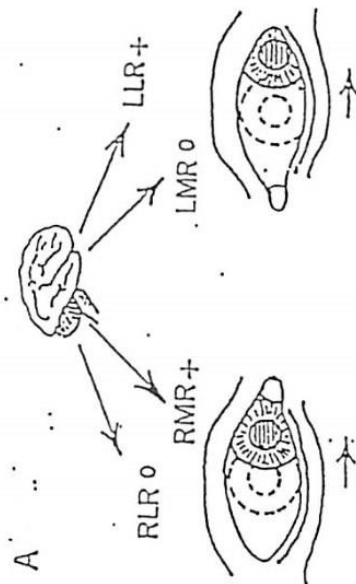
Loi de Sherrington: muscle agoniste se contracte,  
muscle antagoniste se relaxe

Regard à droite      Oeil Gauche      Regard à gauche  
droit interne      droit externe



Electromyographic evidence for reciprocal innervation of extraocular muscles. Upper tracing from left lateral rectus muscle (LLR); lower tracing from left medial rectus muscle (LMR). In extreme right lateral gaze (LLG) the LLR is electrically silent and the LMR is electrically active. In extreme left lateral gaze (LLG) the LMR is electrically silent and the LLR is electrically active. (Courtesy Dr. Goodwin M. Breinin.)

Fig 14



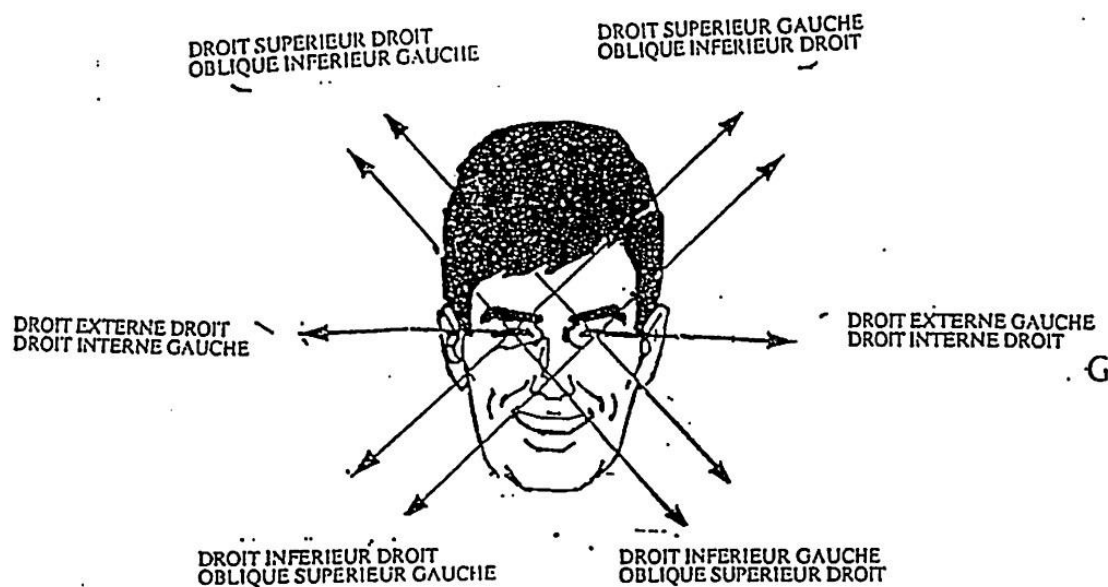
# MUSCLES CONJUGUES (yoked)

