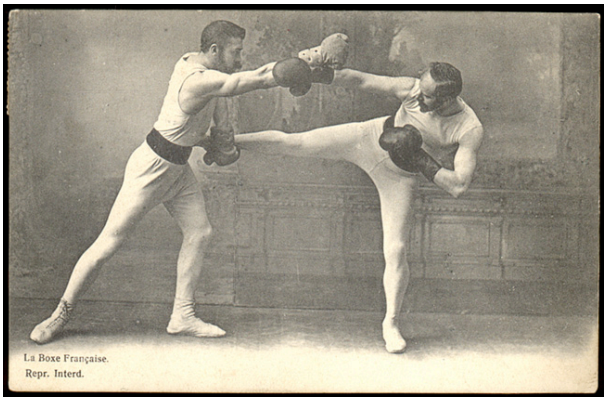
UNIVERSITÉ
PARIS DESCARTES
UFR STAPS

Licence 1

CONTROLE MOTEUR



2010 - 2011

Yves Kerlirzin

Plan du cours

****

Introduction 4

I- Le mouvement 5

II- Le contrôle moteur 7
A) Une intermodalité sensorielle 9
B) Perception, action, prédiction 12
C) La cybernétique 13
D) Systèmes de contrôle proactif et rétroactif 16
E) Les différents modèles de contrôle moteur rétroactifs 19
e_1) le modèle de Bernstein 19
e_2) le modèle d'Adams 21
e_3) le modèle de Schmidt 25
e_4) le modèle de Paillard 31
F) La notion de décharge corollaire ou de copie d'efférence 32

III- Organisation et contrôle du mouvement 35
A) Notion de degré de liberté 35
a_1) couplages 38
a_2) gel initial et libération progressive des degrés de liberté 38
B) Notion de synergie 40
b_1) la réduction de la complexité 41
b_2) un répertoire de synergies ? 42
C) Notion de stratégie 44

IV - Equilibre et équilibration 45
A) Centre de masse ou centre de gravité 45
B) Centre des pressions 49
C) Définitions de l'équilibre 50
D) Structures mises en jeu 53
d_1) les organes otolithiques 54
d_2) les canaux semi-circulaires 56
E) Propriétés et limites du système vestibulaire 58
e_1) apports du système vestibulaire 58
e_2) limites du système vestibulaire. Coopération et substitution entre les systèmes sensoriels 59
F) Le réflexe vestibulo-oculaire (RVO) 61
G) Les problèmes de coordination œil-tête 63
H) Convergence des informations sensorielles 64
I) Compensation et suppléance vestibulaires 64
J) L'exemple du salto 66
K) Informations et illusions 67
L) Affections du système vestibulaire 69
l_1) le vertige 69
l_2) les facteurs déclenchants 71
l_3) quelques pathologies 71
M) Les capteurs articulaires et musculaires 72

N) Le cervelet 74
O) Perception de la verticale et de l'horizontale 76

V) La posture 79
A) Notion de valeur de référence 83
B) Les ajustements posturaux 83
C) Notion de représentation 84
D) Notion de référentiel 85
d_1) repères d'espace et de temps 86
d_3) différents systèmes de coordonnées 87
E) Comprendre les moyens de contrôle mis en œuvre par le sujet. 88
F) Un modèle interne, le schéma corporel 90
G) La régulation posturale 92
g_1) Stabilisation de la tête 92
g_2) Une conception descendante 94
g_3) Plan de Francfort 94
g_4) Ancrage directionnel du regard 96

VI-Notion de fonction de coût, d'optimisation 101
A) Trois théories ont principalement été proposées par différents auteurs 104
a_1) théorie de l'effort minimal 106
a_2) théorie du minimum jerk (accélération minimale) ..... Erreur ! Signet non défini.
a_3) théorie du minimum torque change model (modèle du changement minimal de couple) 106
B) Les théories du point d'équilibre 108
C) Application du principe de contrôle optimal à la locomotion 110
c_1) géométrie et cinématique 110
c_2) un exemple de loi de mouvement : "la loi de puissance 2/3" 111

VII- Un principe caractéristique du contrôle moteur : la relation vitesse-précision 113

VIII- Un exemple particulier : localiser et saisir 118
A) Les voies mises en jeu 121
B) Actions coordonnées des deux voies 123
C) Pathologies des coordinations visuo manuelles 124
c1) l'agnosie visuelle 124
c_2) l'ataxie optique 125

IX- Un autre aspect du contrôle moteur : les désordres du mouvement volontaire 126

X- D'autres conceptions de l'apprentissage et du contrôle moteur 129
A) L'approche écologique 130
a_1) La notion d'affordance 131
a_2) Une notion non définie par l'approche écologique : la notion de vicariance 137
a3) Le flux optique 140
a_4) Le temps jusqu'au contact 143
B) L'approche dynamique 154
b_1) la notion d'émergence 154
b_2) l'auto-organisation d'un système - l'auto-organisation du vivant 155
b_3) l'auto-organisation dans le cadre de l'approche dynamique 158

b_4) la coordination dynamique 160
b_5) la notion d'attracteur 161
b_6) oscillateurs, phase et anti-phase, bifurcation de phase, paramètres d'ordre 162
C) Conclusion brève sur les approches écologique et dynamique 167

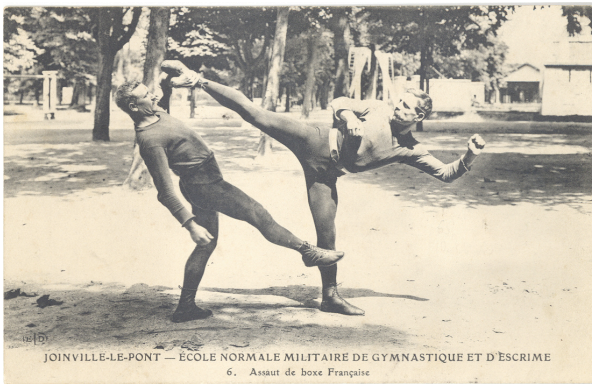
Emprunts, références, sources..... 168

Introduction

La vie au quotidien nécessite la mise en jeu d'un certain nombre de mouvements (se déplacer, marcher, sourire, communiquer). Certains gestes sont exécutés plus aisément que d'autres par certaines ou certains d'entre nous sans que parfois nous sachions exactement pourquoi. Le monde du travail, le domaine sportif représentent de ce point de vue des terrains privilégiés d'étude de la coordination et du contrôle des actions, de par la nature même des exigences qui s'exercent dans ces cadres particuliers (mise en jeu d'une ou de plusieurs habiletés motrices dans le cadre d'une pression temporelle souvent élevée, nécessité de pouvoir résoudre des conflits du type vitesse-précision, etc.). Plusieurs questions peuvent alors se poser. Comment contrôlons-nous nos mouvements ? Dans quelle mesure sommes capables de maintenir notre stabilité, de préserver notre équilibre, de nous adapter aux conditions parfois sans cesse changeantes de notre environnement et d'y apporter une réponse adaptée, efficiente ?

Le terme moteur peut laisser envisager le système (*i.e.* le corps humain) comme une machine dotée de ressources particulières, d'un répertoire de possibles (qui ne sont pas uniquement de nature biologique ou physiologique). Nous savons tous que la relation au monde nécessite la mise en jeu de paramètres ou de facteurs de différentes natures (psychologique, affective, motivationnelle, énergétique, etc.). Ce qui est en jeu en fait ici est ce qui met en mouvement, ce qui en permet son expression et son contrôle.

L'organisation d'un mouvement et le contrôle coordonné des segments corporels impliqués dans l'exécution de ce mouvement dans les trois dimensions de l'espace sont des problèmes complexes, dus notamment aux multiples degrés de liberté inhérents au système contrôlé. Selon l'approche cognitiviste, la réalisation d'un mouvement volontaire implique sa planification par le système nerveux central, ainsi que la prise en compte (l'anticipation) des conséquences de cette action sur l'orientation et l'équilibre du corps.

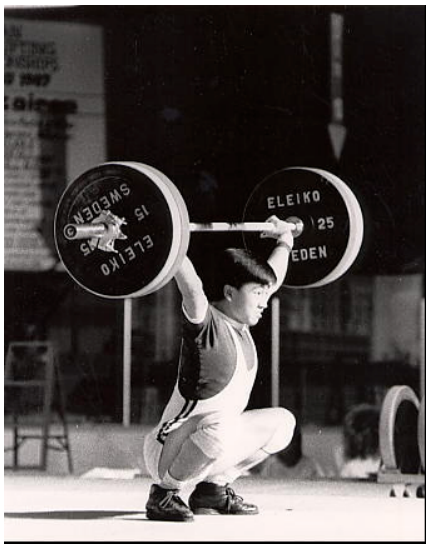


Prise en compte des conséquences de l'action dans les débuts de l'enseignement de la savate boxe française : une organisation posturale qui « compense » le déséquilibre induit par la production du geste (le ou les bras compensateurs sont placés en arrière du corps).

Lorsqu'un sujet doit par exemple saisir un objet au sol et l'élever devant lui, le système nerveux central doit faire face à deux types de contraintes : il doit maintenir la projection au sol du centre de gravité du sujet à l'intérieur de son polygone de sustentation (tâche posturale), il doit permettre également la saisie et le transport d'un objet posé sur le sol en construisant une trajectoire donnée (tâche cinématique).

Source : as-mantaise.asso.fr/sections/haltero

Soulever de charge, construction de trajectoire et maintien de l'équilibre. On peut noter ici l'organisation singulière de chaque compétiteur.



Source : shgmc.iquebec.com/pages/fonds

I- Le mouvement

On doit à Hess (1943, cité par Paillard, 1988) la définition du mouvement volontaire qui comprendrait une composante éréismatique (posturale), favorisant l'élaboration d'un support postural, et une composante télécinétique (instrumentale), permettant l'atteinte du but. Ainsi, selon cet auteur, la composante éréismatique permet la fixation des segments corporels et le contrôle de la position du centre de gravité. Elle permet aux forces dynamiques créées par le mouvement de se développer tout en conservant l'orientation du sujet dans le champ des forces de gravité. Dans cette approche traditionnelle, on aborde un des aspects de la relation posture - mouvement, où la première, *i.e.* la posture, crée les conditions nécessaires à l'exécution du second, le mouvement (Massion 1984b, Paillard 1988).

Les mouvements peuvent se définir comme des variations de position de tout ou partie du corps, caractérisés par différents paramètres comme l'amplitude ou la vitesse des déplacements des segments ou du corps lui-même. On se pose fréquemment la question de la définition de termes dons la signification semble proche, comme le mouvement, le geste, l'action. Pour Dubois et al. (2002), la consultation de différents ouvrages de références (dictionnaires) permet de proposer un consensus sur certains termes. Ainsi, le mouvement peut "se définir explicitement

comme un changement de position dans l'espace, de la part tant d'un objet inanimé que d'un acteur animé. " Le geste, lui, "est défini comme un mouvement du corps (ou d'une partie du corps, le plus souvent la main), il est porteur de signification, d'intention de la part d'un agent (acteur) animé (humain)." Enfin, pour l'action, " l'accord se manifeste sur les propriétés suivantes : l'action produit un effet suscité par un agent animé (humain) ou inanimé (le vent), mais ni l'intention ni le résultat ni la durée ne sont des propriétés qui réalisent un consensus."

Il est possible de différencier les mouvements en morphocinèses (la production ou la reproduction d'une forme, ce que l'on peut rencontrer en gymnastique acrobatique, en danse, en gymnastique rythmique, en plongeon, etc.) et en télécinèses (activité dirigée vers un but spatial, comme en athlétisme ou en jeux sportifs collectifs). Certains mouvements sont déterminés consciemment, volontairement (mouvements intentionnels comme saisir ou projeter un objet, pousser un ballon du pied), d'autres le sont de façon automatique (respiration, locomotion). Ces derniers se caractérisent par une exécution parfaitement stéréotypée en raison de la maturation du système nerveux ou de l'apprentissage.

Morphocinèse

Télécinèse

On oppose fréquemment mouvements volontaires répondant à une intention bien précise et mouvements réflexes, les plus connus chez l'homme étant le réflexe tendineux rotulien et le réflexe plantaire cutané. Ces mouvements réflexes "correspondent à des mouvements d'un type très particulier, déclenchés directement par une cause extérieure, et constituant des réactions simples, prévisibles, échappant à l'apprentissage ". Il est possible de les définir comme des réponses motrices innées (*i.e.* non acquises par l'apprentissage) provoquées par des stimuli variés alimentant des circuits spinaux courts et non contrôlés par la volonté.

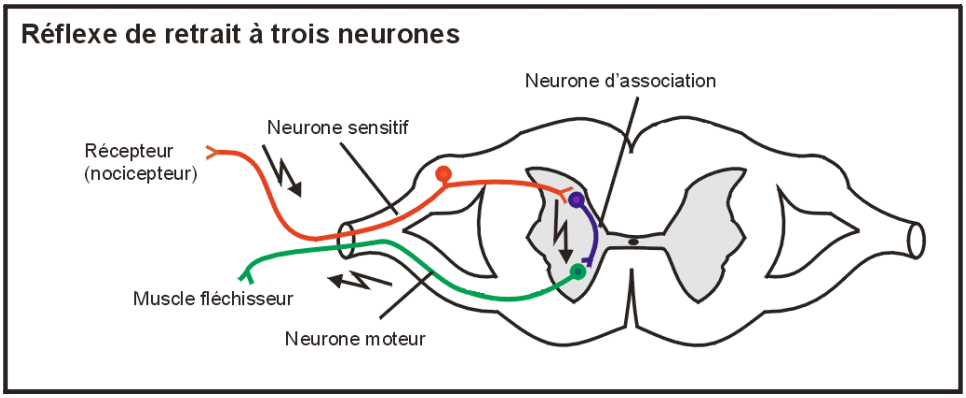


Schéma type d'un trajet réflexe

En réalité, hors de situations expérimentales bien définies, cette opposition n'a pas de réalité fonctionnelle, les circuits responsables de toutes les activités motrices étant indissociables au niveau de l'exécution. Les commandes centrales et les données fournies par les systèmes sensoriels activés au cours du mouvement sont tout aussi indispensables à la bonne réalisation d'un acte moteur. Berthoz (1989) pose d'ailleurs la question de la définition de la notion de réflexe, notamment à propos d'un processus fondamental dans la relation du sujet au monde environnant, le réflexe vestibulo-oculaire. En effet, différentes études (Le Guern, non publiées) ont montré que chez certains sportifs (tireurs au pistolet), il était possible de bloquer l'œil dans l'orbite et de contrôler ainsi ce réflexe vestibulo-oculaire.

II- Le contrôle moteur

Le contrôle moteur propose un espace situé au carrefour de différentes disciplines comme la biomécanique et l'analyse du mouvement, la physiologie du mouvement, les neurosciences comportementales, les sciences cognitives. Il est défini par l'interaction permanente entre le sujet, l'environnement (envisagé la plupart du temps comme un ensemble de contraintes s'exerçant sur ce sujet) et la tâche à accomplir. Comme nous l'avons précisé précédemment, le sujet dispose de plusieurs systèmes interactifs interdépendants pour répondre aux conditions environnementales, lui offrant les possibilités d'un comportement moteur adapté.

Le terme "contrôle moteur" désigne l'ensemble des opérations effectuées par les structures nerveuses impliquées dans la préparation et l'exécution de mouvements coordonnés. Il peut s'agir de mouvements réflexes, d'activités automatiques, comme la locomotion, ou encore d'actes moteurs volontaires. Dans les conditions naturelles, ces trois types de mouvements coordonnés sont souvent intriqués (comme par exemple dans le maintien de l'équilibre), l'exécution d'un mouvement volontaire est souvent associée à un ajustement postural d'ordre réflexe. La tâche

de base d'un système de contrôle comme le système de contrôle moteur est de gérer les relations entre les données sensorielles et motrices, de transformer les données sensorielles (qui se modifient au cours de l'action – cf. *infra* page 9 pour une définition de ces données sensorielles) en données motrices adaptées, favorisant une action appropriée, la coordination et le réglage des différents mouvements sélectionnés. En d'autres termes, pour exécuter des mouvements volontaires, le système nerveux central doit transformer les représentations neurales d'un certain nombre de données (comme la direction du ou des segments corporels concernés, l'amplitude de leurs déplacements, etc.) en signaux mettant en jeu les muscles ou les groupes musculaires qui vont déplacer ces différents segments impliqués dans l'exécution du mouvement.

La production d'un mouvement habile (*i.e.* expert) résulte de la mise en jeu coordonnée des différentes parties du corps et impose de fournir une réponse optimale aux contraintes rencontrées lors de l'exécution de ce mouvement, qu'elles soient de type externe, induites par l'environnement (la lutte contre la gravité) ou internes (orientation relative des segments corporels les uns par rapport aux autres, caractéristiques inertielles de ces différents segments). Le problème des adaptations aux contraintes environnementales et aux contraintes de la tâche se présente sous deux formes complémentaires : les adaptations à court terme (le plus fréquemment en temps réel) et les adaptations à moyen ou long terme (apprentissage). Cette mise en jeu coordonnée nécessite une organisation du système nerveux central définissant les paramètres du mouvement à réaliser.

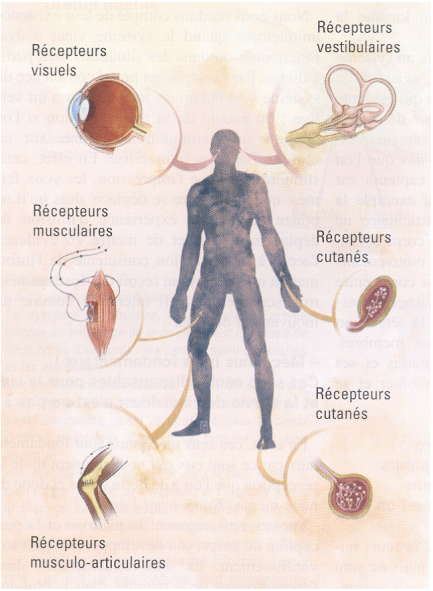
Même parfois simples en apparence, la plupart des mouvements présentent une très grande complexité impliquant des exigences cumulées de force, de vitesse, d'amplitude et de précision (Hogan et al., 1987 ; Bouisset & Maton, 1995). Un simple déplacement linéaire exige par exemple toujours la composition de plusieurs déplacements angulaires des segments articulés du corps mobile et nécessite la mise en jeu d'une programmation complexe (Paillard, 1984). D'autres aspects interviennent également, notamment dans des tâches de locomotion. Ainsi, lorsque nous nous déplaçons, nous devons savoir où aller et comment y aller. Cela implique la construction d'une représentation cohérente du corps dans l'espace (Berthoz, 1991b) afin que ce " sixième sens " (Berthoz, 1991a, 1997) qu'est le mouvement puisse s'y déployer en accord avec l'environnement et les exigences de la tâche. La cohérence de l'espace pose le problème de la mise en correspondance et de l'intégration des informations fournies par les différents systèmes sensoriels et moteurs.

En accord avec Bernstein, plusieurs études sur le contrôle moteur ont montré l'organisation hiérarchique du mouvement. Une trajectoire désirée par exemple est planifiée au niveau du système nerveux central à haut niveau puis transformée en information à même d'être traitée à des niveaux plus bas. Associée à ce concept, on trouve la notion que, aux plus hauts niveaux, les propriétés les plus générales ou les plus globales du mouvement demeurent invariantes par rapport aux modifications spatio-temporelles du mouvement et sont représentées et utilisées pour graduer plusieurs paramètres du mouvement. Ceci permet au système de contrôle moteur de sélectionner une trajectoire spécifique parmi un nombre infini de possibles et évite le stockage de toutes les variations possibles d'un simple mouvement.

En résumé *: le contrôle moteur apparaît comme un processus complexe, mettant en jeu différents facteurs et favorisant l'adaptation du sujet à son environnement ou aux contraintes de la tâche à réaliser. Ce contrôle moteur est organisé de façon hiérarchique (les centres de haut niveau planifiant l'action).*

A) Une intermodalité sensorielle

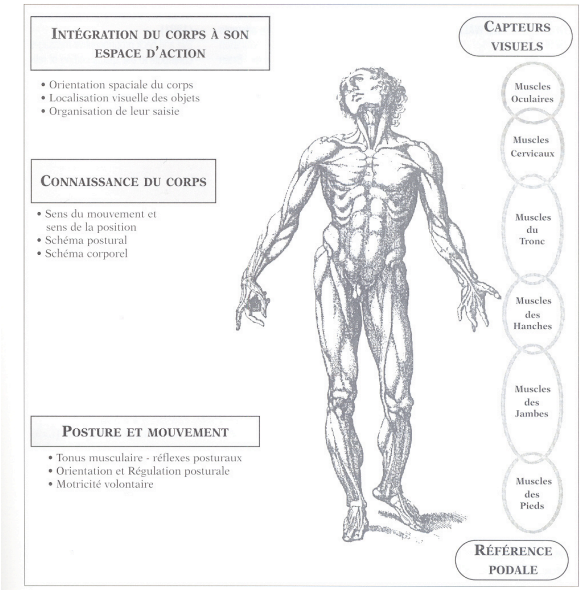
Comme le rappelle le schéma ci-dessous emprunté à Berthoz (1997), le sujet dispose dans la relation à son environnement d'une pluri ou d'une multi modalité sensorielle permettant le traitement des informations indispensables à la sensation du corps propre. Pour mémoire, cette multi modalité se décline depuis les travaux de Sherrington (1857-1952) en trois domaines de récepteurs sensoriels : l'interoception, la proprioception et l'extéroception.



Multimodalité sensorielle (schéma de Bastid, Revue Découverte, d'après Berthoz, 1997) Le mouvement est le fruit de la coopération des différentes modalités sensorielles (vestibule, vision, proprioception, etc.). L'intégration par le cerveau de ces différentes informations lui permet de construire une image cohérente du corps et favorise la paramétrisation du mouvement à effectuer.

L'interoception permet de recevoir les informations en provenance des viscères (on rencontre parfois la notion de cœnesthésie ou cénesthésie qui désigne l'ensemble des sensations permettant à un individu de percevoir son corps dans sa totalité, une conscience viscérale spontanée en quelque sorte procurant des sensations ou de bien-être ou de malaise), la proprioception traduisant la sensibilité des récepteurs musculo-articulaires et nous renseignant sur nos sensations conscientes du mouvement (kinesthésie) et/ou de la position (statesthésie) de nos articulations et de nos segments corporels, et enfin l'extéroception comprenant à la fois la vision, l'audition, le toucher.

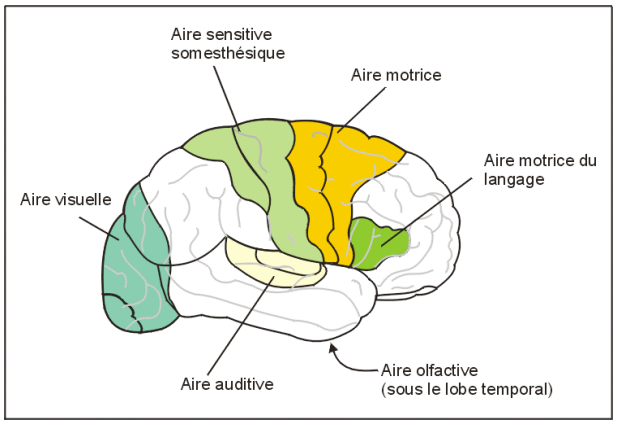
Quels que soient la posture adoptée ou le mouvement réalisé, l'ensemble des informations recueillies par les divers récepteurs articulaires, musculaires, proprioceptifs, visuels et vestibulaires va converger vers les centres nerveux supérieurs (via la moelle épinière, le cervelet, etc.). L'échange de ces différentes informations entre les régions sensorielles et motrices du système nerveux central reliées entre elles par des connexions anatomiques formant des boucles de rétroaction (*i.e.* permettant le retour d'information), leur traitement, vont permettre au cerveau d'obtenir une estimation du mouvement à déclencher (prise de décision sur le mouvement à effectuer, paramétrisation de ce mouvement : amplitude, vitesse, contraction coordonnée des muscles agonistes et inhibition des antagonistes, etc.) ou de poursuivre une action motrice. Les différents capteurs sont étroitement liés et agissent en synergie sur les muscles de la posture afin de conserver l'équilibre, ainsi que sur les muscles oculomoteurs afin d'assurer la stabilité du champ visuel. Cette perception d'ensemble du corps favorise ainsi le contrôle de la posture et des mouvements.



Résumé des principales fonctions assurées par la sensibilité proprioceptive des muscles chez l'homme. D'après Roll & Roll, 1988.

Cette approche poly ou multi modale de la perception et du contrôle du mouvement, fondée sur l'idée d'une coopération entre plusieurs systèmes sensoriels, s'apparente au problème de "fusion des capteurs" en robotique. La convergence des informations sensorielles se réalise à tous les niveaux du système nerveux. Celui-ci ne traite pas les informations sensorielles indépendamment les unes des autres mais possède au contraire la capacité de reconstituer ce flux informationnel en un tout signifiant par l'intégration de ces informations, par la fusion de données sensorielles (phénomène de liage).

Le cerveau ne traite pas de façon séparée les informations issues de ses différents capteurs. Le mouvement est le fruit d'une intermodalité sensorielle, il nécessite de la part du cerveau la reconstruction cohérente de l'unité du corps afin de permettre au mouvement de se développer dans sa relation à l'environnement. Différentes analyses complémentaires se déroulent en parallèle dans les différentes aires corticales. Pour Sherrington (1906), l'un des premiers à évoquer cette notion, l'intégration est une opération par laquelle le système nerveux transforme en les unifiant les actions venues d'organes séparés, rendant dès lors ceux-ci solidaires les uns des autres. Pour Reuchlin (1977), "on peut dire à titre de première approximation qu'une intégration est une opération par laquelle se constitue un tout, une unité, un "entier". Le mot éveille l'idée qu'à l'intérieur de l'unité ainsi constituée les éléments constitutifs entretiennent entre eux des rapports cohérents. Cette cohérence apparaît si l'on croît constater que les éléments constitutifs coopèrent à la poursuite d'une fin commune.



Différentes aires du cerveau (sensitives, motrices) rendant compte d'une organisation fonctionnelle.

Ces différentes formes d'interactions modalitaires permettent au sujet de se construire par l'action une stabilité, une cohérence du monde (grâce à leur congruence). Elles favorisent également l'adaptation aux conditions parfois changeantes d'une situation donnée (ces adaptations peuvent se traduire par la mise en jeu de processus vicariants ou de substitution, de suppléance d'un système par un autre lorsque le premier s'avère défaillant - voir par exemple l'utilisation du système visuo-vestibulaire dans la réalisation d'acrobaties gymniques).

B) Perception, action, prédiction

Pour Berthoz, (1997), le cerveau est capable de prédiction. C'est une machine à prédire, un générateur d'hypothèses qui permet la mise en place de gestes préparatoires, d'ajustements posturaux anticipés intégrant dans la production de l'action les conséquences sensorielles attendues de cette action. Ainsi, lors d'un soulever de charge, en fonction de la perception par le sujet de l'action à réaliser, ce dernier adopte une attitude lui permettant de minimiser par exemple le déséquilibre consécutif à son action de soulever. Cette anticipation permet le déclenchement d'un mouvement de correction permettant au sujet de conserver son équilibre. Le cerveau permet d'anticiper sur les conséquences de l'action en utilisant la mémoire du passé. L'exemple du garçon de café est de ce point de vue tout à fait illustratif. Nous nous trouvons là dans une perspective actif *versus* passif. Si le garçon de café soulève lui-même la bouteille de son plateau, il anticipe sur les conséquences de son action et diminue automatiquement l'intensité de la force qu'il exerce sur le plateau. Il disposerait ainsi d'une mémoire motrice de l'action à effectuer, d'un modèle interne de cette action lui permettant d'en prévoir et d'en minimiser les conséquences. Par contre, si le plateau est soulevé par une autre personne, cette modulation, cette adaptation de l'action ne sont plus possibles (même prévenu, il est impossible pour le sujet d'empêcher le plateau de se soulever). Chacun et chacune d'entre nous a pu vivre ce genre de situation par exemple lors d'un déplacement en automobile, où les possibilités d'anticipation et d'adaptation instantanée à une modification rapide ou inattendue sont vécues tout à fait différemment selon que l'on est conducteur ou passager.

Pour Bernstein (1961), "la planification d'un acte moteur, quelle que soit la façon dont il est codé par le système nerveux, implique nécessairement la reconnaissance du pattern de ce qui doit être mais qui n'existe pas encore. Cette planification exige une exploration du futur. De même que le cerveau construit une image du monde extérieur, il doit posséder à un certain degré la capacité de former une représentation ou de planifier à l'avance des situations qui ne sont pas encore réalisées. Par exemple, un musicien ou chacun d'entre nous lisant un texte déplace son regard avec un intervalle d'avance sur les notes et sur les mots à chaque instant. Ceci veut dire que les images acoustiques et psychomotrices de ce qui doit être réalisé par un mouvement dans la fraction de seconde qui suit doivent être présentes dans le cerveau tout le temps. Essayez par exemple de vous réciter à vous-même un poème. Si vous vous écoutez mentalement, vous constatez que deux textes passent dans votre oreille interne : un texte au tempo de votre déclaration et un texte qui le précède."

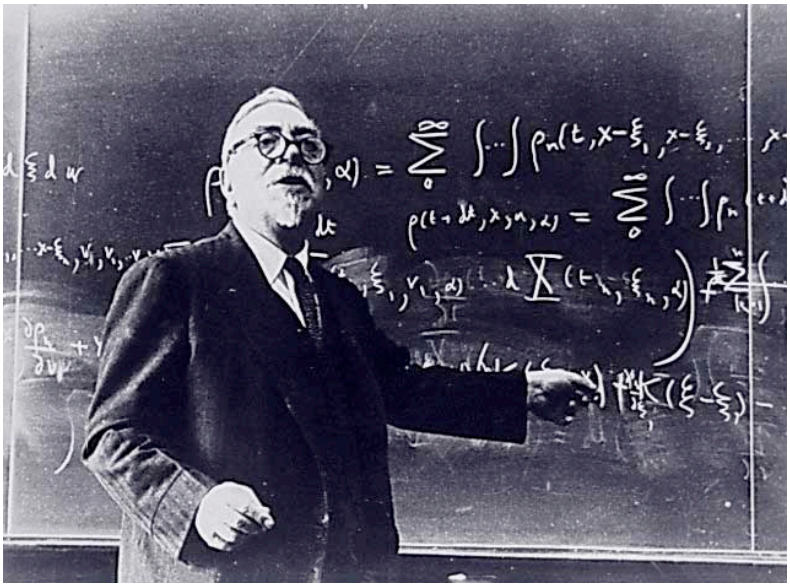
Le cerveau effectue donc de nécessaires anticipations et prédictions du futur. On ne peut pas être champion de ski si l'on ne traite pas en permanence les informations sensorielles données par les capteurs sensoriels et que l'on ne corrige pas en conséquence sa trajectoire. Il faut prédire celle-ci, la simuler en interne et vérifier de temps en temps, de façon intermittente, l'état de configuration de capteurs pré-sélectionnés par le cerveau en même temps qu'est planifié le mouvement (Berthoz, Leçons au Collège de France).

En résumé *: Pour Berthoz, le cerveau est un générateur d'hypothèses, une machine à prédire utilisant la mémoire du passé, l'action ne servant en quelque sorte qu'à vérifier ces prédictions (et à en construire de nouvelles). Perception, prédiction, anticipation, action sont intimement liées.*

C) La cybernétique

L'invention du terme, du concept et de la discipline cybernétique est due au mathématicien américain Norbert Wiener (1894-1964), le mathématicien et cybernéticien français Louis Couffignal (1902-1966) étant considéré comme l'un des co-fondateurs de cette discipline. Le terme apparaît pour la première fois en 1947 pour nommer la science traitant de la commande, "du contrôle et de la communication chez les animaux et les machines". Les fondements de cette nouvelle science de contrôle des systèmes sont exposés par Wiener dans son livre "Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine (1948)". Le mot «cybernétique» vient du grec kubernêtikê, terme qui désigne l'art de gouverner un navire.

L'idée de base de la cybernétique est selon Couffignal (1953) l'art de rendre l'action efficace. L'idée originale était de créer une science nouvelle permettant à un système d'évoluer efficacement grâce notamment à la mise en jeu de processus de rétroaction. Ce contrôle en ligne, cette information en retour, permet la prise en compte des conséquences de l'action afin d'adapter, par la mise en jeu de corrections sensorielles, son comportement aux contraintes de l'environnement. C'est une idée que l'on retrouve dans le domaine du contrôle moteur, Bernstein l'avait évoquée voici déjà de nombreuses années en décrivant ces corrections sensorielles en 1928 (soit une vingtaine d'années avant Wiener). Nous aurons l'occasion de revenir sur cette idée d'optimisation du fonctionnement d'un système (recherches d'invariances, réduction du nombre de degrés de liberté d'un système, variable contrôlée, contrôle de l'entropie par l'intermédiaire de la rétroaction, fonction de coût, principe de simplicité, etc.).

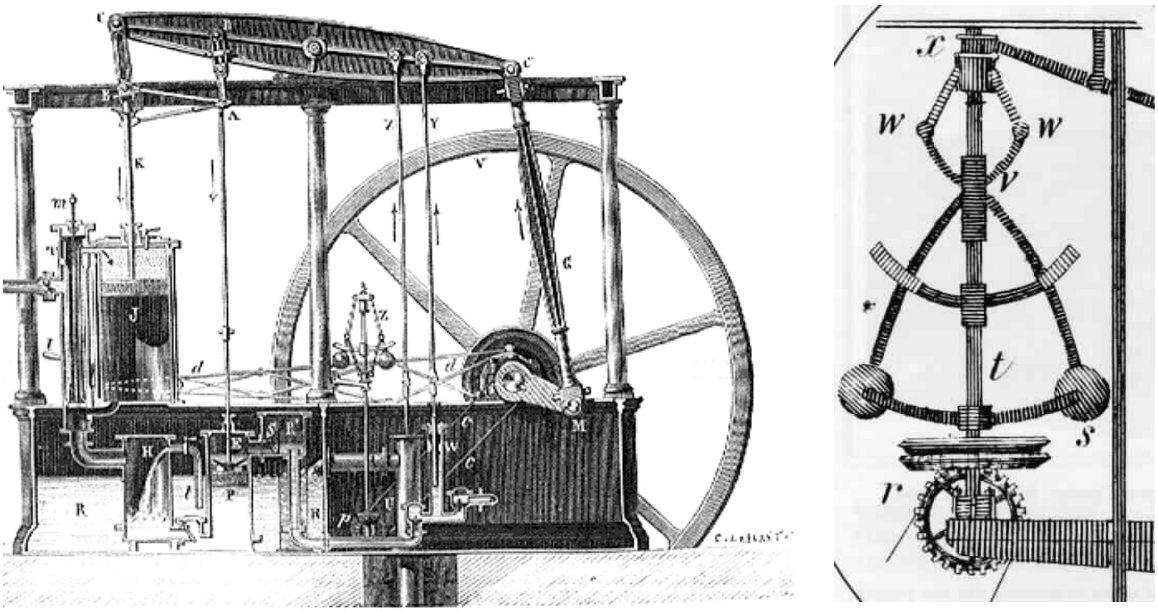


Norbert Wiener (1894 – 1964) *Louis Couffignal (1902-1966)*

La cybernétique est une science du contrôle des systèmes, vivants (ce peut être l'organisme humain, le cerveau) ou non (une société, un parc d'ordinateurs reliés en réseau, …). Ces systèmes possèdent un certain nombre d'éléments en interaction. Ce qui compte, ce sont bien sûr ces éléments, leur nature, leurs caractéristiques, mais également et de façon marquée leurs relations, les interactions développées entre ces différents éléments. Ces interactions peuvent être des échanges d'énergie, d'information. Il faut dans cette approche adopter un mode de pensée systémique, avec l'idée selon laquelle la modification d'une relation entre un ou des éléments entraîne une modification d'état de ce système et affecte globalement son fonctionnement. Un système ne se réduit pas en effet à la somme de ses parties (Von Bertalanffy, 1972). Les interactions entre les éléments donnent à l'ensemble des propriétés que ne possèdent pas les éléments pris séparément. On dit alors que "le tout est supérieur à la somme des parties", bien que cette formulation soit sujette à débat. Si nous prenons l'exemple de la pratique d'une activité physique, il est facile de convenir du fait que le joueur ne se réduit pas à l'addition de ses capacités à tirer, passer, dribbler. En fonction de l'organisation particulière de ces différentes capacités, on aura affaire à des compétences particulières, singulières, en tous cas différentes selon les sujets. On pourrait bien évidemment étendre l'analyse.

La communication, l'échange, le signal, l'information, la mémoire, la rétroaction constituent donc autant de notions centrales de la cybernétique. Tout ceci s'inscrit dans la perspective de la construction d'un état d'équilibre du système, d'une homéostasie. Il s'agit ici de systèmes auto-

régulés dont une illustration a été fournie voici déjà longtemps par le physicien James Watt en 1788. La question qui se posait alors était celle de la régulation du mouvement d'une machine à vapeur, le maintien du fonctionnement de cette machine en fonction d'une valeur donnée.



Machine de Watt à double effet et son régulateur

La machine telle qu'elle apparaît *supra* intègre un régulateur à boules dans le corps de son dispositif. Le principe en est très simple : en fonction de la vitesse de rotation (plus la vitesse augmente, plus les boules s'écartent), les boules s'écartent plus ou moins de l'axe central, libérant ainsi une valve permettant à la vapeur de s'échapper. Ainsi, une quantité élevée de vapeur, une pression élevée, entraînent une rotation élevée du régulateur à boules, cette rotation élevée entraînant alors une libération de la quantité de vapeur réduisant la vitesse de rotation du régulateur. On parvient ainsi à un état d'équilibre du système, le régulateur tendant à rétablir cet équilibre nécessaire au fonctionnement normal du système.

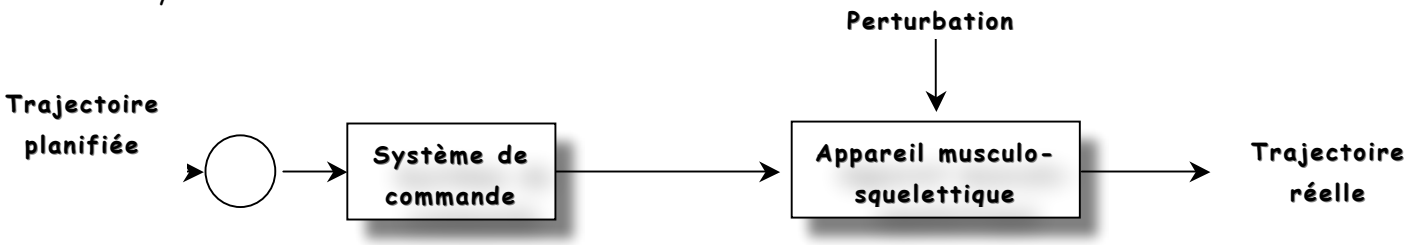
De nos jours, un exemple simple de régulation d'un système peut être trouvé dans le moteur d'une automobile, avec le thermostat (on trouve le terme de calorstat). Une température excessive du circuit d'eau entraîne la mise en jeu du ventilateur, abaissant ainsi la température et permettant au système de fonctionner dans des conditions normales (sinon, le moteur vit en général ses derniers instants).

En résumé *: La cybernétique est une science du contrôle des systèmes. L'idée de base est la réduction de la complexité des systèmes. Elle s'appuie sur un certain nombre de notions, comme*

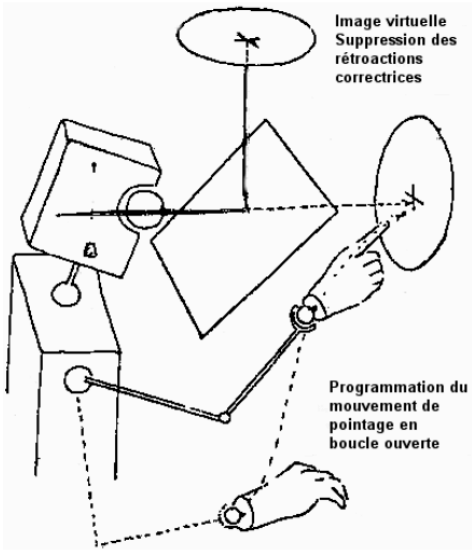
la communication, l'échange, le signal, l'information, la mémoire, la rétroaction, la régulation, l'état d'équilibre d'un système.

D) Systèmes de contrôle proactif et rétroactif

Un système de contrôle moteur peut agir de deux façons différentes : s'il agit en basant ses actions sur des signaux qui ne sont pas affectés par les sorties du système, il agit comme un contrôleur en mode proactif (ou en boucle ouverte ou en *feed forward*) : le chemin de contrôle ne nécessite pas de signal de retour. Les schémas de contrôle en mode proactif peuvent être groupés comme étant basés sur un contrôle direct et sur un contrôle indirect utilisant un modèle interne. Le contrôle direct signifie ici un contrôle sans connaissance explicite du comportement du système.



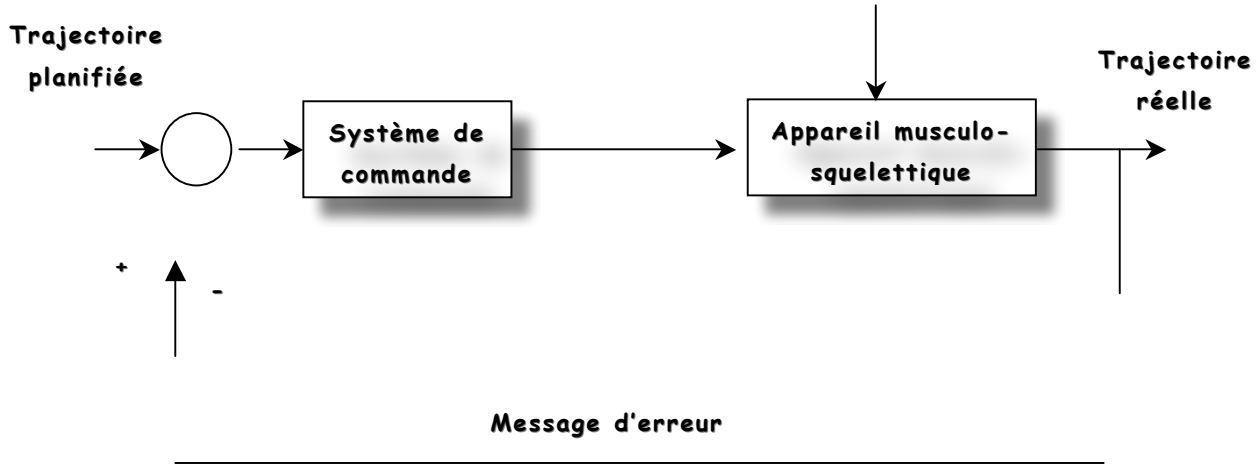
Système de contrôle en mode proactif (d'après Massion, 1997)



Principe d'une épreuve de pointage visuo-manuelle en boucle ouverte chez l'homme. Le sujet pointe une cible virtuelle sans voir sa main et par suite sans possibilité de détecter ses erreurs éventuelles. La précision du pointage est ici fonction du programme de projection du membre déclenché et du repérage de la position de la cible. Paillard, 1980.

L'avantage du contrôle en mode proactif est qu'il peut, dans le cas idéal, donner une performance parfaite avec une erreur nulle entre la référence et la variable contrôlée. En revanche, les principaux désavantages des systèmes biologiques fonctionnant en mode proactif sont les difficultés pratiques pour développer un contrôleur précis et le manque de corrections pour des perturbations inattendues. Si le contrôleur n'est pas précis, les erreurs de sortie ne seront pas vérifiées ou incomplètement. Parce qu'aucun système biologique ne peut être à la fois

d'une précision parfaite et non soumis à des perturbations externes, on a besoin habituellement d'une correction d'erreur. La plupart des exemples biologiques de contrôleur en mode proactif sont alors couplés avec un contrôleur en mode rétroactif.

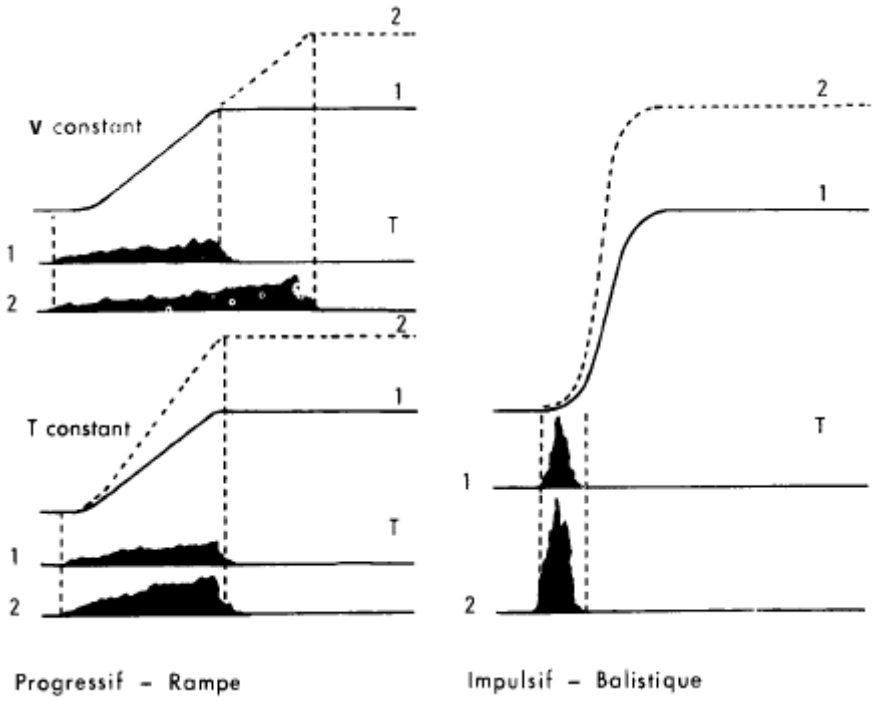


Système de contrôle en mode rétroactif (d'après Massion, 1997)

Si le contrôleur base ses actions sur une comparaison entre les valeurs de référence et les variables contrôlées (*via* un comparateur), c'est un contrôleur en mode rétroactif (ou en boucle fermée ou en *feed-back*). De plus, comme le rappelle le schéma ci-dessus, la survenue d'une perturbation est prise en compte dans ce modèle, qui favorise alors un changement adaptatif permettant au sujet de répondre à cette nouvelle contrainte inattendue. Bien sûr, il est possible d'ajouter des stratégies plus compliquées à ces systèmes simples. Par contraste avec le mode de contrôle en mode proactif, l'avantage majeur du contrôleur en rétroaction négative réside dans sa stratégie toute simple et robuste. En mode rétroactif, le contrôleur dirige le système de façon à supprimer l'erreur signalée par le comparateur. Il existe une recherche constante de suppression d'erreur.

Ce qu'il importe de bien comprendre dans ce mode de contrôle rétroactif dit en boucle fermée, c'est la relation entre l'entrée et la sortie du système. Si la valeur de la sortie entraîne une augmentation de la valeur de l'entrée, on parle dans ce cas-là d'une rétroaction positive. Ce peut être dangereux pour le système lui-même puisque cela risque de le conduire à un dysfonctionnement (imaginons par exemple une augmentation de chaleur en entrée qui entraîne une augmentation de chaleur en sortie). En revanche, si la valeur de la sortie a pour conséquence une diminution de la valeur du signal en entrée, on parle alors de rétroaction négative permettant de stabiliser le système en régulant son fonctionnement.