## Loi de Hering

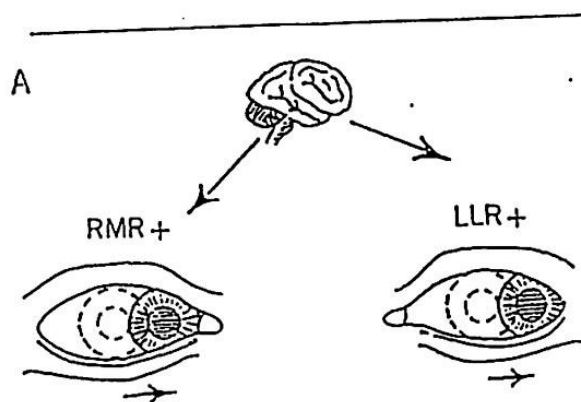
Fig 15

### Sémiologie

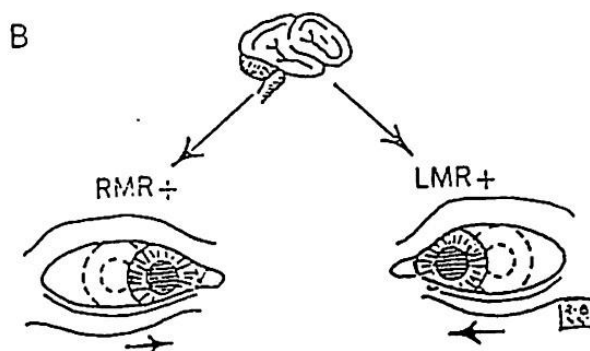
- la loi de Hering est, elle, propre à l'oculomotricité : "lors des mouvements binoculaires, l'influx nerveux est envoyé en quantité égale aux muscles agonistes des deux yeux".



## SACCADES



## VERGENCE



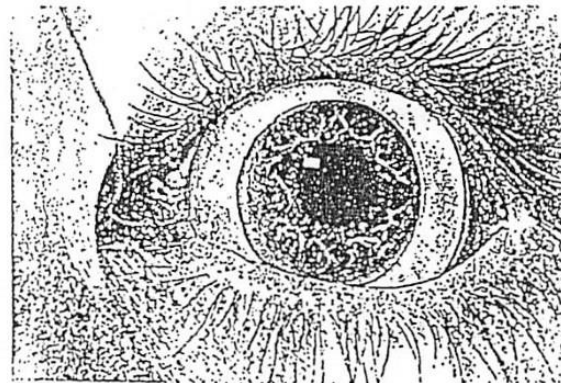
## Who is Skalar medical?

Skalar medical is a leading Dutch Medical electronics company. A dynamic company, founded in 1965 on the initiative of Dutch scientists and businessmen who sought to develop the practical potential of hi-tech electronics in medical and biological research. Skalar Medical has established itself as partner to medical and biological researchers by versatile and innovative electronic engineering in a number of highly specialised fields in the area pertaining to the measurement of eye movement. Skalar medical has developed highly accurate and reliable sensor and monitoring equipment which has been put to use in research and diagnostics in several disciplines. Particularly the scleral search coil technique has enabled scientists to further extend their knowledge of the oculomotor system.

## Fundamentals of the magnetic scleral search coil technique.

The principle of the scleral search coil technique based upon the magnetic induction of a small coil (Robinson 1963) is illustrated in figure 1. The induction coil is embedded in a flexible ring of silicone rubber which adheres to the limbus of the human eye concentric with the cornea (Collewijn et al. 1975). Around the head of the subject an alternating horizontal and vertical magnetic field (spatially and temporally in quadrature) is generated and consequently an alternating voltage will be induced in the coil. After amplification and phase-locked detection two analog voltages are obtained which are proportional to the sine of the horizontal and vertical eye deviation. In addition to this coil, which is wound in the frontal plane, a second coil is wound in the sagittal plane (Ferman et al. 1987). This combination coil simultaneously measures horizontal, vertical and torsional eye position.