Les critères utilisés pour le contrôle en mode rétroactif négatif sont dominés par le "gain de boucle fermé". Le gain est défini comme le rapport de la sortie sur l'entrée du système. Pour un servo-contrôleur ou un système assisté comme les systèmes fonctionnant en boucle fermée, le gain devrait être proche de l'unité dans toutes les conditions, ce qui signifierait qu'une information d'entrée (*input*) donnée, comparée à la valeur de référence, entraîne une sortie (*output*) d'égale valeur. Mais un des principaux désavantages du contrôle en mode rétroactif est que le gain en boucle fermé est la plupart du temps inférieur à l'unité (ce qui signifie que les erreurs ne sont jamais complètement corrigées). Il est par ailleurs important de rappeler que la comparaison de la valeur de référence et de la variable contrôlée pour calculer le signal d'erreur est affectée, c'est-à-dire retardée, par la dynamique du système de contrôle moteur. En conséquence, si le contrôleur produit une action, ses effets ne sont pas immédiatement visibles pour le comparateur. La vitesse des réponses doit être conservée faible pour prendre en compte le retard de la boucle en mode rétroactif de façon à éviter l'instabilité du système.



Schématisation des deux modalités de travail, progressive et impulsive, du noyau moteur. La contraction en rampe peut atteindre une amplitude de mouvement donnée : soit en opérant à vitesse constante (constance de la pente de recrutement de l'EMG) et à durée variable (figure du haut); soit à durée stable mais à vitesse variable (figure du bas). Le mouvement balistique est déclenché par une bouffée EMG brève (100ms) dont l'amplitude détermine la vitesse maximale du mouvement et, par suite, l'amplitude du mouvement dans les conditions d'un freinage purement passif. D'après Paillard, 1982.

Au niveau du moteur musculaire (Paillard, 1982), on distingue généralement deux types de fonctionnement, une commande dite en rampe ou progressive permettant au système de bénéficier d'une assistance en continu (feed-back) et une commande balistique ou impulsive dont la brièveté ne lui permet pas de bénéficier de bénéficier de cette assistance et va donc « l'obliger » à travailler en proactif (feed-forward).

En résumé *: On distingue généralement deux types de contrôle : un contrôle en mode proactif, sans action en retour sur le système, et un contrôle en mode rétroactif, proposant une information en retour. Attention, une rétroaction négative, fonctionnant par réduction d'écart par rapport à une valeur de référence, possède un effet positif sur le système (elle permet de stabiliser le système en régulant son fonctionnement).*

E) Les différents modèles de contrôle moteur rétroactifs

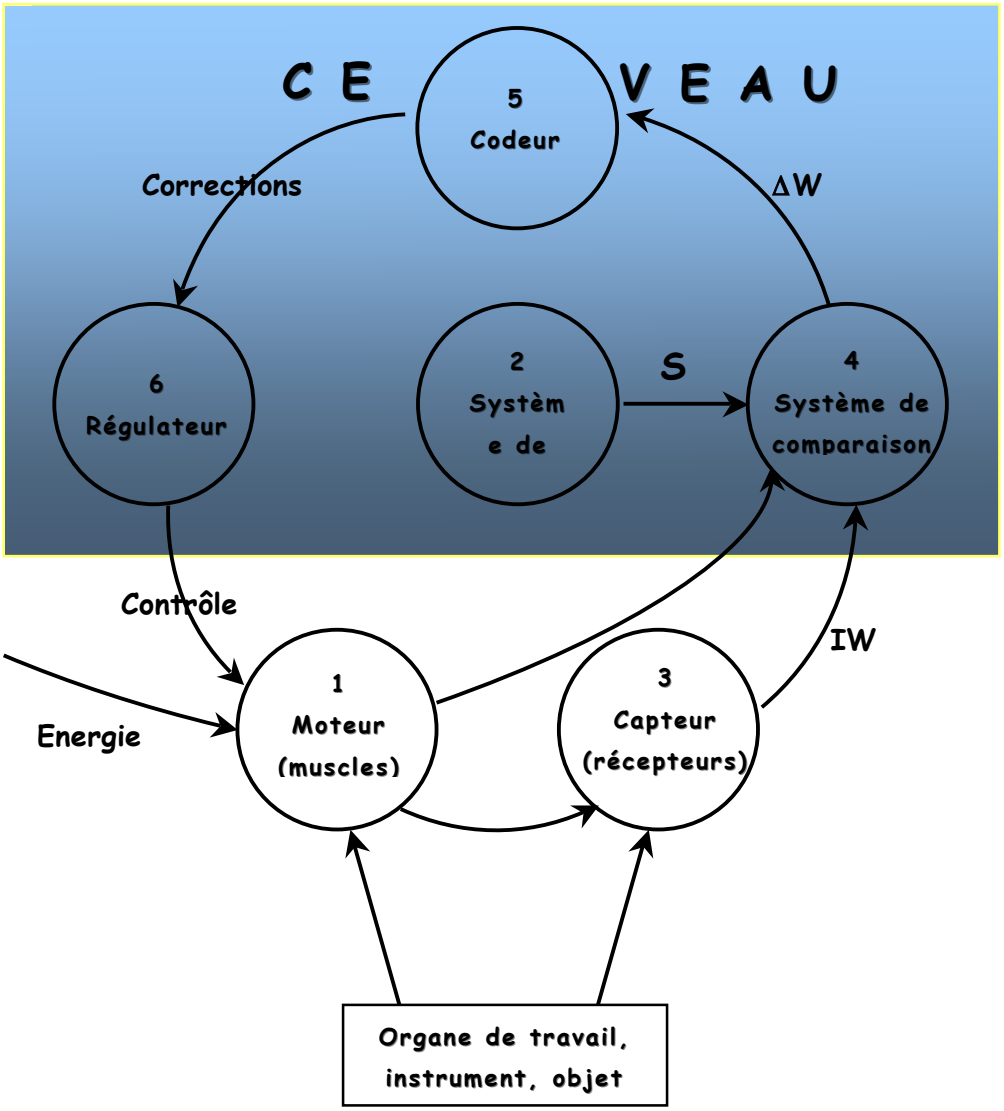
Différents modèles de système de contrôle fondés sur un système en boucle fermée (permettant la détection de l'erreur et sa correction) ont été proposés.

e_1) le modèle de Bernstein

Bernstein (1937, 1954, 1967) est, à notre connaissance, le premier auteur à utiliser la théorie en boucle fermée pour modéliser le contrôle moteur. Il formule l'hypothèse selon laquelle la construction du mouvement résulte d'une interaction entre le cerveau et le système périphérique sensoriel : pour produire un mouvement, le cerveau non seulement adresse une commande aux muscles, mais reçoit les informations du système périphérique à partir desquelles il envoie une nouvelle information modifiée. Le feed-back, cette information en retour, peut ainsi être considéré comme un suivi permanent du mouvement à l'aide du suivi sensoriel, ce qui permet de procéder aux corrections nécessaires. Cette conception amène à une conclusion fondamentale, essentielle, rappelant que le seul moyen d'apprendre un mouvement est de le produire vraiment afin de ressentir toutes les sensations qui en permettent les corrections sensorielles (Byrukova & Bril, 2002).

Bernstein propose un schéma circulaire du contrôle du mouvement le plus simple possible. Dans ce schéma, qui comprend différentes étapes, un élément fondamental de la théorie est un comparateur qui va utiliser les données de ce qu'il a appelé Sollwert (Sw - en utilisant la terminologie allemande), c'est-à-dire la valeur requise ou valeur à atteindre. On retrouve ce concept dans un grand nombre de modèles récents de contrôle du mouvement.

Ce modèle comprend un premier élément constitué par le muscle ou les groupes musculaires qui produisent l'action motrice (on peut parler d'effecteur, d'actuateur) en fonction d'un certain nombre de paramètres prédéfinis. Un récepteur (ou capteur) mesure ce qui est réellement, effectivement produit par le système (Iw pour Istwert ou valeur effective) et adresse cette information afférente à un système de comparaison en relation avec un système de commande qui joue en quelque sorte un rôle de contrôleur. Cette comparaison vérifie, précise l'écart entre ce qui est attendu (le Sollwert ou valeur requise) et ce qui est produit (l'Istwert). La différence entre ces deux valeurs est désignée par un w (Deltawert) et adressée à un enregistreur qui va traduire, transformer, coder cette valeur d'erreur en un certain nombre de corrections à apporter. Ces informations sont transmises enfin à un régulateur qui va régler les paramètres, modifier le fonctionnement de l'effecteur en fonction des valeurs de ces paramètres.



Modèle de Bernstein, 1970

On retrouve dans ce modèle la mesure d'une erreur entre le mouvement réalisé et le mouvement attendu, voulu. Cette mesure d'une erreur, qui induit une correction (une modulation, une régulation) représente un des concepts des plus classiques dans les modèles cybernétiques. La fonction des éléments centraux (commande, contrôle, comparaison) est finalement une fonction d'adaptation. En effet, devant les imprévus que déclenche l'action, Bernstein estime qu'il est impossible ou souvent non pertinent pour les impulsions correctives de modifier le plan initial. Dans ce cas, le récepteur d'information doit agir comme un déclencheur discret de changements adaptatifs dont le programme affère pendant qu'il est en action. Une fois encore, l'anticipation et la prédiction jouent ici un rôle important.

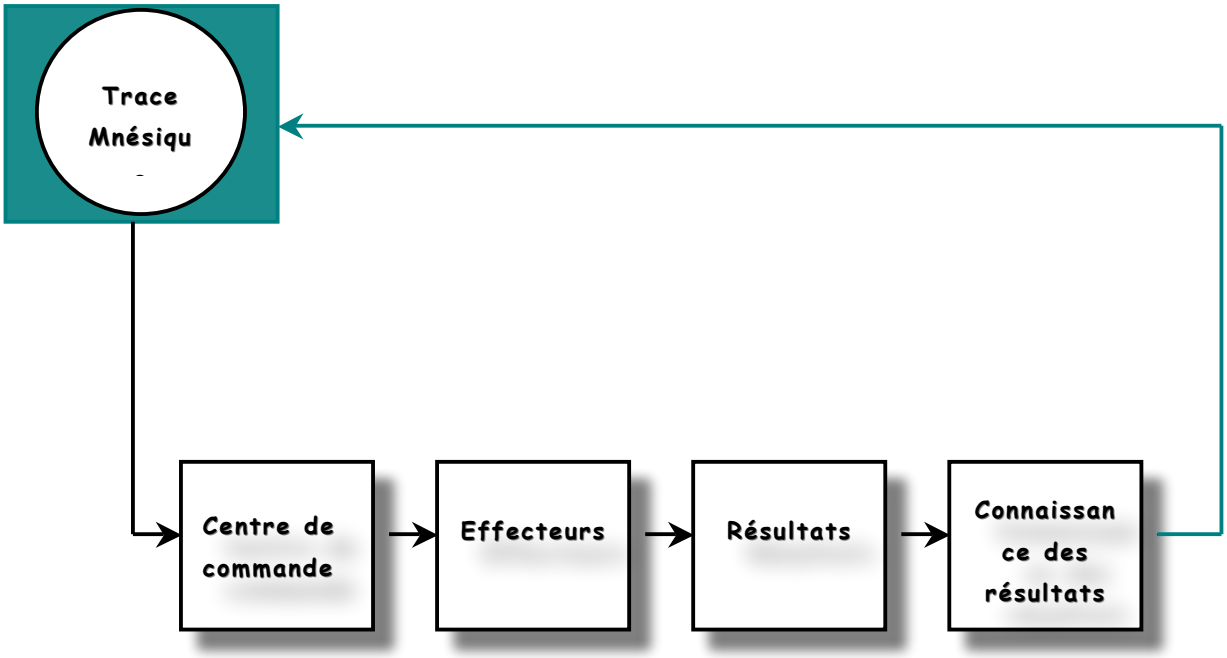
e_2) le modèle d'Adams

Il est important de préciser que les travaux de cet auteur sont basés sur des mouvements progressifs de positionnement linéaire lents (le sujet devant exécuter un mouvement jusqu'à une butée), puis sur la reproduction de ce mouvement sans information externe (par exemple en absence de vision, sans la présence de la butée). Il s'agissait alors de vérifier la capacité du sujet à reproduire ce mouvement de la façon la plus fidèle possible (avec la même amplitude).

Comme le précédent modèle proposé par Bernstein, le modèle d'Adams contient une valeur de référence (le Sollwert de Bernstein) à laquelle va être comparée la performance (au sens anglo saxon du terme) du sujet, c'est-à-dire le mouvement réalisé. Le modèle d'Adams est construit sur l'utilisation de la mémoire en général, et plus particulièrement de 2 types de mémoire (bien que ces termes n'apparaissent pas explicitement dans son modèle) : la mémoire de rappel et la mémoire de reconnaissance. En ce qui concerne les processus mentaux impliqués dans l'apprentissage et le contrôle moteur, la mémoire de rappel permet l'évocation, le rappel de certains événements ou éléments. La mémoire de reconnaissance, en favorisant leur identification, permet la prise de décision, l'effectuation de la réponse, le développement du mouvement.

L'hypothèse formulée par Adams est celle de la présence de deux traces au niveau central, une trace mnésique et une trace perceptive. La trace mnésique, analogue à la mémoire de rappel dans l'apprentissage verbal, correspond au rappel ou à l'évocation par le système d'éléments stockés et permet la production de la réponse. La trace perceptive, analogue à la mémoire de reconnaissance dans les tâches verbales, permet l'identification d'un stimulus ou d'une réponse. La trace mnésique permet la sélection et le lancement de la réponse. Elle représente, selon Adams, "un programme moteur modeste", responsable du choix de la direction de l'action, initiant

celle-ci, déterminant les premières parties du mouvement et lui donnant une impulsion ou une poussée vers la cible.

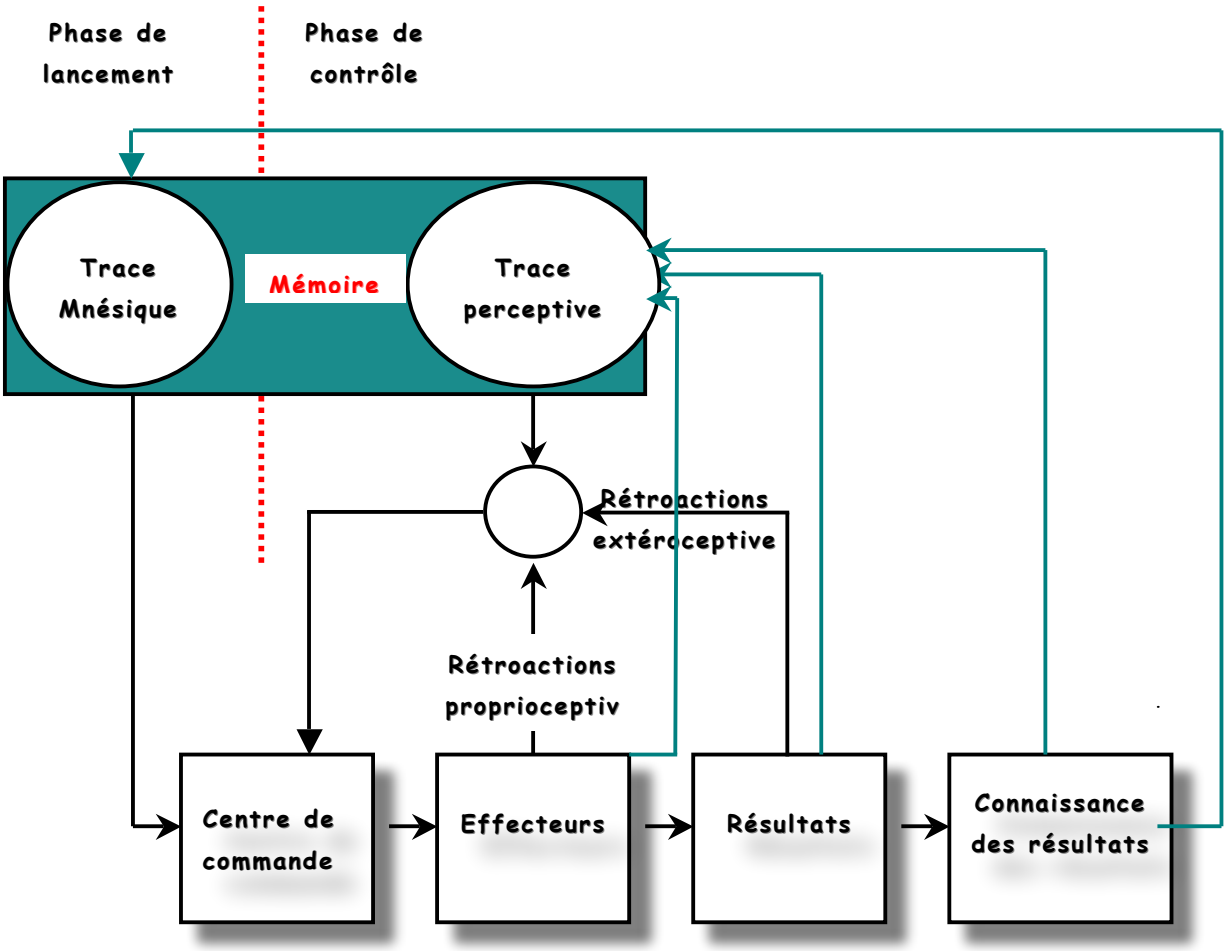


Théorie en boucle fermée (closed-loop). Phase de lancement. D'après Adams, 1971

Qu'entend-on par programme moteur ? Selon Paillard, au sens strict, c'est ce qui est écrit d'avance. Il est possible de le définir comme une suite d'instructions spécifiques, localisées centralement, déterminant à l'avance les diverses opérations motrices à effectuer en les paramétrant (force, amplitude, vitesse, précision, etc.) et donnant au mouvement ses caractéristiques (forme, durée, etc.). Le programme moteur permet d'organiser le mouvement (effecteurs sollicités, ordre et durée de leurs contractions). Pour Keele (1968), le concept de programme moteur peut être vu comme un ensemble de commandes musculaires structurées avant le début de la séquence du mouvement et permettant à cette séquence (motrice) de se réaliser dans sa totalité sans influence d'un feed-back extérieur. Selon cet auteur, un programme moteur n'est pas le mouvement lui-même, mais ce qui agit pour contrôler le mouvement. Un programme moteur peut ainsi être activé sans pour autant qu'un mouvement soit réellement déclenché.

La trace mnésique se construit peu à peu, nourrie par les différents feed-back et la connaissance des résultats des expériences antérieures. Cette trace mnésique est ensuite nourrie en quelque sorte par une trace perceptive, stabilisée au cours du temps à la faveur de la répétition. En effet, lorsqu'un sujet produit un mouvement de positionnement par exemple, le

feed-back correspondant qui en résulte représente les positions particulières du segment corporel dans l'espace. La répétition du mouvement permet à ce sujet d'affiner son geste, d'en augmenter la précision et la possibilité de le reproduire de façon de plus en plus efficiente. Les stimuli laissent une trace au niveau du système nerveux central et cette trace perceptive va peu à peu constituer la valeur de référence, la valeur attendue à laquelle sera comparé le mouvement réellement exécuté. Le sujet se construit ainsi progressivement, grâce notamment à la connaissance des résultats, une représentation, un modèle interne du mouvement à produire, du geste correct attendu. A terme, il produit dans l'espace un geste pour lequel la différence entre ce geste et la valeur de référence est minimale. La connaissance des résultats représente de ce point de vue une sorte de guide de l'action pour l'apprentissage et le contrôle du geste. Les feed-back peuvent en effet être considérés comme autant de renforcements subjectifs perçus, traités et utilisés par le sujet dans la réalisation de la tâche. Il se crée ainsi en quelque sorte au cours du temps un répertoire de ces traces.



Théorie en boucle fermée (closed-loop). D'après Adams, 1971

Pour Adams, ces feed-back peuvent être de nature verbale dans les premiers temps de l'apprentissage (il évoque à ce propos un stade verbal moteur). Une expérience menée par Thorndike en 1927 (*The law of effect*, la loi de l'effet) montre ainsi que des sujets aveugles sont capables de tracer une ligne d'une longueur donnée simplement lorsque l'expérimentateur qualifie leur réalisation à la fin de chaque essai (réussi ou non). Puis, par la constitution progressive d'un stock en quelque sorte de réalisations motrices, le sujet passe progressivement de ce stade verbal moteur au stade moteur, son vécu moteur (*i.e.* l'intégration de ses données proprioceptives) lui permettant de procéder aux régulations proposées par ce modèle.

Divers reproches ont été adressés à Adams, notamment i) de limiter son approche aux mouvements de positionnement, non représentatifs de l'ensemble du répertoire moteur d'un sujet (cette limite est délibérée de la part d'Adams du fait de l'absence de résultats patents dans d'autres tâches) ii) de ne pas prendre en compte les mouvements rapides, iii) d'accorder une place centrale aux feed-back dans l'élaboration de son modèle. Or, différents auteurs ont montré, à la suite d'expérimentations sur les animaux, que des organismes privés de feed-back sensoriels en provenance des membres (par déafférentation, *i.e.* section des racines postérieures de la moelle par exemple) peuvent produire des réponses habiles et même apprendre de nouvelles habiletés, par la mise en jeu éventuellement de générateurs de patrons centraux de mouvements (ou CPG), fonctionnant en boucle ouverte. Ces CPG ont été proposés par Grillner (1975) pour caractériser et expliquer les modes de déplacement (locomotion, nage, reptation) de différentes espèces animales. Ces générateurs dépendent d'une organisation centrale, génétiquement déterminée et située par exemple au niveau de la moelle épinière. Une simulation ou un ordre central déclenche la mise en œuvre d'une action motrice spécifique, qui perdure même en cas de section des afférences sensorielles.

Par ailleurs, la variabilité des conditions d'apprentissage dans la construction d'une habileté particulière semble montrer que le sujet trouve là également une façon de développer une habileté avec la même efficacité que par la répétition singulière de la même tâche motrice. Le domaine des activités physiques et sportives nous en apporte quotidiennement la preuve. Ceci ne semble pas avoir été pris en compte par cet auteur.

Enfin, un dernier reproche porte sur les possibilités de stockage nécessairement limitées du système nerveux central. En effet, si chaque geste produit et mémorisé correspond à un programme spécifique stocké par le système nerveux central, se pose rapidement la question de

la capacité de ce système à disposer d'espace suffisant en mémoire pour conserver tous ces programmes. En parallèle avec ce problème apparaît celui de la production d'un mouvement nouveau (comment le produire s'il n'existe pas en mémoire ?).

e_3) le modèle de Schmidt

Les reproches adressés à Adams ont amené Schmidt, dans un souci d'enrichissement des propositions d'Adams, à proposer une théorie dite théorie du schéma de l'apprentissage d'habiletés motrices discrètes, développée en 1975 puis reformulée en 1977. Cette notion de schéma se voit définie de façon différente selon les époques. Pour Schmidt, en 1975, l'idée, classiquement associée à la perception, est que pour percevoir un ensemble de stimuli visuel (*e.g.* un chien), et pouvoir ensuite procéder à une classification correcte, il faut préalablement avoir reçu l'ensemble des stimuli en question (appel à l'expérience, au stockage, à une mémoire de reconnaissance). Ce concept forme la base d'un schéma ou règle pour déterminer le classement de ces stimuli (plus clairement, ces stimuli peuvent se définir comme un ensemble de caractéristiques permettant d'identifier l'objet ou l'événement chien). Le schéma peut s'entendre ici comme une abstraction permettant au sujet de reconnaître le patron original sans l'avoir nécessairement vu auparavant.

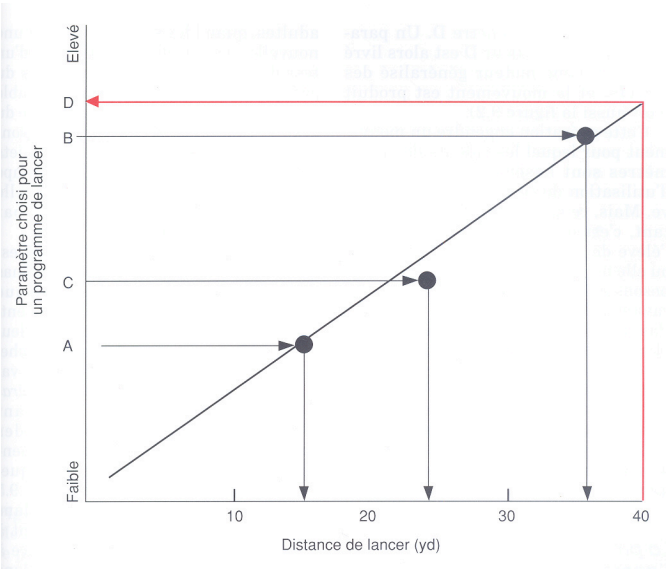
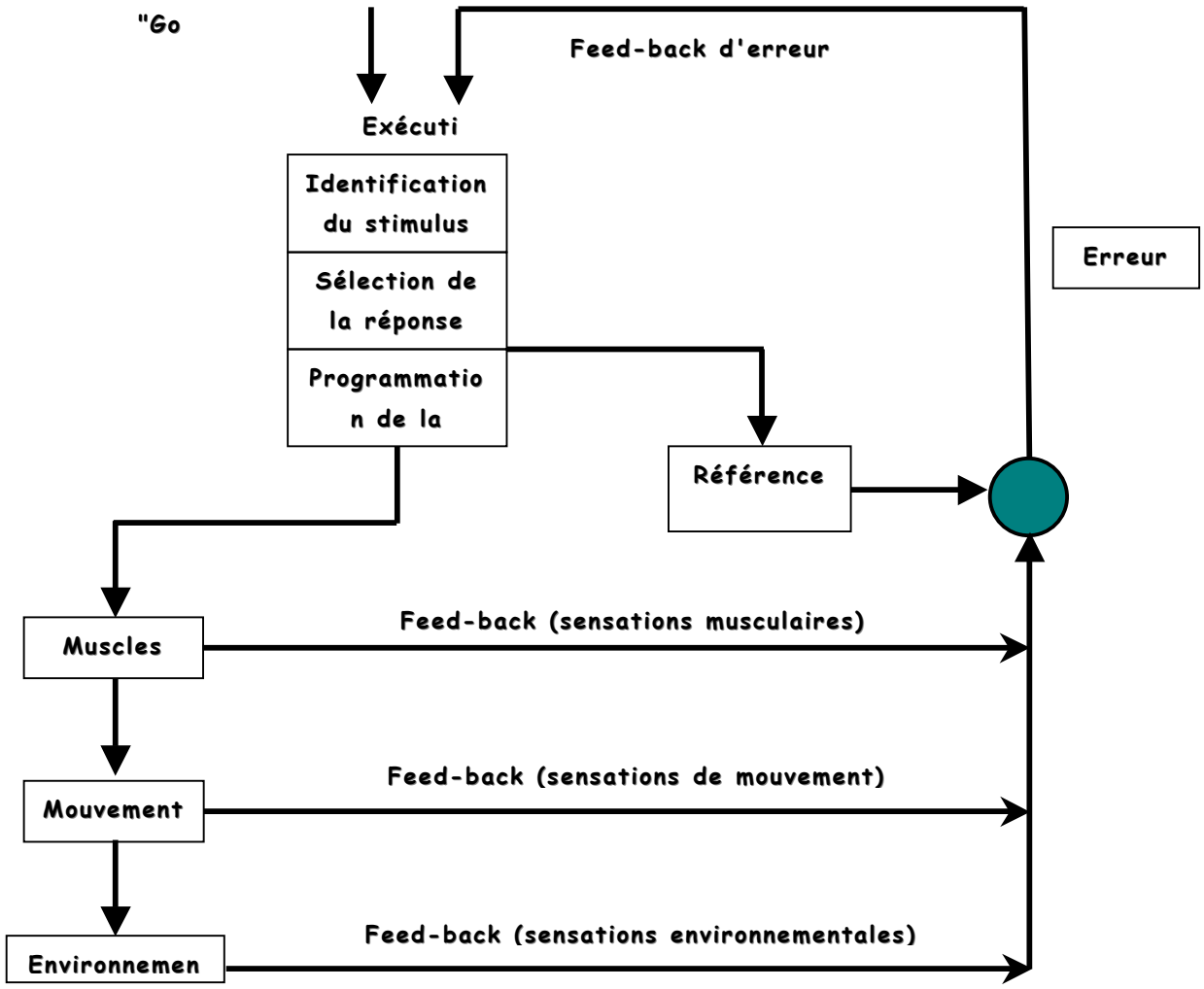


Schéma reliant les valeurs des paramètres aux distances d'une passe de football américain. Pour produire une passe de 40 yards, le schéma sélectionne un paramètre de valeur D (Schmidt, 1999). Pour mémoire, 1 yard = 0.914 m.

Plus récemment (1999, 2003), Schmidt définit le schéma comme une règle liant les divers résultats des membres d'une classe d'action (ici le lancer, cf. *supra*) aux paramètres qui déterminent le résultat. En clair, dans la pratique d'un lancer, le schéma permet au sujet de relier les distances obtenues aux paramètres (force, amplitude, vitesse, etc.) de l'action nécessaires pour produire ces distances. Il se produit donc à terme une relation générale entre

les valeurs de ces paramètres et les distances réalisées, le schéma étant remis à jour (actualisé) à chaque lancer successif.

La théorie du schéma postule qu'il existe deux types de mémoire, une mémoire de rappel et une mémoire de reconnaissance. Pour les mouvements rapides ou balistiques, la mémoire de rappel est mise en jeu avec les programmes moteurs et leurs paramètres, organisés à l'avance de façon à produire rapidement le mouvement. La mémoire de reconnaissance est un système sensoriel capable de prendre en compte les effets de l'action une fois le mouvement effectué. C'est donc un processus d'évaluation, permettant de vérifier si la réponse produite est correcte ou non. Les conséquences sensorielles attendues servent de base pour l'évaluation du mouvement.



Une extension du modèle en boucle fermée pour le contrôle du mouvement (Schmidt, 1999)

Comme Bernstein et un certain nombre d'autres auteurs (Sokolov, 1969 ; Anokhin, 1969 ; Konorski, 1967 ; Laszlo, 1967 ; Adams, 1971), Schmidt utilise le modèle théorique de contrôle en boucle fermée. Il précise très tôt que les idées principales de sa théorie peuvent être trouvées chez i) Lashley (1917) dans sa proposition de caractériser l'homme comme contrôlant centralement ses mouvements avec des programmes moteurs (expériences de cet auteur sur un sujet ayant perdu la sensibilité de ses membres inférieurs à la suite d'une blessure par balle, mais disposant toujours des voies efférentes lui permettant de positionner sa jambe avec une précision surprenante) ii) Bartlett (1932) pour la notion de schéma iii) Adams (1971) dans son application de la boucle fermée à l'apprentissage des habiletés motrices et enfin à iv) Pew (1974) pour les suggestions de l'application du schéma aux habiletés motrices.

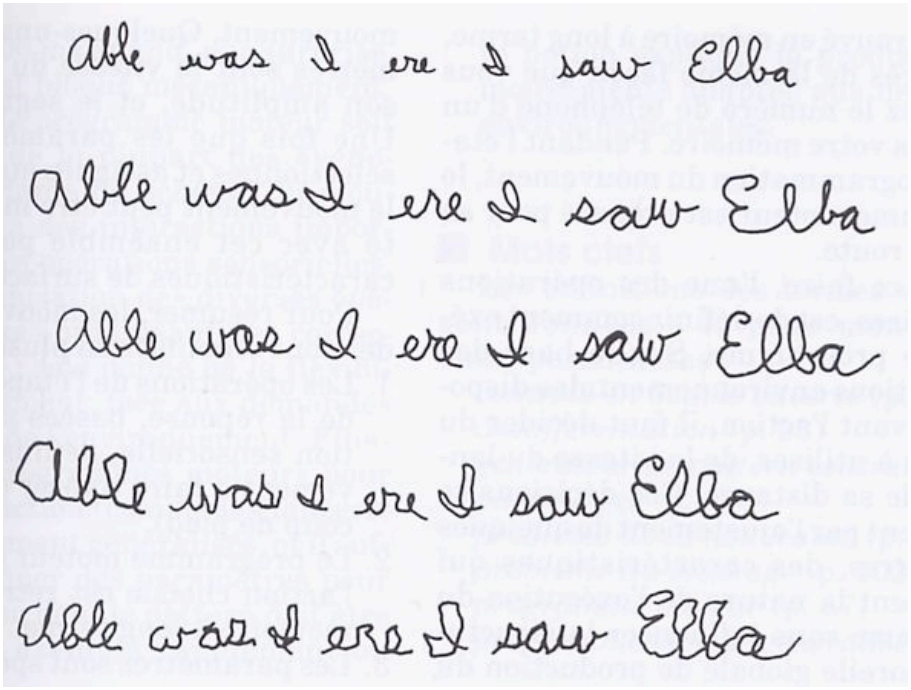
source : svhbnews.over-blog.com

Ces différents gestes sportifs, ces habiletés motrices reposent tous sur une base élémentaire connue, une même structure générale à partir de laquelle va pouvoir se développer un programme spécifique, singulier et original adapté et efficient.

Le mouvement du lanceur Tanyon Sturtz (Getty Images).

Schmidt construit son modèle à partir de la théorie de fonctionnement en boucle fermée. Selon lui, les sujets développeraient, au cours de l'acquisition d'une nouvelle habileté, un schéma

d'une action motrice particulière à effectuer à un moment donné, dans des circonstances données (saisie, déplacement, pointage, etc.). Ce schéma, stocké dans le cerveau, pourrait être défini comme la forme générale de cette action, une structure du mouvement, disponible à tout moment dans différentes situations, de différentes façons. Ceci postule la pré-existence, acquise par l'expérience, d'une représentation du geste à accomplir, un déjà-là en quelque sorte. En d'autres termes, le système planifierait un programme généralisé, global, dont les caractéristiques seraient plus finement définies en fonction de la situation (du global au local pourrait-on dire). Cette idée d'un programme moteur généralisé, d'une procédure générique en quelque sorte, modulable, transformable en fonction du contexte ouvre la voie à une perspective de variabilité quasiment infinie pour le système. A partir d'une base élémentaire connue, une structure générale, va pouvoir se développer un programme singulier et original adapté et efficient, comme s'il ne restait plus finalement qu'à régler quelques détails pour que le mouvement se développe.

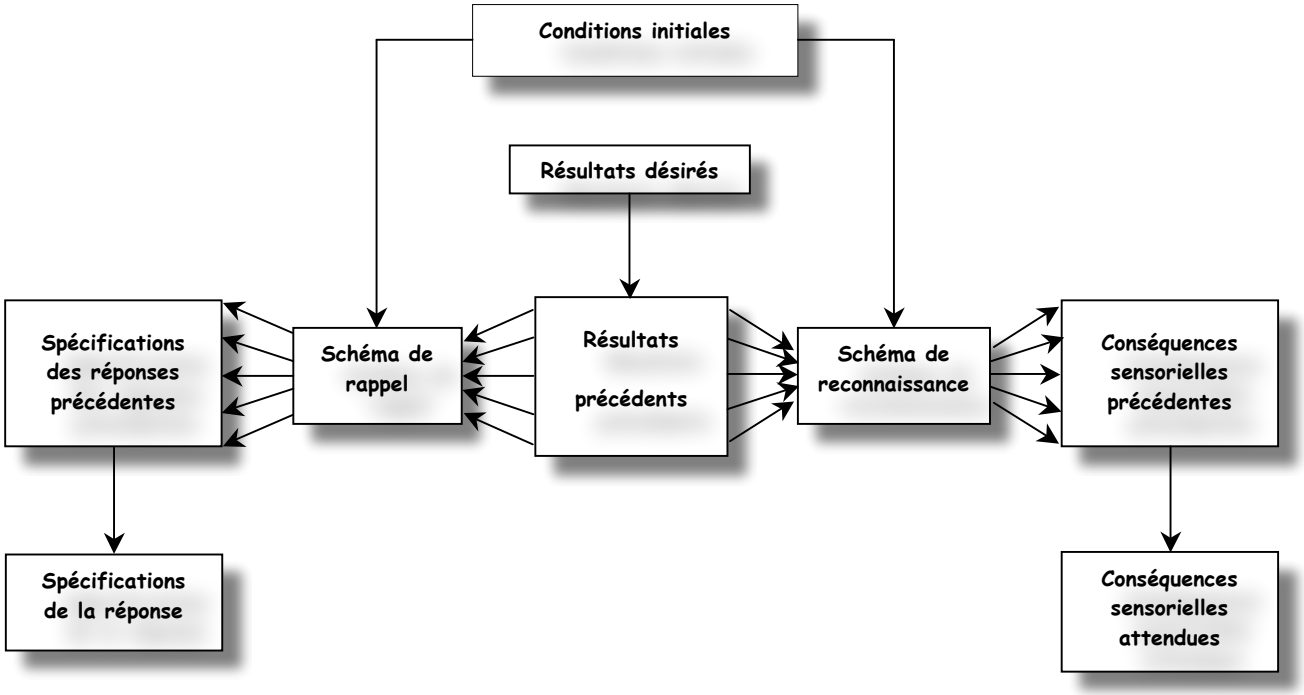


Expression de l'équivalence motrice : cette phrase palindrome peut être écrite de façon tout à fait similaire et reconnaissable par différents effecteurs : a : main droite (dominante) ; b : main droite avec poignet immobilisé ; c : main gauche ; d : stylo entre les dents ; e : stylo scotché sur le pied. D'après Raibert, 1977.

Ces schémas moteurs sont non pas des éléments sensoriels, mais des relations mémorisées, invariantes, entre plusieurs parties de l'action (comme les positions successives des membres, l'état d'une cible dans l'espace). Ce sont donc des configurations qui établissent les conditions

initiales du mouvement et qui peuvent être stockées sous formes de valeurs ou de relations entre elles. Ces invariances permettent la mise en œuvre de la notion d'équivalence motrice (la possibilité par exemple de tracer une signature avec différentes parties du corps). Il faut rappeler (Schmidt, 2003) que cette notion d'équivalence motrice n'est pas évoquée dans le modèle original proposé en 1975.

Le modèle conceptuel proposé par Schmidt a permis d'affiner les considérations théoriques. Ceci prend forme dans le schéma ci-dessous. La mise en œuvre du mouvement associe conditions initiales (positions du corps, poids de l'objet à lancer, …) et but à atteindre. Elle produit d'abord dans les structures du cerveau qui ont stocké les schémas moteurs ce que Schmidt appelle une spécification des réponses (l'ensemble des éléments qui vont déterminer un mouvement, *e.g.* comment attraper une balle, effectuer un pas). Ceci va entraîner le mouvement réel (c'est-à-dire la configuration des relations des actions musculaires qui va déterminer un mouvement plutôt qu'un autre).

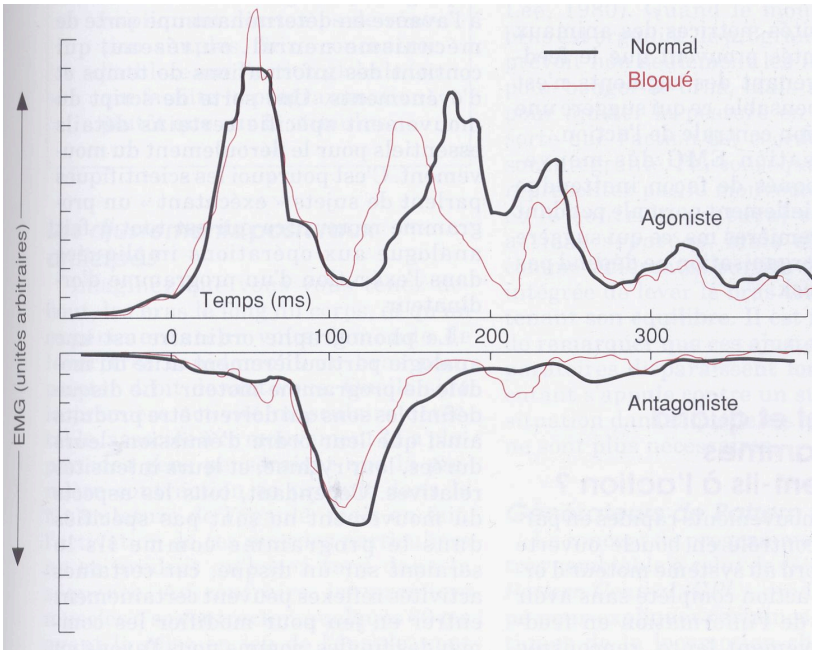


Schmidt : Schéma de rappel et schéma de reconnaissance en relation avec des sources variées d'information

En même temps, des attentes sensorielles vont être comparées avec la connaissance des résultats donnée par les récepteurs. Ceci permettra l'évaluation de la conséquence du mouvement lui-même sur l'espace, un objet, une personne, qui peut être codé d'une façon symbolique ou d'une façon mécanique. Pour qualifier les relations entre le mouvement produit et

les paramètres qui en permettent la production, Schmidt évoque l'idée d'une droite de régression. Avec chaque mouvement utilisant le programme, un nouveau point est produit, qui permet à terme d'affiner et de construire une sorte de règle de fonctionnement (cf. schéma *supra* sur le football américain). En résumé, il existe donc quatre aspects (quatre sources d'informations dont les relations augmentent avec la pratique) dans l'atteinte d'un but par rapport à la production d'un mouvement i) la prise en compte des conditions initiales (aspect somato-sensoriel) ii) les spécifications de la réponse (la paramétrisation) iii) les conséquences sensorielles attendues iv) la production du mouvement (avec la prise en compte de la connaissance des résultats).

En conclusion, comme le rappelle l'auteur lui-même, il ne s'agit ici que d'un modèle, que de la proposition d'une théorie. Celle-ci possède selon lui l'avantage, par rapport au modèle d'Adams par exemple, de s'appliquer à un nombre plus élevé de mouvements (diversification, élargissement du cadre conceptuel). Elle permet de mieux détecter les erreurs. Elle n'impose pas au système des capacités de stockage importantes puisqu'il s'agit ici de programmes généraux (Schmidt ajoute simplement la notion de généralisation à celle de programme moteur) dont les détails seront précisés en fonction des situations rencontrées.



Activité EMG de l'agoniste (triceps) et de l'antagoniste (biceps) dans un mouvement rapide d'extension du coude. Les tracés rouges représentent l'enregistrement d'un mouvement qui a été bloqué mécaniquement au départ (d'après Wadman, Denier van der Gon, Geuze & Mol, 1979)

Un certain nombre de critiques ont bien sûr été adressées à Schmidt, notamment par les tenants de l'approche dynamique. Il y répond dans son ouvrage de 1999 et son article de 2003, en présentant différents arguments en faveur de l'existence d'un programme moteur. Il évoque par

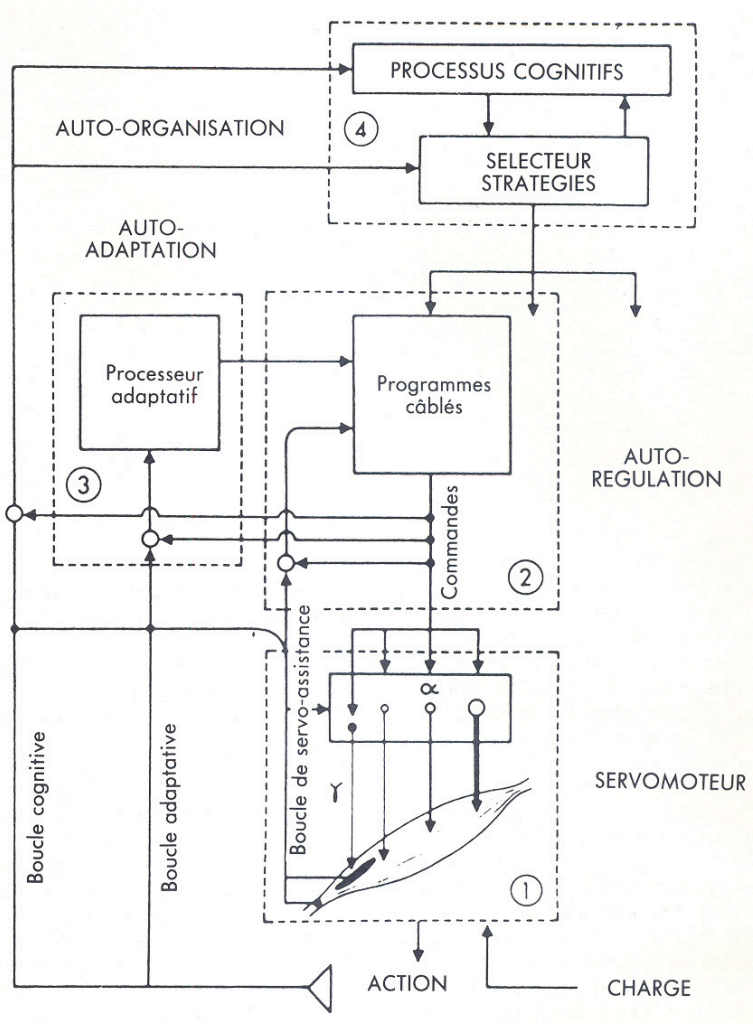
exemple à ce propos l'expérience de Wadman *& coll* (1979), portant sur les effets du blocage mécanique d'un segment corporel lors d'un mouvement rapide d'extension du bras dans une tâche de pointage d'une cible. Les tracés électromyographiques (EMG) des muscles agoniste (triceps) et antagoniste (biceps) sont enregistrés, montrant d'abord une bouffée de l'agoniste, suivie d'un bouffée de l'antagoniste et enfin une dernière bouffée de l'agoniste permettant de stabiliser le segment au niveau de la cible (cf. *supra*). Lors de certains essais, le mouvement du bras était bloqué par l'expérimentateur (sans que le sujet ne soit prévenu), puis libéré. Les tracés EMG montrent, en situation de blocage ou de non blocage, des tracés tout à fait similaires, avec notamment une contraction du biceps même en situation de blocage. Pour Schmidt, ces données vont dans le sens de l'existence d'un programme moteur organisant à l'avance le déroulement de la séquence et infirment l'idée proposée par l'approche dynamique, idée selon laquelle ce serait le mouvement lui-même qui déclencherait la mise en action du muscle antagoniste (le biceps).

e_4) le modèle de Paillard

L'apport de Paillard est généralement peu évoqué de nos jours dans le domaine du contrôle moteur. Le propos de cet auteur est plus centré sur ce qu'il appelle le moteur musculaire et son pilotage (Paillard, 1982). Pour lui, le mouvement est produit par ce qu'il appelle des programmes câblés à partir d'un codage structural inscrit dans le réseau des connexions neuroniques. Cette logique câblée comprend des unités élémentaires (par exemple deux muscles exerçant leurs forces en opposition, les agonistes et les antagonistes). Ces unités fonctionnent sous le contrôle de circuits de servo-assistance qui permettent de moduler la force musculaire mise en jeu en fonction des exigences intensives (vitesse-tension) ou extensives (distance-durée) de la commande et des contraintes que rencontre son fonctionnement.