## Applications

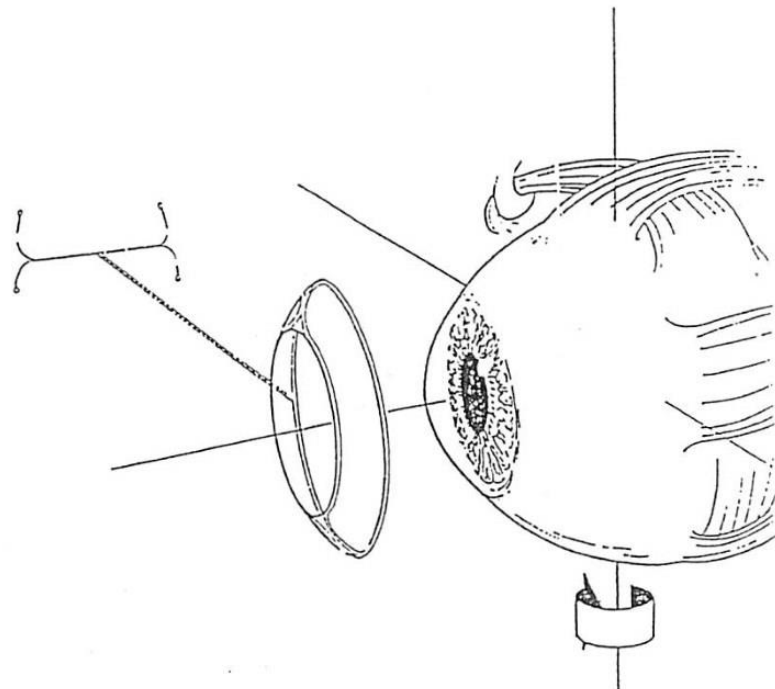


The scleral search coil technique is being used for physiological research of the oculomotor system in man and animals (Judge et al. 1980). Its high accuracy and bandwidth guarantees effortless recording of not only saccades, smooth pursuit, vergence, vestibular and optokinetic eye movements but also of miniature eye movements: tremor, drift and microsaccades. Further applications include neuro-physiological, reading, psychological, psychiatric and visual studies.

A comprehensive list of published articles is available from Skalar.

## References

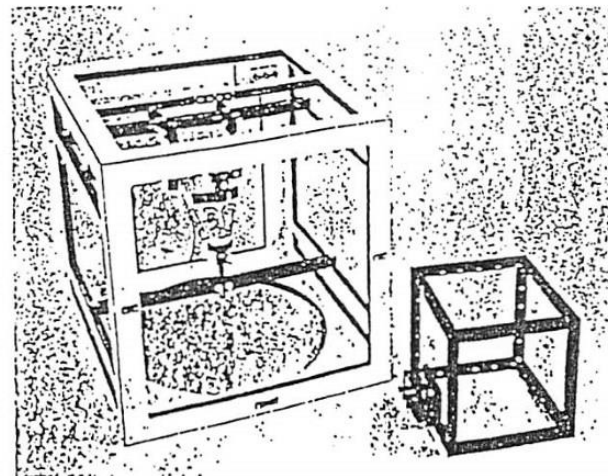
- Robinson, D.A. (1963) A method of measuring eye movements using a scleral search coil in a magnetic field. *IEEE Trans. Biomed. Electron.* BME Vol. 10, 137-145.
- Collewijn, H., van der Mark, F. and Jansen, T.C. (1975) Precise recording of human eye movements. *Vision Research* Vol. 15, 447-450.
- Ferman, L., Collewijn, H., Jansen, T.C. and Van den Berg, A.V. (1987) Human gaze stability in the horizontal, vertical and torsional direction during voluntary head movements, evaluated with a three-dimensional scleral induction coil technique. *Vision Research* Vol. 27, 811-828.
- Judge, J.J., Richmond, B. and Chu, F.C. (1980) Implantation of magnetic search coils for measurement of eye position: an improved method. *Vision Research* Vol. 20, 535-538.



## Magnet coil frame

Skalar's magnet coil frames accommodate six magnet coils. Two sets of magnet coils generate the horizontal and vertical alternating (20 kHz) magnetic fields, while a third set, located in front and at the back of the coil frame generate an alternating calibration magnetic field. Optimal frequency tuning of the magnetic fields is facilitated by fine trimming of series capacitors. Each coil is individually shielded with copper shielding tape. Different sized magnet coil frames are available:

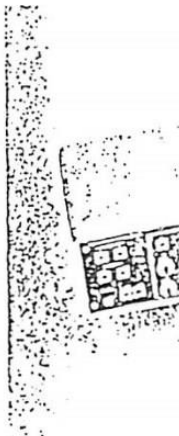
- a cubic coil frame designed for experiments with small animals, constructed from black polyvinylchloride and an external overall frame size of 31 cm along an edge.
- a cubic coil frame designed for experiments with humans and larger animals, constructed from Trespa-Volkern with white surfaces and an external overall frame size of 70 cm along an edge. A chin- and head-rest facilitate fixation of the subject's head.