On peut retrouver la même organisation dans des degrés qualifiées par Paillard "d'ordre supérieur", c'est-à-dire à même de gérer l'action simultanée (en synergie) de plusieurs muscles ou groupes musculaires. Ceci représente une simplification dans le contrôle de ce moteur musculaire (hiérarchisation du contrôle, donc simplification – cf. la gestion des degrés de liberté d'un système). Ces programmes câblés (dont le câblage contient tous les détails de l'organisation spatio-temporelle, peuvent s'exécuter sans aucune assistance sensorielle – Paillard, 1976). Ils comprennent un certain nombre de programmes finalisés (locomotion, orientation, etc.) bénéficiant le cas échéant de circuits d'assistance. Ceci permet d'en assurer la souplesse, d'en affiner la précision, etc. Ces processus adaptatifs relèvent d'une régulation cybernétique. Ils interviennent généralement lorsque les capacités de régulation d'un système sont dépassées. Il

est alors fait appel à un système de régulation d'ordre supérieur qui va ramener le système précédent dans ses limites d'autorégulation. Dans le cadre de la production d'un mouvement nouveau, "non inscrit dans la logique précâblée des systèmes", deux niveaux de contrôle sont mis en jeu : un premier porte sur les activités cognitives du sujet (notamment par la sollicitation de ses ressources attentionnelles), le second se définissant par une auto-adaptation sensorimotrice ne sollicitant pas le contrôle attentionnel du sujet.



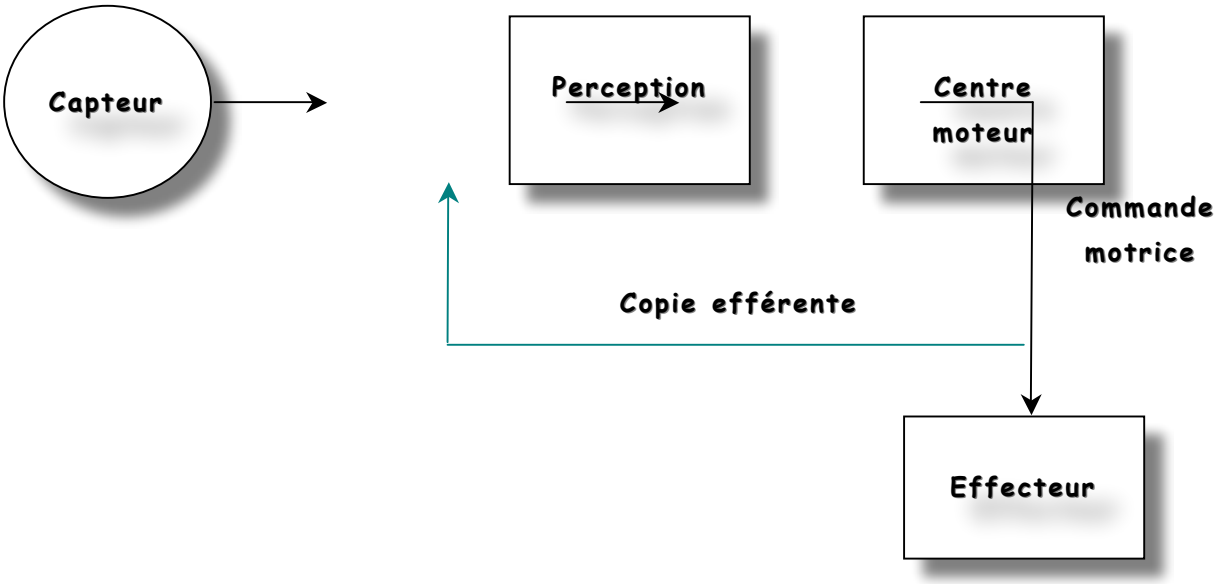
Représentation schématique des niveaux de contrôle de la performance motrice. Paillard, 1980.

F) La notion de décharge corollaire ou de copie d'efférence

Pour mémoire, les notions d'afférence et d'efférence sont issues du latin *afferens, afferre*, apporter et *efferens, efferre*, porter hors : on parle d'afférence lorsque des informations en provenance des différents capteurs sensoriels sont amenées jusqu'au système nerveux central. Celui-ci produit une réponse dont les différentes caractéristiques (vitesse d'exécution, amplitude articulaire, etc.) seront transmises aux muscles par des informations efférentes.

On retrouve dans ces théories une intervention active du cerveau pour aller chercher dans le monde les informations nécessaires. L'hypothèse selon laquelle il y aurait non pas peut-être anticipation, mais association, préparation des informations sensorielles en même temps que le mouvement est planifié, est déjà ancienne. L'idée que l'activité de projection dans le futur est produite par le cerveau et induit des anticipations peut être retrouvée aussi dans les propositions formulées par Purkinje au début de ce siècle, reformulées par le concept de copie d'efférence (Uexküll, 1920) et reprise enfin dans les années 50 par Von Holst et Mittelstaedt (Von Holst, 1954), et par Sperry (1950) pour le concept de décharge corollaire. L'idée proposée par ces auteurs est que sont associés au mouvement des mécanismes qui vont réactualiser la représentation et assurer la stabilité perceptive (les données les plus nombreuses et avérées dans ce domaine portent sur les saccades oculaires).

En même temps qu'un ordre moteur est adressé aux muscles, une information directement issue des commandes motrices (une copie d'efférence) est adressée vers les centres perceptifs qui vont effectuer cette réactualisation. Ces signaux récurrents, transferts des ordres moteurs qui sont effectués vers les structures recevant les informations sensorielles qui peuvent être le siège de ces comparaisons, "sont susceptibles d'influencer directement le système nerveux sur sa propre production sans le secours d'une boucle sensori-motrice externe" (Paillard, 1987).



Représentation simplifiée de la copie d'efférence

Il existerait en effet au niveau du système nerveux central un système de comparaison entre les réafférences issues de l'action du sujet et les commandes centrales planifiant l'action motrice en fonction du but visé par le sujet. Si de cette comparaison naît un signal d'erreur, le système va agir de façon automatique sur l'action en cours de façon à permettre au sujet d'atteindre le but fixé.

Pour certains auteurs, et notamment les cybernéticiens, toute unité d'organisation sensori-motrice possèderait ainsi un ou plusieurs signaux de référence lui prescrivant une valeur de consigne. "De l'évaluation permanente de l'écart existant entre réafférences sensorielles et valeur de consigne résulterait l'émission des commandes d'action appropriées permettant une atteinte automatique du but prescrit. Le signal de référence prescrit, par sa grandeur, la variation prescrite de la variable contrôlée dans l'environnement, les perturbations non contrôlées qui peuvent affecter cette variable étant prises en compte. Les changements de l'environnement sont traduits au niveau des organes sensoriels par certaines valeurs paramétriques. Ils donnent naissance aux messages sensoriels qui seront comparés au signal de référence. De cette comparaison résulte un signal d'erreur, traduit au niveau des organes moteurs, des actuateurs (les muscles) sous forme de tensions musculaires productrices d'effets mécaniques, qui modifie le phénomène physique. L'action cesse lorsque le signal d'erreur est annulé, c'est-à-dire lorsque les conséquences sensorielles de l'action sont en conformité avec les valeurs prescrites par le signal de référence" (Paillard, 1987).

Cette notion de décharge corollaire a largement influencé la cybernétique. Très tôt, dans les années 70, ont en effet été réalisés des modèles de la poursuite visuelle, avant même qu'en soient étudiées les bases neuronales. Deux grands types de modèles ont été proposés, qui supposent que c'est le mouvement de la cible qui est pris en compte par le cerveau, traité par la rétine avec un délai important qui pourrait être de l'ordre de 50-60 ms, et qui pourrait être responsable de façon importante du délai comportemental. Un certain nombre d'étapes vont transformer l'erreur rétinienne, *i.e.* la différence entre le mouvement de l'oeil et le mouvement de la cible, car ce que le cerveau connaît du mouvement de l'objet est simplement le glissement sur la rétine, cette erreur rétinienne. *A priori*, le cerveau ne connaît ni la position ni le mouvement absolu de la cible dans l'espace. Il ne connaît que ce petit glissement.

En résumé *: La notion de décharge corollaire ou de copie d'efférence postule l'existence au niveau du système central d'un système de comparaison entre les informations (les*

réafférences) issues de l'action du sujet et les commandes centrales planifiant l'action motrice. En même temps qu'un ordre moteur est adressé aux muscles, une information directement issue des commandes motrices (une copie d'efférence) est adressée vers les centres perceptifs qui vont effectuer cette réactualisation. Cette comparaison permet d'agir sur l'action en cours de façon à permettre au sujet d'atteindre le but fixé.

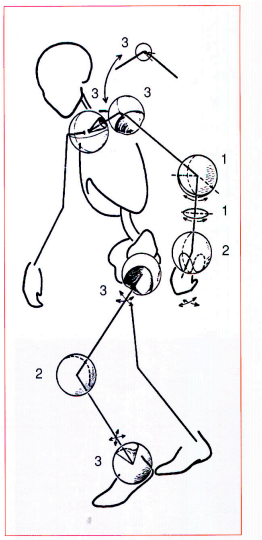
III- Organisation et contrôle du mouvement

La plupart des mouvements exécutés peuvent l'être de différentes façons. Ceci présente un certain nombre d'avantages, comme par exemple lors de l'évitement d'un obstacle. Il est en effet utile de pouvoir réaliser la même action par différents segments corporels, selon les conditions dans lesquelles nous nous trouvons. Nous mettons alors parfois en jeu des mouvements dont les modalités de contrôle se révèlent être d'une grande complexité. Les modèles qui ont été précédemment évoqués nécessitent différentes opérations et l'intervention des processus centraux dans le contrôle et la régulation de nos mouvements. Cependant, il apparaît difficile, voire impossible (ce qui était la thèse défendue par Bernstein) d'imaginer que le système nerveux central puisse contrôler chaque muscle ou chaque unité motrice impliqués dans une action donnée. Le système doit en effet contrôler en même temps les différents états de ses différents éléments. Ces derniers sont trop nombreux. Face à cela, Bernstein a suggéré l'existence de stratégies de simplification du contrôle moteur qui pourraient mettre en jeu une organisation synergique ou le groupement de plusieurs paramètres contrôlés pour réduire le nombre de degrés de liberté. Le problème qui se pose en fait est celui de la réduction de la complexité. Lors de la réalisation d'un mouvement, la commande motrice peut être redéfinie par la mise en place de mécanismes de simplification, visant à réduire la complexité de l'action par la réduction du nombre de degrés de liberté (Bernstein, 1967).

A) Notion de degré de liberté

Comme le rappelle Viviani (1994), "la notion de degrés de liberté est liée à celle de contrôlabilité d'un processus physique." Le nombre de degrés de liberté d'un système physique se définit par le nombre minimal de coordonnées permettant de décrire ce système (Saltzman, 1979) et dans lesquelles le système peut varier de façon indépendante tout en respectant les contraintes géométriques. Par exemple, pour un système mécanique isolé situé dans un espace géométrique à trois dimensions, il existe six degrés de liberté (trois degrés de liberté pour les translations : x, y, z ; trois degrés de liberté pour les rotations : tangage, roulis, lacet).

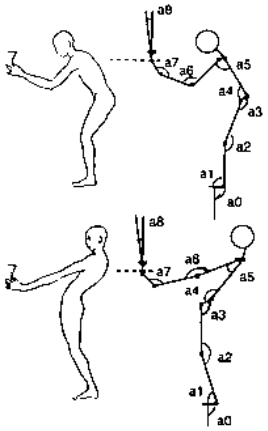
Si l'on étend cette définition afin de spécifier la position du sujet dans l'espace, le nombre de descripteurs nécessaires pour cela correspond au nombre minimal de degrés de liberté mécaniques caractérisant le corps humain, soit une centaine environ rien que pour les articulations (Rosenbaum, 1991). "Dans le contrôle des mouvements d'un système de segments corporels, toute articulation peut être assimilée, du point de vue fonctionnel, à un joint capable de rotation autour d'un ou de plusieurs axes. Par définition, le nombre de degrés d'une articulation correspond au nombre de rotations indépendantes permises entre les segments qu'elle relie. Ainsi, les articulations entre les phalanges des doigts possèdent un seul degré de liberté, les articulations du bras en permettent 7 (flexion-extension, abduction-adduction, rotation de l'humérus par rapport à l'épaule ; flexion du coude ; flexion-extension, abduction-adduction, pronation-supination du poignet). Viviani rappelle par ailleurs que "le nombre de degrés de liberté de chaque segment du système articulaire peut être défini par rapport à un référentiel fixe, qui peut être calculé à partir du nombre et du type d'articulations reliant le segment au référentiel" (celui-ci peut être l'épaule, le tronc, etc.).



Degrés de liberté des articulations des membres. Les chiffres figurant en regard des articulations indiquent leur nombre respectif de degrés de liberté. L'amplitude des mouvements articulaires sur le cadavre est également représenté. L'extrémité de la pièce osseuse mobile délimite un cône sur la sphère, ayant pour origine le centre articulaire. In Bouisset et Maton, 1995 (d'après Dempster, 1955).

Cette notion de référence à un point ou un segment particulier implique l'idée de redondance d'un système (redondance signifie initialement, être inondé, déborder. On trouve au XII^{e} s. le terme latin, *redundare*. Au XVI^{e} siècle, la redondance évoque l'abondance superflue. Dans la seconde moitié du XX^{e} siècle, ce terme est passé dans la terminologie informatique). Cette redondance peut se définir comme l'existence de relations non univoques entre les différents termes d'un système. En clair, le système multiplie les possibilités de réalisation d'une tâche particulière, ce qui rend possible la flexibilité. Lorsque Bernstein évoque la redondance, il faut entendre l'ensemble des degrés de liberté à partir duquel un mouvement peut être produit, la

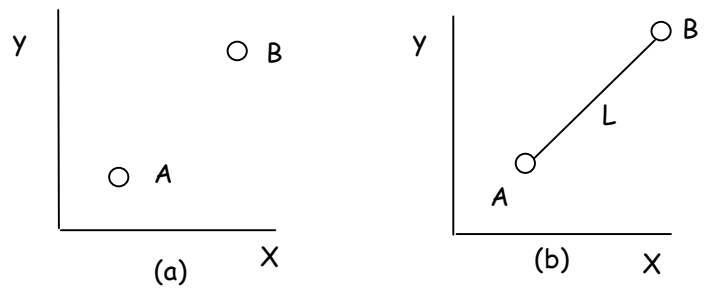
somme de ces derniers excédant le nombre minimal nécessaire à la réalisation de l'action envisagée. Le nombre élevé de degrés de liberté présents au niveau du système multi-articulé que représente le corps humain offre la possibilité de sélectionner un comportement moteur particulier parmi un ensemble de possibles. Cette équivalence motrice (Hebb, 1949, Bernstein, 1967), c'est-à-dire cette habileté à atteindre le même objectif par la mise en jeu de patrons d'activations motrices variés représente mathématiquement pour certains un problème mal posé ou indéterminé dans la mesure ou plusieurs solutions apparaissent possibles (le nombre de degrés de liberté des coordonnées du corps est supérieur à celui des coordonnées de la tâche). Pour Kawato (1996), " un problème est mal posé quand sa solution existe, est unique et dépend constamment des paramètres définissant le problème ".



Cette figure peut représenter de façon plaisante une illustration de la notion d'équivalence motrice. Il existe en effet de nombreuses solutions pour tenir un verre sans en renverser le contenu (d'après Droulez et Berthoz, 1986).

L'acquisition d'une nouvelle habileté motrice implique donc un processus de réorganisation permettant la réduction du nombre de degrés de liberté. Une possibilité consiste en l'introduction de couplages importants entre plusieurs degrés de liberté (Turvey et al., 1982).

Dans la figure (a) ci-dessous, les points A et B sont définis chacun par deux cordonnées (x_a, y_a) et (x_b, y_b). Ils possèdent chacun, dans cet espace à deux dimensions, 2 degrés de liberté. Le système en possède en tout quatre, indépendants, permettant de décrire complètement le système géométrique. Dans la figure (b), les deux points sont liés par une droite de longueur L.



Passage d'un système présentant quatre degrés de liberté à un système présentant trois degrés de liberté. D'après Turvey et al., 1982.

La distance entre ces points est définie par une équation de contrainte telle que :

$$L^2 = (X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2$$

Cette équation de contrainte nous dit comment A et B sont liés. Pour une longueur L connue, il existe une relation directe entre les points A et B. Une seule composante s'avère alors nécessaire au positionnement de B, le système possède maintenant 3 degrés de liberté. D'une façon générale, simplifiée, le nombre de degrés de liberté d'un système peut être obtenu par l'équation : N.D-C, où N est le nombre d'éléments du système, D le nombre de dimensions de ce système et C le nombre d'équations de contrainte.

a_1) couplages

Ces couplages peuvent se traduire par l'interdépendance des mouvements (voir le jeu habituel de se "caresser" la tête et l'estomac en même temps, ou la difficulté de dessiner un cercle d'une main et un carré de l'autre ou bien encore de maintenir l'oscillation des bras à des fréquences différentes. Les contraintes cinématiques de phase mettent en jeu des couplages). Par exemple, lorsque l'angle du bras par rapport au corps augmente, celui du bras diminue d'une quantité égale (Droulez et Berthoz, 1986 évoquent à ce propos l'exigence d'une topologie du quotient). Certains auteurs ont montré que le ratio des angles de l'épaule et du coude demeurait constant au cours de chaque mouvement. Cette opposition de phase, traduction des contraintes cinématiques, permet de contrôler le mouvement avec un seul paramètre, en ne faisant varier que le rapport d'amplitude des deux angles, ce qui simplifie considérablement le contrôle.

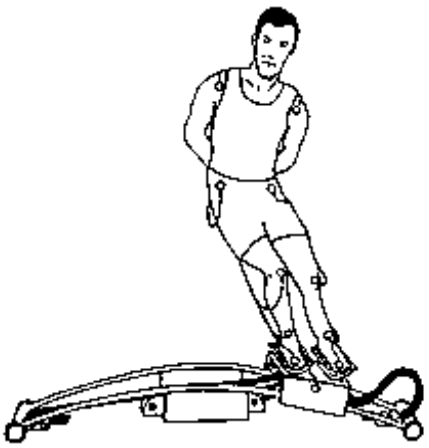
De telles synergies articulaires sont hautement avantageuses d'un point de vue calculatoire. En effet, un couplage temporel strict entre des degrés de liberté indépendants anatomiquement réduit de façon patente la complexité du mouvement de contrôle en réduisant le nombre de paramètres indépendants devant être contrôlés par le système. Ainsi, le cerveau contrôle des variables globales (l'élévation et la direction de l'extrémité du doigt par exemple) et non les variables locales (la multiplicité des angles que font les segments entre eux).

a_2) gel initial et libération progressive des degrés de liberté

On peut légitimement penser que cette capacité à contrôler une ou plusieurs variables globales est un des traits caractéristiques du comportement moteur de l'expert. Dans son cheminement vers l'expertise, le débutant est confronté à de nombreux problèmes. A cet égard, une autre solution proposée par Bernstein (1967) au problème rencontré par le débutant dans la

maîtrise ou la construction d'une habileté consiste à "geler" une partie des degrés de liberté. Ceci peut se traduire par la rigidification du corps ou la conservation des angles articulaires favorisant très peu de liberté de mouvements à ce ou ces niveaux. L'expérience de Vereijken et al. (1991) illustre très bien ce processus de gel initial, puis de relâchement progressif du contrôle rigide des degrés de liberté et leur intégration dans un système dynamique, contrôlable.

Dans cette expérience de Vereijken et al. (1991), cinq sujets devaient produire des mouvements de slalom de ski sur un simulateur (figure ci-dessous). Celui-ci consistait en une plate-forme sur roulettes placée sur deux rails métalliques permettant au sujet de se déplacer dans un plan frontal. La plate-forme pouvait revenir à sa position initiale grâce à l'action de deux ressorts. L'exercice d'une force donnée par le sujet l'autorisait à maintenir des oscillations latérales à différentes amplitudes et différentes fréquences. L'amplitude et la fréquence des mouvements de la plate-forme dans le plan horizontal ont été calculées. Les résultats montrent que l'amplitude des déplacements, très faible au départ, croît rapidement de façon importante au cours des premiers essais, objectivant un dégel progressif des degrés de liberté du système grâce à la pratique. Par ailleurs, la fréquence, élevée au départ, chute très rapidement pour augmenter de nouveau à mesure de l'augmentation de l'amplitude.



Simulateur de ski
(d'après Vereijken et al., 1991).

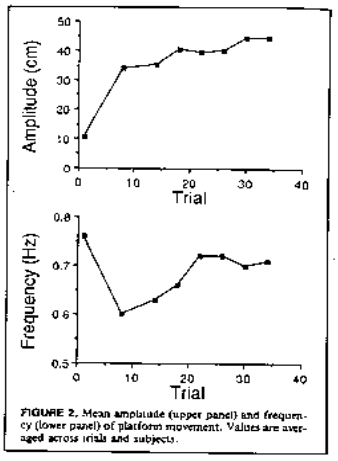


FIGURE 2. Mean amplitude (upper panel) and frequency (lower panel) of platform movement. Values are averaged across trials and subjects.

Evolution de l'amplitude et de la fréquence au cours des différents essais (libération progressive des degrés de liberté du système).

Selon Bernstein, ce processus de relâchement comporte deux étapes :

- un relâchement progressif et une intégration dans des structures coordinatives (c'est-à-dire des groupes de muscles contraints d'agir comme des unités fonctionnelles).

- une utilisation progressive des forces passives (réaction, friction, entraînement) afin d'augmenter l'efficience (et l'économie) du système.

En résumé *: une notion centrale dans le contrôle moteur est celle de degrés de liberté d'un système. Le nombre de degrés de liberté d'un système physique se définit par le nombre minimal de coordonnées permettant de décrire ce système (en translation et en rotation). Ces nombreux degrés de liberté offrent au système une grande souplesse de fonctionnement. Le passage du débutant à l'expert se caractérise par le gel puis le dégel progressif des nombreux degrés de liberté du système.*

B) Notion de synergie

Le contrôle de la posture et du mouvement met en jeu une organisation biologique tout à fait remarquable et complexe, se fondant sur la coopération dynamique et contrôlée de différentes variables. A la base des mouvements se situent les synergies motrices.

Le terme synergie signifie, étymologiquement, qui agit ensemble (*sun*, "ensemble", *energein*, "agir"). Dans cette définition, il n'y a aucune hypothèse quant aux mécanismes liant les différents éléments de cette synergie. Pour des auteurs comme Mac Pherson (1991), ces synergies peuvent avoir la même source de commande ou simplement agir simultanément sans relations directes et fonctionnelles. Pour Babinski (1899), cela correspond à la faculté d'associer des mouvements, d'effectuer parfaitement les mouvements nécessaires à la réalisation correcte d'un acte. Les synergies peuvent être définies comme un ensemble de muscles qui agissent ensemble pour produire un effet désiré (Lee, 1984), comme un patron stable et une séquence temporelle d'activation et de relaxation d'un groupe de muscles. Pour Massion (1994), "la synergie musculaire pourrait être un niveau bas d'organisation, nourrissant la stratégie en fournissant les forces musculaires appropriées. Ce niveau de stratégie est flexible et adaptable aux contraintes de la tâche." Il existerait donc pour cet auteur une stratégie élaborée à des niveaux élevés et des synergies d'un niveau plus bas nourrissant localement cette stratégie.

D'après Paillard (1998), ce concept de synergie possède une longue histoire. C'est à Winslow (1732) que l'on doit la première observation de la participation de différents muscles (ou groupes musculaires) au déplacement d'une partie du corps ou à son maintien dans une position donnée, chaque muscle ou groupe musculaire possédant une fonction précise, à savoir les principaux moteurs (ou *prime movers* de Beevor, 1904, *in* Paillard 1988), les modérateurs et les directeurs qui stabilisent la trajectoire du mouvement. On peut attribuer à Duchenne de Boulogne (1867) les

premières observations systématiques sur certains plans de coopération musculaire mettant en jeu des activations simultanées et accompagnant des mouvements particuliers (par exemple la saisie d'un objet). Pour cet auteur, ces mouvements étaient spécifiques à une espèce donnée et constituaient le répertoire moteur des mouvements ordinaires.

Les études cliniques de Babinski sur des patients cérébelleux ont permis de mettre en évidence l'existence de mouvements de compensation (lors de flexion du tronc vers l'arrière par exemple) chez un individu normal. Ces synergies musculaires anticipatrices permettent, par le maintien de la projection du centre de gravité à l'intérieur du polygone de sustentation, la conservation de l'équilibre du sujet et offrent la possibilité d'effectuer parfaitement les mouvements nécessaires à la réalisation correcte de l'action motrice initialement prévue.

Sherrington (1911) formulait l'hypothèse que les synergies musculaires observées pourraient être basées sur des circuits réflexes permettant de lier l'activité des différents groupes musculaires. Cette conception est tout à fait dépassée aujourd'hui, le point de vue très différent adopté est celui proposé par Bernstein (1967) selon lequel les synergies ne seraient pas sous le contrôle de structures situées dans la moelle (hiérarchiquement le niveau de contrôle le plus bas), mais correspondraient à une organisation finalisée (par rapport à une action comme la locomotion par exemple). Ces synergies doivent être perçues comme des processus dynamiques et fonctionnels, spécifiques à une action donnée. Elles présentent un caractère souple et adaptatif (Paillard, 1988, propose la notion de contexte-dépendance pour qualifier cette adaptation du patron d'activité), temporaire, évoluant au cours du temps en fonction des modifications des contraintes subies par le sujet. Pour Massion (1984), ces synergies présentent trois caractéristiques i) elles sont anticipatrices par rapport aux conditions prédictibles d'exécution ii) elles s'adaptent instantanément aux perturbations inattendues iii) leur pré-commande peut varier à la suite de la première instruction.

b_1) la réduction de la complexité

Le problème qui se pose en fait est celui de la réduction de la complexité. Le contrôle coordonné de segments corporels constitue en effet un problème complexe. Face à cette complexité, plusieurs auteurs ont suggéré que les stratégies de simplification du contrôle moteur puissent mettre en jeu une organisation synergique ou le groupement de plusieurs paramètres contrôlés pour réduire le nombre de degrés de liberté (cf. *supra*). Lors de la réalisation d'un mouvement, la commande motrice peut être redéfinie par la mise en place de mécanismes de

simplification, visant à réduire la complexité de l'action par la réduction du nombre de facteurs à contrôler par exemple.

Cette notion de synergie motrice permet de répondre à un double problème. D'une part, pour contrôler une tache, même simple, les contraintes temporelles sont telles que le nombre de paramètres doit nécessairement être faible (notion de moyen limité). D'autre part, il existe aussi un nombre fini de fibres afférentes et efférentes indiquant l'impossibilité de contrôler individuellement chaque unité motrice. Ainsi les synergies seraient associées à des connexions permettant de regrouper des muscles en unités fonctionnelles.

b_2) un répertoire de synergies ?

De nombreux auteurs (Gelfand et coll, 1973 ; Gahéry et Massion, 1981 ; Cordo et Nashner, 1982) ont proposé l'idée que ces synergies n'existeraient qu'en nombre limité et constitueraient un répertoire de synergies fournissant des plans de coopération musculaire stables. Il serait alors possible de distinguer des synergies simples (stabilisation), des synergies liées aux mouvements rythmiques (locomotion sous toutes ses formes, mouvements cycliques et périodiques) ou d'autres synergies liées aux mouvements transitoires (saut, lancer). Cette hypothèse se fonde sur le fait qu'un nombre restreint de patrons musculaires peut être observé à la fois dans les réactions posturales et au cours des ajustements posturaux anticipés. On observe en définitive une permanence de la mise en jeu des mêmes muscles à la fois au niveau des anticipations et des réactions posturales. Il existerait donc pour certains des synergies de base qui, associées, donneraient naissance à des synergies complexes (avec l'idée d'une conception modulaire, souple, adaptative). L'éventualité des synergies fixées comme base de réactions posturales ou d'ajustements posturaux anticipés a été discutée par Lee (1984). Pour chaque patron musculaire, cet auteur proposait d'identifier une synergie fixée sur la base de la reproductibilité de la distribution spatiale du patron (prenant en compte les contraintes corporelles et externes).

Pour d'autres auteurs, s'il est probable qu'il existe des synergies musculaires "pré-câblées", celles-ci doivent être adaptables et flexibles en fonction des contraintes posturales. Mac Pherson (1991) propose même l'idée selon laquelle il n'existe pas de synergies musculaires fixes. Pour cet auteur, les stratégies motrices seraient sélectionnées et planifiées par le système nerveux central et s'exprimeraient sous la forme de paramètres cinématiques (position, vitesse, accélération) ou dynamiques (forces, moments articulaires). L'implémentation de ces stratégies

en activations musculaires (synergies musculaires) dépendrait des différentes contraintes de la tâche et de la position des articulations. Pour Berthoz, la synergie se définit par sa capacité de flexibilité fonctionnelle (passage d'un mode de fonctionnement du système à un autre. Il est possible par exemple de pallier la déficience du système vestibulaire par l'utilisation de saccades oculaires (substitution possible par le cerveau des saccades à la place du réflexe vestibulo-oculaire - la vision supplée aux déficiences de l'oreille interne). Cette substitution relève de mécanismes cognitifs, la coordination entre ces différents systèmes nécessite une représentation spatiale du corps ou de la cible. Dans le cas de la production d'un mouvement, cette flexibilité peut être déterminée par les contraintes biomécaniques et articulaires au niveau des réactions posturales. Il a été montré chez certains sujets la possibilité de mettre en œuvre une combinaison variée de l'activation musculaire pour l'exécution d'une tâche donnée (inclinaison aussi rapide que possible à un signal donné, du tronc vers l'avant ou vers l'arrière, et retour à la position initiale après la flexion maximale). Entre le 15^{e} et le 60^{e} essai, deux sujets sollicitent des muscles différents pour réaliser le même mouvement. Selon les auteurs de cette expérimentation (Pedotti & Crenna, 1989), une telle flexibilité suggère que même si les synergies usuelles sont utilisées pour le contrôle multi articulaire lors des mouvements du tronc, d'autres plans de coopération musculaire sont disponibles et peuvent être sélectionnés, occasionnellement et parfois temporairement, par certains sujets. Les modifications de ces synergies semblent dues aux conditions dans lesquelles se déroule l'action (par exemple, modification du support), puis dues à l'apprentissage à court terme (modification des habitudes), enfin à des modifications dans la représentation du corps.

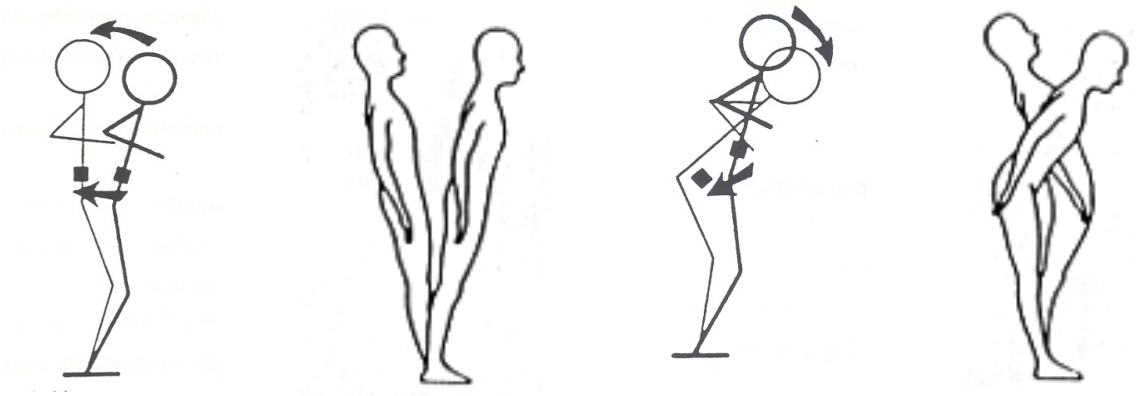
Ces différents arguments en faveur de synergies modifiables soulignent que la notion d'adaptation doit faire partie d'un schéma d'organisation motrice. Les différents modèles de la programmation motrice permettent en effet de rendre compte de tous les aspects de pré-programmation ou d'anticipation du mouvement mais n'intègrent pas totalement les notions d'adaptation.

Ces synergies peuvent s'inscrire dans le mode de contrôle postural programmé centralement. Le sujet peut par exemple, lors de mouvements rapides du tronc vers l'arrière, accompagner ces derniers de rotation de la hanche, du genou et de la cheville qui compensent le glissement vers l'arrière du centre de gravité. Placé dans un contexte particulier, le sujet possède plusieurs possibilités de résolution du problème qui lui est posé, le déplacement d'un segment corporel d'un point à un autre dans l'espace pouvant alors être réalisé par différentes combinaisons mettant

en jeu des coordinations motrices variées. Il s'agit alors d'agir de façon efficiente, c'est-à-dire efficace et à moindre coût, ce qui implique l'existence d'un choix dans la détermination d'une stratégie adaptée.

C) Notion de stratégie

Une définition des synergies motrices a été proposée par Horak et Nashner (1986) permettant de distinguer stratégie et synergie. Dans le domaine du contrôle de l'équilibre par rapport au mouvement volontaire, ces auteurs ont émis l'hypothèse qu'une stratégie motrice correspondrait aux différents moyens utilisés (en fonction des contraintes de la tâche) pour maintenir l'équilibre lors d'une perturbation. Lors de petites perturbations posturales par exemple, le sujet préfère bouger de façon prédominante autour de la cheville (*ankle strategy*) de façon à conserver les genoux et les hanches relativement immobiles. Pour de plus grandes perturbations, la flexion s'effectue par rapport aux hanches (*hip strategy*) avec de petits mouvements en sens opposé des chevilles, gardant les genoux relativement droits. Les différentes synergies musculaires observées correspondent aux implémentations effectives de ces deux stratégies.



Stratégie de la cheville *Stratégie de la hanche*

d'après Horak & Nashner, 1986

A partir de ces expérimentations, il a été proposé que ces distinctions entre stratégie et synergie reflètent une organisation hiérarchisée. Comme nous l'avons déjà précisé, certains auteurs (Massion et al., 1992) distinguent deux niveaux de contrôle de l'équilibre au cours des mouvements du tronc, "celui de la stratégie, relativement invariante et définie par le déplacement en sens opposé des segments supérieurs et inférieurs, et celui de la synergie musculaire qui constitue l'implémentation de la stratégie et doit s'adapter aux conditions de l'environnement". Selon ces auteurs, les stratégies seraient toujours invariantes, toujours

présentes, alors que les synergies, adaptables en fonction de l'environnement, résulteraient d'un processus d'apprentissage.

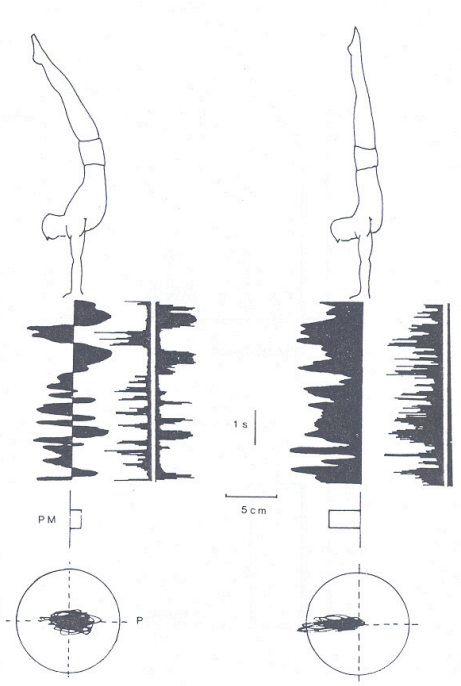


Illustration de la mise en jeu de 2 stratégies différentes de maintien de l'appui tendu renversé en fonction du niveau du pratiquant. A gauche, la forme cambrée est adoptée par les sujets de niveau régional, tandis que les sujets plus experts montrent à droite un alignement parfait. Ces différentes stratégies signent des synergies différentes, révélées par les tracés électromyographiques précisant les relations agonistes - antagonistes. Le tracé inférieur est celui du centre des pressions. D'après Pozzo & Clément, 1988.

En définitive, ces résultats montrent la capacité du système nerveux central à élaborer et programmer de nouvelles synergies permettant une adaptation à court terme, en fonction du contexte, des contraintes de la tâche et du degré d'entraînement des sujets. Ces différents problèmes d'adaptations impliquent une définition de la flexibilité fonctionnelle des synergies motrices mises en œuvre lors de l'exécution du mouvement ou dans le contrôle de la posture.

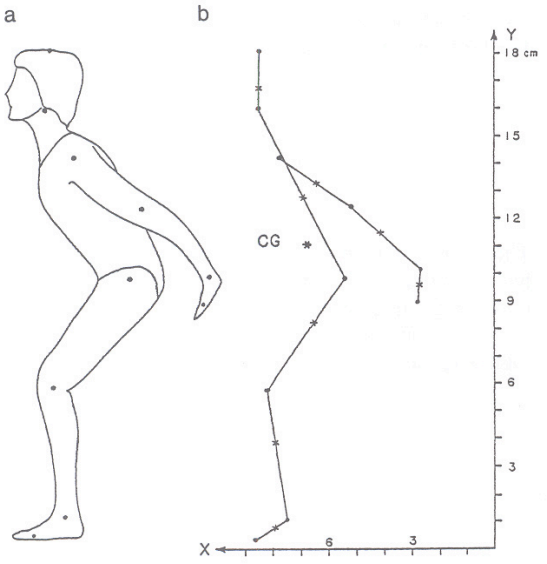
En résumé *: une synergie peut se définir par la coopération d'un ou de plusieurs muscles ou groupes musculaires. Ces synergies, ces plans de coopération musculaire, permettent une réduction de la complexité par le contrôle coordonné de différents segments corporels et offrent au système, selon Berthoz, une certaine flexibilité fonctionnelle.*

IV - Equilibre et équilibration

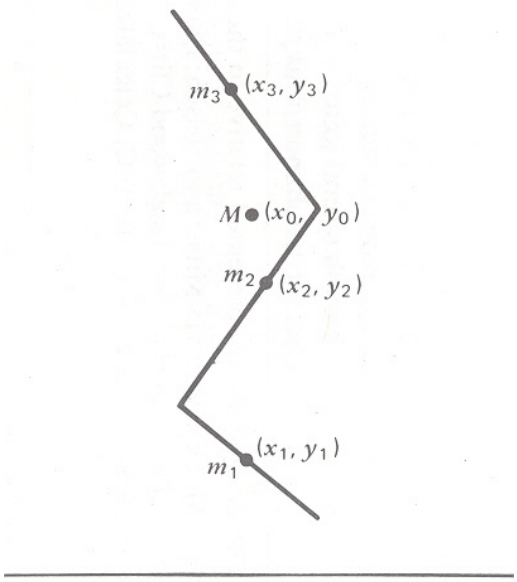
A) Centre de masse ou centre de gravité

Dans la littérature, bien que l'on rencontre plus généralement le terme centre de masse, les expressions centre de masse et centre de gravité sont utilisées indifféremment (on rencontre parfois mais plus rarement la notion de centre d'inertie – Durey, 1997). L'exigence sémantique nous amène cependant à préciser que la dénomination centre de masse se réfère à une quantité de matière alors que la notion de centre de gravité implique celle de poids, par référence à la

pesanteur (pour mémoire, dans l'espace, il n'y a pas d'attraction et donc pas de centre de gravité). Le centre de masse d'un système de points matériels est le barycentre (du grec, *barus*, lourd et *kentron*, pointe) des différents points de ce système affectés de leur masse. "La notion de barycentre ou de centre de masse est directement empruntée à la physique. Etant donné un ensemble de points massiques, un champ (homogène) de pesanteur définit en chacun des points une force (le poids) d'intensité proportionnelle à la masse. Le barycentre ou centre de masse est le point d'application de la résultante de cet ensemble de forces parallèles. La résultante a une intensité correspondant à une masse égale à la somme des masses de tous les points du système". Pour un système de corps solides de masses m_i et de centres de masses I_i, le centre d'inertie général G ou barycentre de ce système est défini par la relation $\overrightarrow{OG} = \sum (m_i \overrightarrow{OI_i}) / \sum m_i$ ou O est un point quelconque d'un référentiel R (si O est en G, on a alors $\sum (m_i \overrightarrow{GI_i}) = 0$. Seul G vérifie cette relation). Dans le cas particulier d'un système constitué de deux éléments G_1 et G_2, le centre de masse est défini par $\overrightarrow{G_1G} = (m_2 / m_1 + m_2) \overrightarrow{G_1G_2}$ (Durey, 1997).



Emplacement du centre de gravité du corps (CG) comme une fonction de la position des segments corporels (a) limites des segments respectifs du corps (b) emplacement des CG segmentaires comme un pourcentage de la longueur du segment corporel. D'après Enoka, 1988.

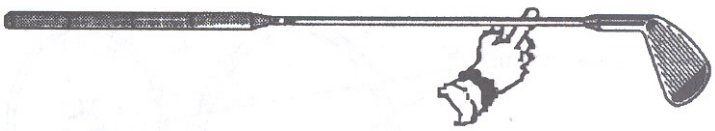


Centre de masse d'un modèle à 3 segments par rapport aux centres de masse des différents segments. Winter 1990.

La connaissance des centres de masse (de gravité) des différents segments corporels permet de déterminer la position du centre de masse global du corps, moyenne pondérée de chaque centre de masse de chaque segment corporel. Le centre de masse est par définition le point d'un objet (un solide, le corps humain, etc.) dont le mouvement est identique au mouvement qu'aurait

cet objet entier si toute sa masse était concentrée en ce point et si toutes les forces s'appliquaient sur lui. La détermination du centre de masse est donc un préalable à toute étude du mouvement d'un corps solide (Durey, 1997).

Allard & Bianchi (1996) rappellent que le centre de masse est un point d'équilibre où les quantités de matière de part et d'autre du segment (objet) sont égales. Ce centre de masse n'est pas toujours situé au centre physique de l'objet. La longueur de l'objet et la répartition de la masse à l'intérieur de cet objet déterminent la position de son centre de masse. Le centre de gravité existe … virtuellement (*i.e.* il ne possède pas de réalité palpable). Prenez une règle de 30 cm, et faites-la tenir en équilibre horizontalement sur un doigt. Si vous placez ce doigt sur les graduations 5 cm ou 25 cm, il serait étonnant que l'équilibre soit trouvé. Vous le trouverez probablement à 15 cm, lieu du centre de gravité de ce segment (à condition bien sur que la densité ou la répartition de la masse de la règle soit homogène). Si vous désirez construire ce centre de gravité, imaginez le corps, multi segments (ou multi règles, comme vous voulez) et construisez peu à peu son centre de masse ou de gravité en assemblant progressivement ces segments. Vous allez ainsi peu à peu déterminer le point résumant l'équilibre du corps, là où la somme des forces est égale à zéro (si non, il se produit un déplacement, une rotation, etc.).

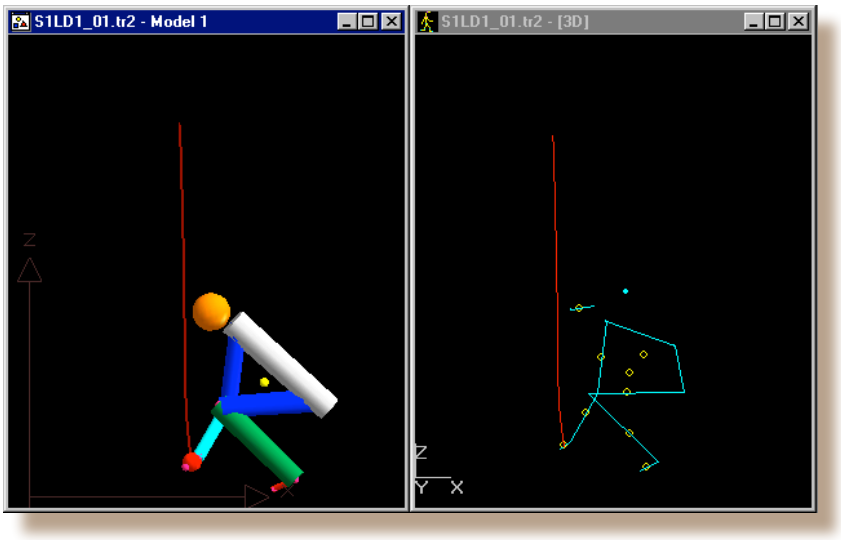


Club de golf équilibré sur un doigt. D'après Durey, 1997.

La détermination des centres de masse nécessite l'utilisation de modèles dits anthropométriques. L'anthropométrie représente la branche principale de l'anthropologie qui étudie les mesures physiques du corps humain. Toute étude du mouvement humain nécessite l'analyse de mesures cinématiques (position, vitesse, accélération) et cinétiques (forces, moments) comme la distribution des masses, les centres de masse, les moments d'inertie.

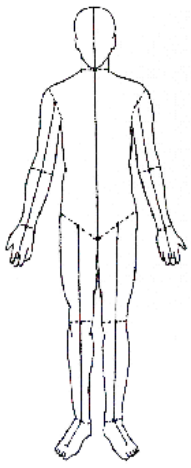
Différents modèles anthropométriques ont été proposés (Hanavan, 1964, 1966 ; Chandler et al., 1975 ; Hatze, 1980 ; Winter, 1990), se fondant la plupart du temps sur des études chez le cadavre (de nos jours, les techniques permettent la détermination des masses musculaires et leur répartition chez le vivant, voir les travaux de Zatziorski et al., 1990). Indépendamment de leurs différences, ces modèles nécessitent la représentation précise de la taille du corps, la forme et la proportion des différents segments. La plupart d'entre eux sont basés sur les

concepts de simulation de liaisons connectées, à l'origine définies par Braune et Fischer (1889) dans leur analyse classique biomécanique du fantassin allemand. L'approche de ces auteurs a été raffinée et généralisée par Dempster (1955), qui a étudié le corps comme une série de liaisons connectées qu'il a définies comme "des distances constantes entre les centres adjacents de rotation."



Modélisation des centres de masse dans une tâche de soulever de charge. Cette modélisation est rendue possible grâce à l'utilisation d'un modèle anthropométrique par le logiciel. (Logiciel View 3D®, Société KIHOPSYS®)

Ces modèles, comme toute tentative de simulation, permettent une représentation, une simulation du réel, mais présentent bien sûr un certain nombre de limitations. Ainsi, le modèle de Hanavan (1964, 1966) divise le corps humain en 15 solides géométriques de densité uniforme (alors qu'elle varie à l'intérieur des segments, ainsi que d'un segment à un autre), avec des segments supposés être absolument rigides.



Modèle anthropométrique. Ce modèle propose ici une organisation du corps en 14 segments : tête ; tronc, bras, avant-bras, mains, cuisses, jambes, pieds. D'après Chandler et al. (1975).

L'estimation de la masse et l'emplacement du centre de masse de chaque segment sont nécessaires à l'analyse segmentaire. La constitution de cette base de données anthropométriques

a permis, par l'utilisation d'équations de régression, d'estimer le poids relatif des différents segments corporels par rapport au poids total du corps et la détermination de l'emplacement du centre de masse global du corps (tableau ci-dessous).