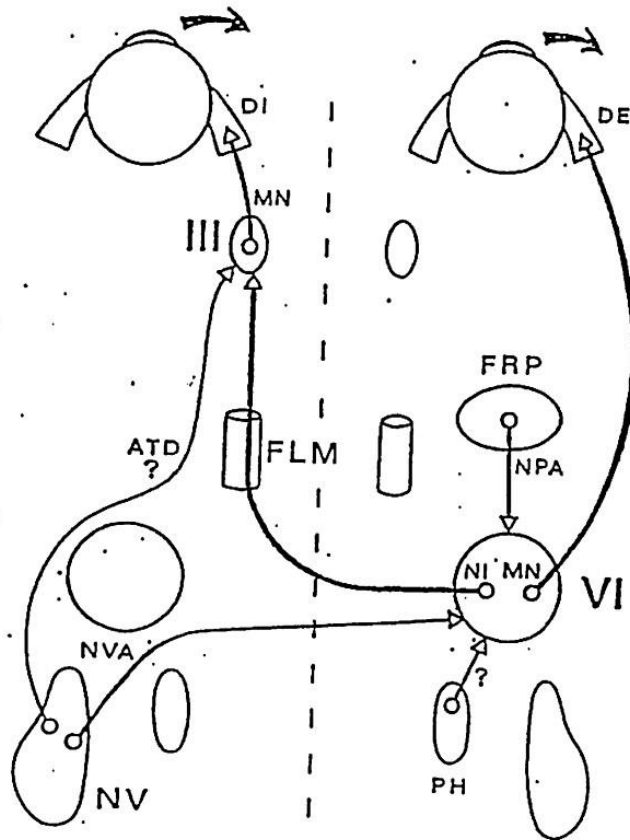


## Electronic control

The electronic control and a signal processing unit are induced in the sclera. Individual demodulated signals are differential signals.

- an electronic control unit for horizontal and vertical eye movements.
- an electronic control unit for horizontal, vertical and torsional eye movements.





— Voie motrice finale commune de la latéralité et ses afférences activatrices. A.T.D. = tractus ascendant de Deiters (dont l'existence est incertaine chez l'homme); D.E. = muscle droit externe; D.I. = muscle droit interne; F.L.M. = faisceau longitudinal médian; F.R.P. = formation réticulaire pontine paramédiane; M.N. = motoneurone; N.I. = neurone internucléaire; N.P.A. = neurone phasique activateur; N.V. = noyaux vestibulaires; N.V.A. = neurone vestibulaire activateur; P.H. = noyau prepositus hypoglossi (la nature activatrice de la projection ipsilatérale n'est pas encore certaine); III = noyau du nerf moteur oculaire commun; VI = noyau abducens. Cercles et triangles blancs = neurones activateurs.

Fig 31.A



A mini-Web-course

How your eyes rotate in three dimensions

The brain and its control of kinematics.

*Tutis Vilis and Douglas Tweed*

Department of Physiology University of Western Ontario

Internet addresses:

<http://www.physiology.uwo.ca/ListingWeb/index.htm>

If slow, try the mirror sites:

Berkeley:

<http://mach.berkeley.edu/vilis/index.htm>

Tuebingen:

<http://www.uni-tuebingen.de/uni/knl/Vilis/index.htm>

After connection, read, click on 'next' or 'more' and etc.

---

## Vestibular Glossary of Terms

John Hopkins University  
School of Medicine  
Center for Hearing and Balance

Internet address:

<http://www.bme.jhu.edu/labs/chb/glossary/glossary.html>

After connection you can choose about what to ask, e.g.  
coordinates systems, Listing's law, saccades and etc.