Segment	Poids (Newtons*)	Localisation des centres de masse des différents segments corporels (%)
Tête	0.032 PC + 18.70	66.3
Tronc	0.532 PC – 6.93	52.2
Bras	0.022 PC + 4.76	50.7
Avant-bras	0.013 PC +2.41	41.7
Main	0.005 PC + 0.75	51.5
Cuisse	0.127 PC – 14.82	39.8
Jambe	0.044 PC – 1.75	41.3
Pied	0.009 PC + 2.48	40.0

Equations de régression pour l'estimation du poids des différents segments corporels et la localisation des centres de masse. Le poids des différents segments corporels exprimé est en pourcentage du poids du corps (PC). La localisation des centres de masse est exprimée en pourcentage de la longueur du segment à partir de l'extrémité proximale de celui-ci. D'après Chandler et al., 1975.

* *Pour mémoire, 1 N = 101,94 g à la surface de la Terre. 1 kg = 10 N.*

B) Centre des pressions

Pressions exercées au sol par le pied en station debout

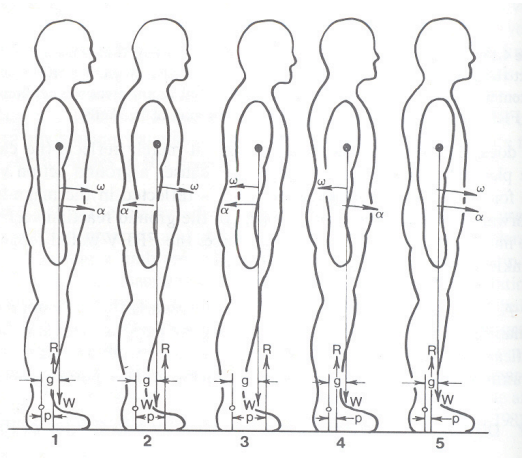
Pressions exercées au sol par le pied du coureur

Le centre des pressions résume l'ensemble des pressions que nous exerçons sur le sol *via* les appuis plantaires. Par exemple, lorsque nous effectuons une rotation en l'air (saut périlleux par exemple, vrille, etc.), notre centre de masse existe toujours (de nombreux auteurs pensent que c'est cette variable qui est contrôlée), mais pas notre centre de pressions puisqu'à ce moment notre relation avec le sol est inexistante (ce qui ne sera pas le cas lors de la réception).

Le centre de masse et le centre des pressions sont curieusement des notions (des grandeurs, des valeurs) à tort fréquemment confondues. Ces deux centres sont des mesures de position (de déplacement), mais le centre des pressions est indépendant du centre de masse (ils interviennent chacun dans la définition de l'équilibre. Dans le cas d'un équilibre « parfait », la différence CM/CP doit être égale à zéro, CM et CP sont alignés sur une même verticale.). Le centre des pressions est le barycentre de l'ensemble des forces verticales ou le point d'application de la résultante des forces verticales appliquées au sol (en ce point, le moment résultant des forces est nul) par un sujet en station érigée.

Si l'on appuie de façon plus marquée sur le sol avec l'extérieur du pied, notre CP va se déplacer vers l'extérieur, ou vers l'avant si l'appui est plus marqué sur l'avant pied, etc. Par rapport à une même référence (un même zéro) au sol, un sujet possédant dix orteils à chaque pied et chaussant du 128 peut présenter exactement le même centre de pressions (cette moyenne en quelque sorte des points de pression au sol) qu'un autre sujet de taille plus modeste dessinant au sol une surface plus réduite.

En ce point d'application, la résultante des forces qui s'y appliquent est de valeur égale et de sens opposé au poids exercé au sol en ce point précis. Le déplacement du centre des pressions est mesuré dans un plan horizontal défini par les composantes x (frontale) et y (sagittale). Il est possible pour le sujet de contrôler les déplacements de centre des pressions par flexion ou extension plantaire.

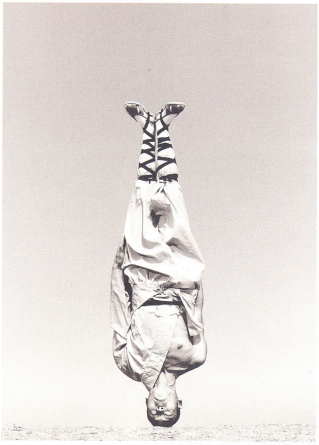


Sujet debout sur une plate-forme de forces et s'inclinant vers l'avant et vers l'arrière. Cinq positions différentes dans le temps sont décrites, montrant les emplacements du centre de gravité et du centre des pressions associés aux accélérations angulaires et aux vitesses du corps. Winter 1990.

C) Définitions de l'équilibre

On ne peut parler d'équilibre sans évoquer la notion de stabilité, notion dont la définition est évidemment fonction du domaine au sein duquel elle est mise en jeu (mécanique, chimique,

mathématique). Nous dirons par exemple de la stabilité mécanique qu'elle se définit pour le sujet par sa capacité à résister à une perturbation et qu'elle se traduit par la vitesse à laquelle ce sujet retrouve son état initial.

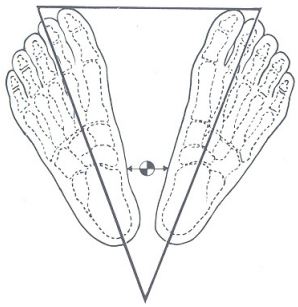


En condition statique, le corps est considéré comme étant en équilibre lorsque la somme des forces extérieures (force gravitaire, réaction au sol, résistance de l'air ou de l'eau), des forces intérieures (forces articulaires et musculaires qui agissent sous le contrôle du système nerveux central) et la somme des moments de ces forces sont nulles.

Base de sustentation en position de double appui

Base de sustentation, en station sur deux pieds modérément écartés

Base de sustentation en position de double appui avec une canne

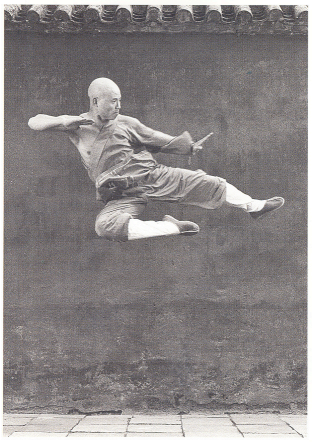


Base et triangle de sustentation, projection de la ligne de gravité du corps.

Extrait de l'EMC Paris kinesthésie (rééducation fonctionnelle 26013 A 10 et A 15 (2-1979)
In Perrin et al., 1987

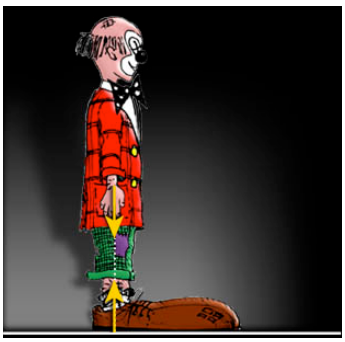
Traditionnellement, on estime que l'équilibre statique est réalisé lorsque la projection verticale du centre de masse (CM) tombe à l'intérieur du polygone (de la base) de sustentation, l'équilibre étant d'autant plus instable que le point de projection du centre de masse et celui du

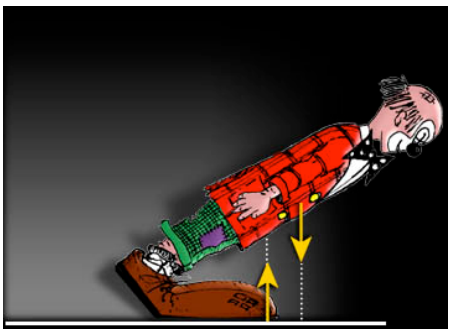
centre des pressions s'écartent du centre du polygone (de la base) de sustentation. Pour un solide rigide, le centre de masse et le centre des pressions (*i.e.* le barycentre des appuis) sont alignés sur la ligne de gravité.



En condition dynamique, on considère le corps comme étant en équilibre stable lorsque, soumis à des perturbations, il est capable de retrouver sa position initiale. Un équilibre est alors considéré comme étant plus ou moins instable en fonction de l'intensité des forces nécessaires (ou du temps ou bien encore de la vitesse) pour revenir à la position initiale.

Enfin, l'équilibre postural peut se définir comme la tendance pour le corps à rester dans la position désirée ou à bouger de façon contrôlée (équilibre dynamique).





Les deux premières figures rassemblent les conditions dans lesquelles l'équilibre est conservé. Dans la troisième la somme des moments n'étant pas nulle, le sujet tombe.

Un des problèmes majeurs qui surgissent lorsqu'on essaie de comprendre l'organisation d'un mouvement donné est que les mêmes forces qui produisent le mouvement sont en même temps les forces perturbatrices. Tout mouvement du corps ou d'un segment corporel perturbe l'équilibre. Lors de la mise en action d'un segment du corps, la distribution (répartition) des masses évolue et engendre un déplacement du centre de gravité. Lors de la production d'un mouvement, la posture et le mouvement doivent être coordonnés, mais également la posture et l'équilibre.

En fait, lors de la production d'un mouvement, le contrôle de l'équilibre est réalisé par le déplacement des segments qui compensent le déplacement du centre de gravité engendré par ce mouvement. Les segments "compensateurs" déplacés peuvent servir de référentiel pour le maintien de l'équilibre. Une contradiction pourrait apparaître entre la nécessité de maintenir l'équilibre à un moment donné et le fait de devoir stabiliser les segments de référence durant la production du mouvement. D'où la nécessité d'une coordination se traduisant par exemple par des mouvements de compensation du buste lors de l'élévation unilatérale de la jambe. La loi d'action réaction intervient également. Ainsi, au cours de la marche, l'élévation du membre inférieur crée une action en sens opposé au niveau de la hanche. On a pu mettre en évidence également l'apparition d'ajustements posturaux au niveau des articulations des membres inférieurs lors d'un mouvement des membres supérieurs. Le contrôle de l'équilibre ne se limite pas à un modèle semblable à la mécanique d'un pendule inversé mais fonctionne selon un modèle en chaîne multi segmentaire. Il semble donc établi qu'il existe une interaction entre le maintien de l'équilibre et la dynamique de la posture.

Les différentes stratégies développées pour faire face à la perturbation de l'équilibre varient en fonction du niveau d'habileté de l'individu. Chez les sportifs de haut niveau, l'organisation posturale ne serait pas meilleure que celle du néophyte, mais tout simplement différente. La pratique d'un sport où le maintien de l'équilibre joue un rôle fondamental, comme dans la danse ou le judo, semble améliorer le contrôle de l'équilibre postural. L'équilibre peut être perturbé de plusieurs façons, par le déplacement du sol (*e.g.* un plateau mobile), par une poussée du corps, par une perturbation visuelle (flux visuel). Cette perturbation peut aussi provenir de la diminution du polygone de sustentation, considérée comme perturbatrice de l'équilibre. Il est moins aisé de se maintenir en équilibre quand les deux pieds sont serrés ou placés l'un derrière l'autre ou en appui sur un seul pied, la position la plus stable étant la position habituelle, les pieds écartés à une distance sensiblement égale à la largeur des épaules.

En résumé *: il existe différents types d'équilibre dont la définition ne se limite pas à la projection de la verticale du centre de gravité à l'intérieur du polygone de sustentation. Centre de gravité et centre des pressions interviennent dans le contrôle de l'équilibre, contrôle qui met en jeu différents processus (anticipateurs ou compensateurs).*

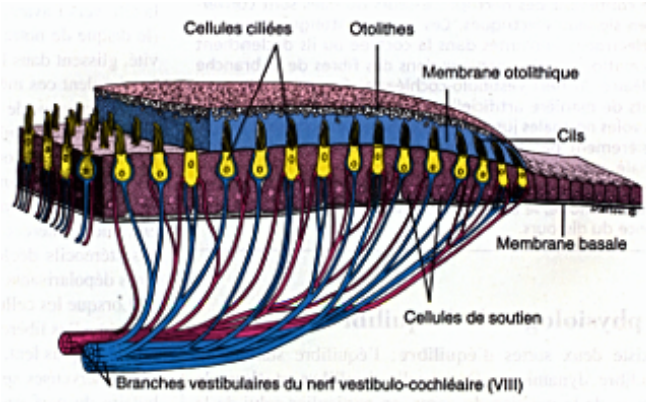
D) Structures mises en jeu

Le système vestibulaire constitue le propriocepteur céphalique et joue un rôle majeur dans le contrôle des équilibres statique et dynamique. On sait par exemple que chez l'homme, la lésion

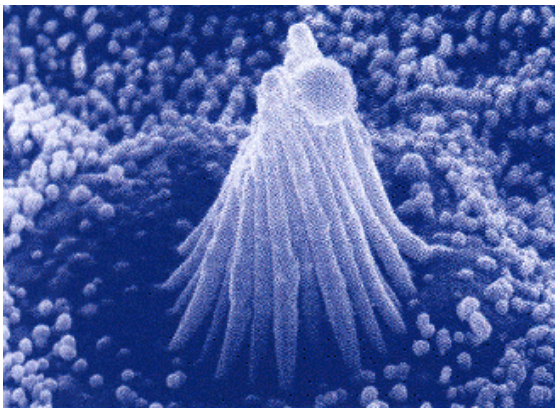
unilatérale du système vestibulaire entraîne du côté lésé une inclination latérale de la tête et du corps, des déséquilibres et des tendances à la chute (Lacour, 1998). Le système vestibulaire représente un véritable référentiel de l'orientation spatiale, notamment par rapport à la verticale gravitaire. Nous avons dans l'oreille interne (ou labyrinthe), au voisinage de la cochlée (récepteur de l'audition avec l'organe de Corti), cinq capteurs appartenant au système vestibulaire constitué de deux sous-systèmes, les 3 canaux semi-circulaires et les otolithes (composés du saccule et de l'utricule). Ces structures baignent à l'intérieur du labyrinthe dans un liquide, l'endolymphe, à teneur faible en Na++ et très élevée en K++.

d_1) les organes otolithiques

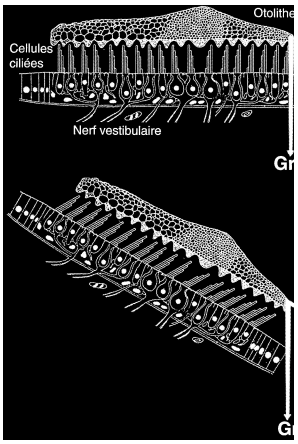
Les otolithes (le saccule et l'utricule) possèdent la propriété de détecter les accélérations linéaires (et non angulaires). Les parois de l'utricule et du saccule possèdent chacune une petite région appelée macule, récepteur de l'équilibre statique mais contribuant également à l'équilibre dynamique. Ces macules sont perpendiculaires l'une par rapport à l'autre (verticale pour le saccule et horizontale pour l'utricule), elles adressent des informations sensorielles sur la position de la tête dans l'espace. Elles sont constituées de deux types de cellules : les cellules ciliées, réceptrices, et les cellules de soutien. Le saccule permet la détection des accélérations linéaires verticales et contribue à l'orientation de la tête.



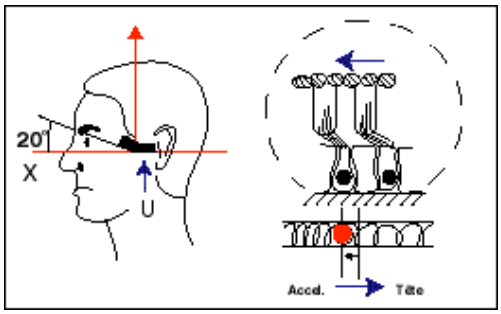
Structure générale de la macule (Tortora & Grabowski, 1994).



Photographie au microscope à balayage d'une cellule ciliée de l'organe otolithique.



Source LPPA Collège de France

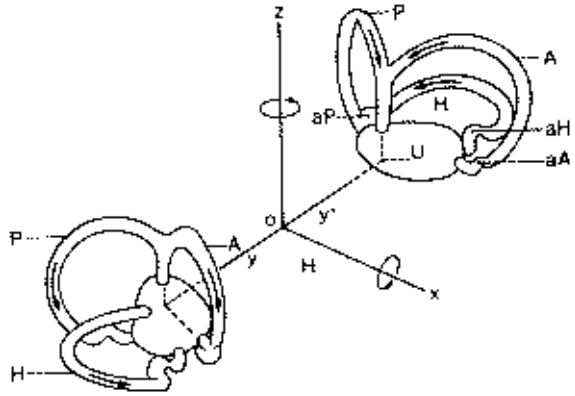


Principe de fonctionnement des capteurs otolithiques (d'après Berthoz, 1991)

Ces otolithes comprennent des cellules sensorielles noyées dans l'endolymphe où sont placés de fins cristaux de carbonate de calcium (appelés otoconia ou otoconium au singulier, dont la taille moyenne est de 10 microns environ et la densité égale à 2,95 g/cm^3) soumis à l'action des forces d'inertie. Ces cellules sensorielles comportent des cils, sensibles au mouvement (vertical dans l'utricule et horizontal dans le saccule). Il existe une fréquence de décharge caractéristique pour une position donnée de la tête, créant une information précise disponible pour le système nerveux central. Cette fréquence de décharge est d'autant plus élevée que cette pression exercée sur les cils est importante. Les déplacements de la tête vont amener l'endolymphe à exercer une pression sur les cellules sensorielles. Ce mouvement des cils va traduire la force mécanique créée par ces déplacements en un potentiel récepteur déclenchant des volées d'influx nerveux par modification du potentiel des neurones sensitifs qui leur sont reliés. Les messages nerveux seront ensuite acheminés le long de la branche vestibulaire du nerf vestibulo-cochléaire. Lorsque le corps est immobile, les récepteurs maculaires déchargent leur influx en fonction de l'intensité de la composante de l'accélération gravitaire qui se projette dans le plan de la macule. La valeur de cette composante étant liée à la position de la tête, ces récepteurs donnent une information sur la position de la tête par rapport à la verticale.

Ce système otolithique joue également un rôle d'inclinomètre (influence de la gravité sur ce capteur). Dans les années récentes, diverses expérimentations ont montré que la verticale subjective visuelle reçoit l'information gravitaire exclusivement des otolithes, alors que la verticale subjective posturale est gouvernée de façon prédominante par des gravicepteurs inconnus situés dans le tronc (expérimentation sur table inclinable pour mesurer la posture horizontale subjective et sur traîneau [le sled – voir illustration *infra*] soumis à la force centrifuge).

d_2) les canaux semi-circulaires

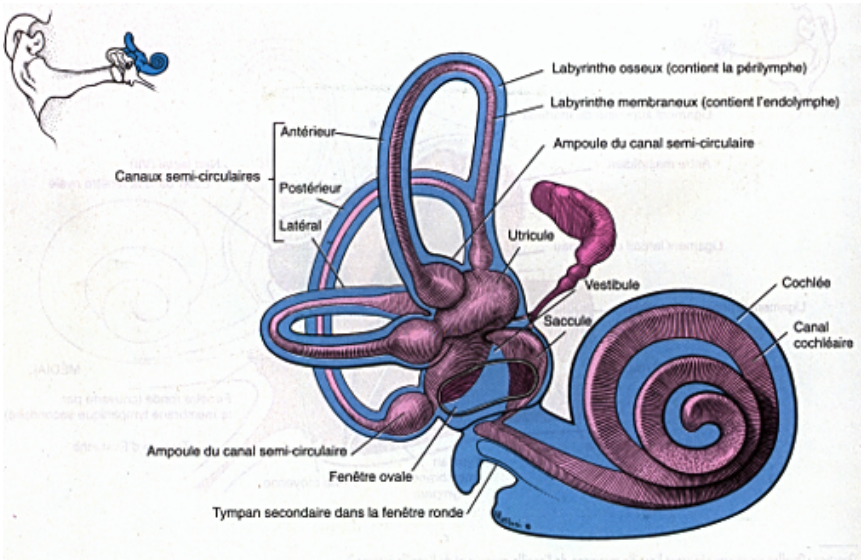


Disposition géométrique des canaux semi-circulaires selon les différents axes de l'espace (d'après Buser et Imbert, 1987).

Ils existent chez toutes les espèces. Les canaux verticaux sont disposés selon trois plans orthogonaux entre eux (CSC antérieur et postérieur verticaux, CSC latéral horizontal), correspondant aux trois dimensions de l'espace. L'orientation spatiale des canaux semi-circulaires est définie par rapport à un référentiel spatial Oxyz pris par rapport à la tête :

- l'axe y, transversal, passe par les deux méats auditifs
- l'axe x, sagittal, orienté de 30° vers le haut par rapport à l'axe sagittal horizontal, se situe dans le plan du canal horizontal
- l'axe z, perpendiculaire au plan horizontal, est également incliné de 30° par rapport à la verticale.

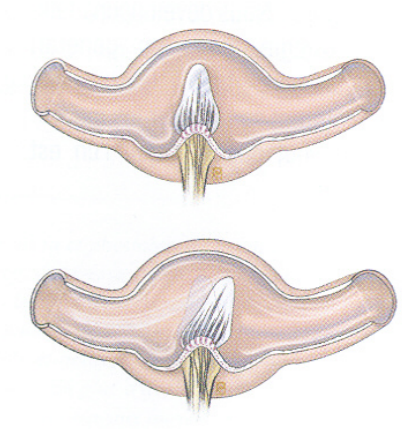
Les macules utriculaires sont sensiblement situées dans le plan xOy des canaux horizontaux, les sacculaires sont verticales et pratiquement parallèles au plan du canal semi-circulaire antérieur. Ce référentiel céphalique Oxyz ne coïncide avec le référentiel spatial gravitaire que lorsque la tête est inclinée de 30° en avant de sa position naturelle.



Canaux semi-circulaires (d'après Tortora & Grabowski, 1994).

Les canaux semi-circulaires prennent chacun naissance et se terminent dans l'utricule. Ils comportent également chacun une structure réceptrice, abritée dans un renflement terminal du canal et appelée ampoule. L'ampoule contient une petite saillie ou crête ampullaire, structure épaissie supportant les cellules réceptrices (ciliées) et les cellules de soutien, elle-même surmontée d'un repli formant une membrane élastique dite cupula (cupule). Entre les cellules ciliées naissent les fibres d'origine du nerf vestibulaire, branche de la 8ème paire crânienne. Ces canaux contiennent un gel visqueux, l'endolymphe, dont la composition chimique est semblable à celle du liquide intra cellulaire (cf. *supra*) et sur lequel s'exercent les forces d'inertie.

Chaque canal perçoit d'une manière spécifique les accélérations angulaires selon le plan, le sens et la direction de l'accélération par rapport au plan de ce canal. Par exemple, au cours des mouvements de flexion-extension, seules les crêtes des canaux supérieurs seront mises en mouvement, les crêtes des canaux verticaux postérieurs s'inclineront au cours des mouvements d'inclinaison latérale de la tête, alors que les mouvements de rotation de la tête dans le plan horizontal (mouvements de haut en bas et mouvements d'avant en arrière) stimuleront les crêtes des canaux antérieurs.



Ampoules
des canaux semi-circulaires

(schéma de Bastid, Revue Découverte)

Les déplacements de la tête vont amener l'endolymphe à exercer une pression sur les cellules sensorielles ciliées situées dans l'ampoule du canal semi-circulaire (déviation de la cupule, déformation des cils des cellules sensorielles). Comme pour les otolithes, ce mouvement des cils va traduire la force mécanique créée par ces déplacements en un potentiel récepteur déclenchant des volées d'influx nerveux par modification du potentiel des neurones sensitifs qui leur sont reliés. Les messages nerveux seront ensuite acheminés le long de la branche vestibulaire du nerf vestibulo-cochléaire.

La plus grande partie des fibres de la branche vestibulaire du nerf vestibulo-cochléaire (nerf 8) entrent dans le tronc cérébral juste au-dessus de la moelle épinière et aboutissent dans le complexe nucléaire vestibulaire de la protubérance. Les autres fibres entrent dans le cervelet par le pédoncule cérébelleux inférieur. Ces neurones reçoivent également des afférences originaires des récepteurs visuels et somesthésiques, en particulier des récepteurs de la nuque

indiquant l'inclinaison de la tête. Ces signaux sont intégrés dans les noyaux vestibulaires, permettant d'envoyer des signaux au niveau des muscles oculaires et de la moelle épinière.

Les canaux semi-circulaires sont des capteurs de rotation (gyro récepteurs) qui ont comme stimulus spécifique l'accélération (la variation de la vitesse). Ils peuvent être considérés comme des accéléromètres angulaires. Ils ne délivrent pas d'information lorsque la tête se déplace à vitesse constante (ceci est vrai également pour les otolithes). L'accélération est détectée avec un seuil de sensibilité très bas de $0{,}1°.s^{-1}$ dans le plan du canal concerné. Les crêtes ampullaires situées dans les canaux semi-circulaires sont les organes sensitifs de l'équilibre dynamique.

E) Propriétés et limites du système vestibulaire

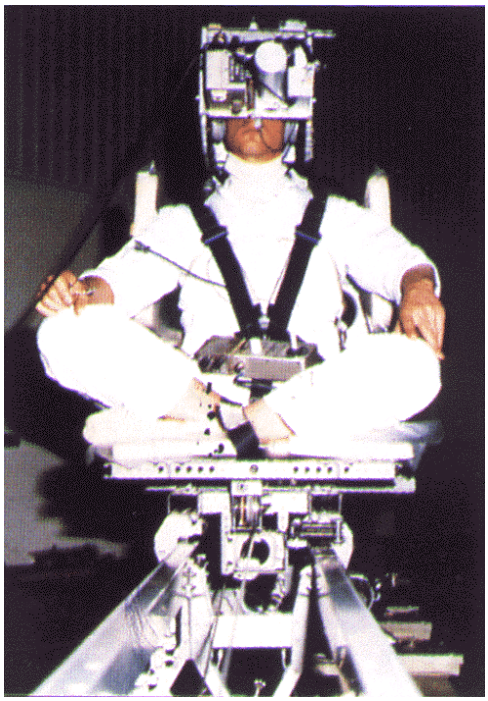
e_1) apports du système vestibulaire

Les propriétés larges du système vestibulaire (sensibilité à la gravité, aux accélérations linéaires) en font un élément particulièrement intéressant, mais néanmoins ambigu (d'où l'importance du rôle de la vision) : il s'avère en effet impossible de différencier une accélération linéaire d'une inclinaison de la tête. En fait, il existe une ségrégation fonctionnelle des deux types d'informations (accélération linéaire et inclinaison) dès le premier récepteur. Ceci a été mis en évidence par l'enregistrement des fréquences de décharge dans le nerf 8 (sortie des capteurs) en rapport avec l'accélération, en fonction de la fréquence de l'oscillation du déplacement linéaire : il y a deux types de fibres afférentes (nerf vestibulaire) dans le système otolithique : des fibres régulières et des fibres irrégulières. Ces fibres possèdent des propriétés différentes dans leur capacité à coder les mouvements. Les fibres irrégulières, sensibles aux hautes fréquences (filtre passe haut) détectent la vitesse et l'accélération, les fibres régulières, sensibles aux fréquences plus basses (filtre passe bas) détectent les mouvements très lents. Par ailleurs, ce système otolithique favorise une perception d'une extrême précision (quelques $cm{\cdot}sec^{-1}$, c'est-à-dire quelques millièmes de G). Un premier contingent de fibres va pouvoir détecter les variations toniques de l'inclinaison de la tête par rapport à la gravité. Puis un second détectera la vitesse et l'accélération.

Il est possible d'étudier les propriétés de ce capteur vestibulaire dans la détection des déplacements. La contribution du système vestibulaire à la mesure des déplacements passifs linéaires (translation latérale de quelques dizaines de centimètres) ou en rotation a été démontrée, les sujets pouvant évaluer très précisément la distance parcourue et la restituer avec des saccades oculaires. Les sujets, placés sur un chariot coulissant (le SLED, voir figure

infra), doivent fixer une cible située à 60 cm dans le plan frontal, puis mémoriser la position de cette cible dans l'espace. Après déplacement, ils doivent produire un mouvement des yeux (une saccade oculaire ou un pointer) en sens inverse du mouvement de leur corps indiquant là où se trouvait la cible précédemment. Ce mouvement « de compensation » produit après une saccade est construit à partir d'une image interne de la position de la cible mémorisée.

Les résultats indiquent une relation entre les déplacements de l'œil et de la tête d'une très grande précision (de façon tout à fait remarquable, ceci peut être réalisé même avec un délai de deux minutes), ce qui confirme la capacité du cerveau à extraire le déplacement de la tête avec la métrique qui convient. Cette capacité est bien à mettre au compte du système vestibulaire. En effet, chez des sujets ne disposant plus de ce système, aucune corrélation n'a pu être mise en évidence entre le déplacement du sujet et la saccade oculaire. Les otolithes participent donc au calcul des déplacements de la tête dans l'espace en l'absence de toute information visuelle.



Le SLED (LPPA – Collège de France)

Un autre dispositif (robot mobile) pour l'étude de l'estimation des déplacements à partir des informations vestibulaires (LPPA – Collège de France)

e_2) limites du système vestibulaire. Coopération et substitution entre les systèmes sensoriels

L'organe vestibulaire nous renseigne en permanence sur les mouvements autour des trois axes de rotation (transversal, longitudinal, sagittal) ainsi que sur les inclinaisons de la tête. Il présente cependant quelques imperfections fonctionnelles :

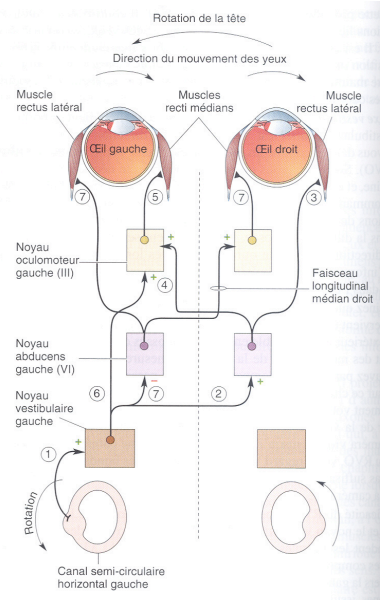
- il ne nous renseigne pas sur les mouvements à vitesse constante, mais uniquement sur les variations de vitesse (accélération et ralentissement). Un sujet, placé dans l'obscurité, soumis à un déplacement passif, ne peut avoir de perception de son déplacement à vitesse constante. Le vestibule ne mesure que les changements de vitesse (c'est une des raisons pour lesquelles il y a coopération avec la vision)

- il ne discerne pas une inclinaison statique d'une accélération linéaire

- il ne fait pas la différence entre une accélération (linéaire ou en rotation) dans un sens et une décélération (linéaire ou en rotation) en sens opposé.

Ces lacunes sont palliées grâce à la complémentarité des autres capteurs sensoriels. C'est à partir de la combinaison visuel-vestibulaire que peut être élaborée la perception. Bien sûr, il existe une très grande variété de réponses (il existe différents types de neurones combinant les informations visuelles et vestibulaires ; on obtient suivant les neurones des combinaisons différentes).

F) Le réflexe vestibulo-oculaire (RVO)



Connexions vestibulaires contrôlant les mouvements horizontaux des yeux lors du réflexe vestibulo-oculaire. Ces voies neuronales sont activées lorsque la tête tourne brusquement vers un côté, entraînant un mouvement des yeux vers l'autre côté. Les connexions excitatrices sont en vert, les inhibitrices en rouge.

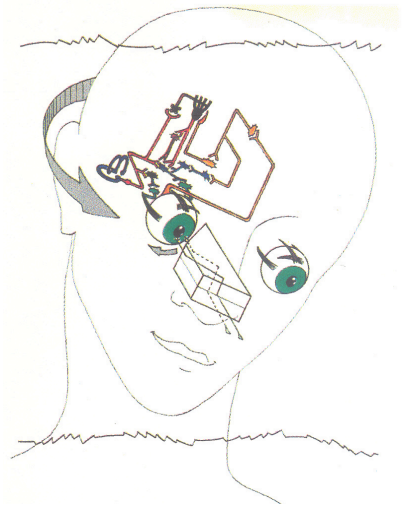


Diagramme représentant une partie des circuits neuronaux impliqués dans le traitement des informations vestibulaires et visuelles. Ces circuits contrôlent les mouvements oculaires qui permettent de stabiliser le regard pendant des rotations de la tête. De plus, on a figuré un prisme de Dove qui inverse le sens du mouvement apparent du monde visuel pendant la rotation de la tête. Ce dispositif permet d'étudier les propriétés adaptatives de ces mécanismes. Source : LPPA Collège de France

Le système vestibulo-oculaire correspond à l'ensemble des structures nerveuses et des connexions entre l'appareil sensoriel labyrinthique et les muscles extra-oculaires. Le réflexe vestibulo-oculaire (RVO) a pour but de maintenir le regard stable sur une cible lorsque la tête (ou le sujet dans son ensemble) tourne, permettant ainsi à tout instant de conserver une image stable sur la fovéa. Chez les danseurs par exemple, ce maintien se traduit par une organisation particulière en deux temps : une orientation de la tête suivie de la rotation du reste du corps suivie enfin de la rotation rapide de la tête.

Le réflexe vestibulo-oculaire s'exprime au moment d'une accélération linéaire ou en rotation de la tête. Cette accélération incline les cils situés au niveau des canaux semi-circulaires de l'oreille interne (cette structure cérébrale est à l'origine de l'expression du réflexe), entraînant la création d'un potentiel d'action qui va cheminer le long de l'axone du neurone vestibulaire pour distribuer l'information aux différents motoneurones. Le cervelet est impliqué dans la modulation

de ce réflexe.

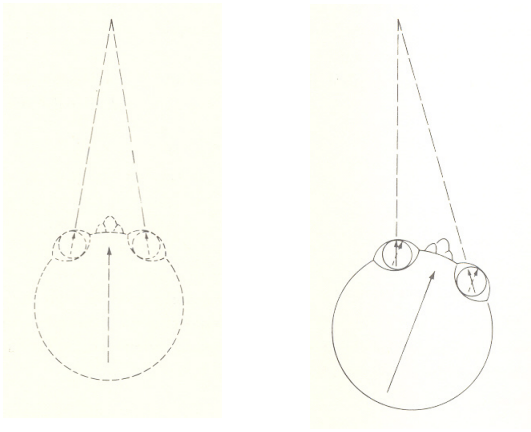


Illustration du réflexe vestibulo-oculaire (d'après Gibson, 1979)

Ce réflexe se traduit par un mouvement compensatoire qui s'exprime par une rotation de l'œil en direction opposée (mouvement contraversif) à celle de la tête. Par exemple, lorsque la tête tourne à droite, on a lors de l'expression ou production du RVO une rotation de l'œil vers la gauche. La relation entre le déplacement angulaire de la tête et le déplacement que le RVO entraîne dans l'axe optique est approximativement linéaire. Lors du fonctionnement normal du système vestibulaire, les mouvements de contre rotation de l'œil sont égaux en amplitude et en vitesse aux mouvements de la tête. On parle dans ce cas d'un gain de valeur égale à 1. Le gain est l'expression du quotient ou du rapport de la vitesse de rotation de l'œil sur la vitesse de rotation de la tête (ou rapport entre les amplitudes de la réponse et du stimulus. Si la cible se déplace ou tourne à la même allure que le sujet, le gain du réflexe vestibulo-oculaire est nul).

L'efficacité de la stabilisation de l'œil ou de la tête est donc liée à la valeur du gain du réflexe. On observe le même phénomène pour des accélérations linéaires. L'œil d'un sujet assis sur une chaise installée sur des rails et que l'on soumet à une accélération vers la gauche tournera son regard ou sa tête vers la droite (on parle dans ce cas de réflexe vestibulo-oculaire linéaire).

En condition normale de lumière et pour des fréquences de rotation comprises entre 0.5 et 10 Hz (c'est-à-dire entre 0.5 et 10 images.s^{-1}), le gain est compris entre 0.8 et 1, le déphasage est proche de 180° (l'œil se déplace approximativement à la même vitesse que la tête mais en sens opposé). Ce système est saturé (ne donne plus d'information visuelle précise, définie, au sujet) pour des vitesses de la tête dépassant 350°.s^{-1} (Pulaski & Zee, 1981). Ces performances (gain et déphasage) permettent au RVO de fonctionner dans le domaine de fréquence des mouvements naturels de la tête.

L'intérêt du RVO se situe notamment au niveau d'un temps de latence (c'est-à-dire de délai de déclenchement du réflexe) très faible, de l'ordre de 12 ms. Ceci représente un gain d'environ 150 ms par rapport à une réaction d'origine purement visuelle.

G) Les problèmes de coordination œil-tête

Lorsque l'on regarde une cible et que l'on tourne la tête en essayant de garder le regard sur cette cible, cette tâche ne peut être effectuée que par le RVO. Le système saccadique (se traduisant par un mouvement extrêmement rapide de l'œil) peut entrer en jeu à un moment donné si le gain du réflexe vestibulo-oculaire n'est pas suffisant (*i.e.* inférieur à 1), si le mouvement de l'œil ne compense pas exactement le mouvement de la tête. Le cerveau peut alors déclencher une saccade de rattrapage (*catch-up saccad*) qui compense pour ce gain faible. Il existe des synergies motrices de coordination entre les mouvements des yeux et de la tête, complétées par une flexibilité fonctionnelle remarquable (la substitution de saccades au système vestibulaire déficient ou lors de perturbations dans la cohérence des informations sensorielles). Cette vicariance, cette possibilité pour le système global de commuter d'un sous-système à un autre en cas de besoin, souligne sa capacité à s'adapter aux contraintes par la mise en jeu de ressources différentes.

Le système saccadique joue donc un rôle important dans l'adaptation à des contraintes ou des conflits multisensoriels. En plus de la coopération existe également la possibilité d'une substitution fonctionnelle (exigeant une représentation centrale d'une cible dans l'espace) des mécanismes d'orientation aux mécanismes de stabilisation. Cette coopération veut dire qu'éventuellement l'ensemble de ce mouvement compensateur de l'œil qui assure la stabilisation perceptive n'est peut-être pas simplement réflexe, mais peut-être lui-même entraîné par une représentation interne de la position de la cible dans l'espace qui éventuellement permettrait de calculer si l'on peut dire ou d'élaborer cette saccade qui amène l'œil juste à l'endroit où il doit aller pour rattraper en quelque sorte les déficiences du réflexe vestibulo-oculaire. D'où l'idée qu'éventuellement ces mécanismes réflexes de bas niveau sont eux-mêmes guidés, contrôlés par des mécanismes de plus haut niveau, corticaux par exemple qui sont des mécanismes de spatialisation, de représentation spatiale d'une cible dans l'espace et qui orchestreraient la contribution des différents sous-systèmes.

H) Convergence des informations sensorielles

Quel que soit le mouvement réalisé, l'ensemble des informations recueillies par les divers récepteurs articulaires, musculaires, proprioceptifs, visuels et vestibulaires va converger vers les centres nerveux supérieurs (*via* la moelle épinière, le cervelet, le thalamus). Toutes ces informations vont être traitées de façon à permettre au cerveau d'obtenir une estimation du mouvement à déclencher ou de poursuivre une action motrice. Les différents capteurs sont étroitement liés et agissent en synergie sur les muscles de la posture afin de conserver l'équilibre, ainsi que sur les muscles oculomoteurs afin d'assurer la stabilité du champ visuel. Cette approche poly ou multi modale de la perception et du contrôle du mouvement s'apparente au problème de "fusion des capteurs" en robotique. Cette coopération, qui constitue un premier mode d'interaction entre plusieurs systèmes sensoriels, permet également au cerveau lorsqu'il planifie un mouvement de présélectionner des configurations d'états de systèmes sensoriels. Il est important de bien comprendre que l'anticipation et la prédiction incluent la pré-spécification des entrées sensorielles, y compris jusqu'au premier niveau de leur capture, de leur mesure par les récepteurs.

En résumé : *le système vestibulaire joue un rôle tout à fait central dans le contrôle des équilibres statique et dynamique. Il représente un véritable référentiel de l'orientation spatiale, notamment par rapport à la verticale gravitaire. Ses cinq capteurs nous renseignent en permanence sur les mouvements autour des trois axes de rotation (transversal, longitudinal, sagittal) ainsi que sur les inclinaisons de la tête. Il présente cependant quelques imperfections fonctionnelles palliées grâce à la complémentarité des autres capteurs sensoriels, notamment à partir de la combinaison visuel-vestibulaire.*

I) Compensation et suppléance vestibulaires

Face à ces déficits dans la relation du sujet à son environnement, il existe des phénomènes de compensation, permis entre autres par la multimodalité sensorielle caractérisant le fonctionnement du système nerveux central. Comme nous l'avons déjà évoqué, l'organisme, dans sa relation à l'environnement, fait appel à différentes modalités sensorielles. L'action conjuguée de ces différentes modalités sensorielles, visuelles, vestibulaires et proprioceptives permet le contrôle du mouvement. Dans le cas de la posture par exemple, cette multisensorialité met en œuvre trois modalités afin d'assurer son maintien : la vision à partir des éléments du champ environnant, le système vestibulaire à partir des forces gravito-inertielles et la sensibilité sensorielle à partir des informations issues du contact avec le sol et des indices proprioceptifs musculaires et articulaires. De la même façon, un déplacement relativement rapide de la tête est

détecté simultanément par trois systèmes différents : le système labyrinthique par les canaux semi-circulaires, le système visuel par le flux optique se projetant sur la rétine et le système proprioceptif par les muscles du cou. Enfin, l'orientation spatiale d'un sujet fait aussi appel à différentes sources d'informations ou s'organise selon différents référentiels, utilisant en cela la redondance du système : un référentiel visuel, un référentiel gravitaire, un référentiel égocentré.

Il existe donc au niveau des centres supérieurs une redondance de l'information qui va créer pour le sujet la possibilité de favoriser à un moment donné, en fonction des conditions dans lesquelles il se trouve, un type particulier d'information (d'afférences sensorielles) plutôt qu'un autre. Cette sorte de parallélisme multimodal peut intervenir à des niveaux plus ou moins complexes de la conduite. Quand vient à manquer une donnée sensorielle, l'organisme pallie cette absence ou ce déficit sensoriel en recourant à une autre entrée, voire à d'autres modalités sensorielles de façon à pallier la carence consécutive à ce manque. L'ensemble du vivant répond aux contraintes environnementales par des modifications adaptatives. Le sujet met en jeu des mécanismes de régulation en se réorganisant, voire en innovant face à des contraintes nouvelles. Il existe ainsi des réarrangements, des réorganisations, des changements plastiques permanents (cette notion de plasticité peut être comprise dans l'acception proposée par Vital-Durand (1974), à savoir "la propriété que possède le système nerveux d'orienter son développement en fonction de contraintes imposées par des lésions ou des manipulations de l'environnement sensoriel ou moteur" - elle correspond également, selon Paillard (1977), à "la capacité que peut présenter ce système de modifier durablement sa structure interne en acquérant une possibilité nouvelle de fonctionnement non prévue dans son plan de construction initial". La notion essentielle ici est celle de permanence de la transformation), grâce auxquels le cerveau peut s'adapter à des interruptions du fonctionnement sensoriel normal. De nouvelles connexions peuvent s'établir afin de permettre à nouveau un câblage fonctionnel. L'idée majeure est ici celle de la compensation par le système nerveux central des effets d'une lésion. Ceci se fonde sur différents principes ou fonctions, comme le principe d'équipotentialité, le principe de substitution (qui concerne aussi bien les aspects neuronaux que comportementaux) et la fonction de vicariance que nous évoquerons un peu plus loin dans ce cours. Ainsi, la vision déficiente sera remplacée par l'audition pour les objets lointains (écholocation) ou par le toucher pour les objets plus proches. Certaines recherches ont pu montrer qu'inversement la surdité, qu'elle soit d'origine génétique ou acquise au cours de la petite enfance, conduisait à une réorganisation partielle du cerveau. On a pu montrer chez l'animal que des neurones du cortex auditif acquièrent des caractéristiques des

neurones visuels. Chez l'homme, les données expérimentales ont montré que tout se passait comme si une partie du cortex visuel s'appropriait certaines zones du cortex normalement destinées à l'audition.

J) L'exemple du salto

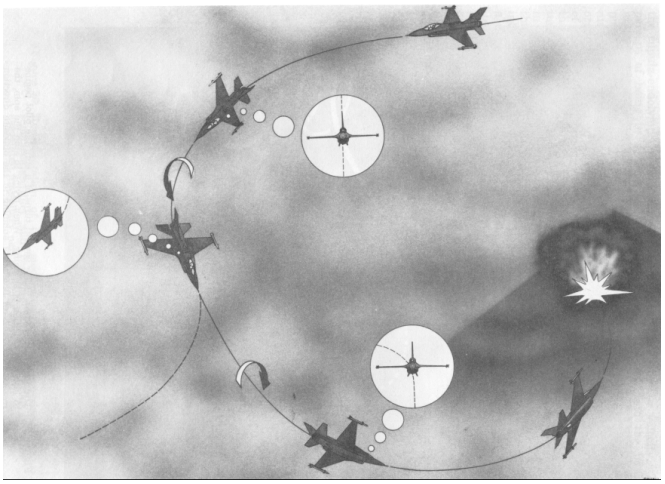
Un certain nombre de travaux sur le trampoline ont montré une organisation différente du sujet en fonction des différentes phases (élévation, rotation, réception) observées lors de la production d'une figure complexe (salto). Pendant l'élévation, on peut utiliser la vision, le système vestibulaire, les informations proprioceptives pour réguler le mouvement et éventuellement déclencher la rotation. La vitesse du mouvement n'est pas suffisante pour que le glissement rétinien ne puisse pas être compensé par les réflexes vestibulaires, par exemple. En revanche, pendant la rotation il est absolument exclu que la vision puisse être utilisée puisque le glissement rétinien est de plusieurs centaines de degrés par seconde (pour mémoire, certains auteurs, comme Pulaski & Zee – 1981 - ont montré que la limite de défilement possible de l'image sur la rétine était de $350°.s^{-1}$).

L'hypothèse formulée est que le cerveau bascule, à un moment précis, d'une configuration d'entrées sensorielles utilisées à une autre configuration et qu'il passe d'une stratégie de régulation du mouvement utilisant un certain nombre des capteurs dans cette phase-là à une autre stratégie purement inertielle dans cette phase-ci dans laquelle il ne va faire qu'une intégration de la rotation (au sens mathématique du terme), en n'utilisant éventuellement que les informations vestibulaires des canaux semi-circulaires. Ensuite, au moment où il repasse à une troisième stratégie qui est celle de la préparation à l'atterrissage ou réception, une configuration complètement différente est mise en jeu au niveau du réglage des différentes informations. Il s'agit alors de régler avec une très grande précision, outre la vision, les réactions posturales au niveau des membres inférieurs. L'idée générale qui est alors émise est qu'il se produit au cours des mouvements complexes des changements, des basculements de ces présélections des entrées sensorielles qui font partie de l'apprentissage d'un mouvement, qui vont faire partie également des problèmes comme les pertes de figures que rencontrent

parfois les sportifs. Il s'agit là non pas de la simple gestion d'erreurs sensorielles, motrices, de comparaison, de reconnaissances de perturbations. Il s'agit de la gestion de changements de configurations qui doivent se produire en quelques secondes seulement. L'hypothèse d'une appréciation fine par le sujet de l'orientation de son corps dans l'espace à partir des informations dont il dispose suppose donc une diversification des différentes informations sensorielles.

K) Informations et illusions

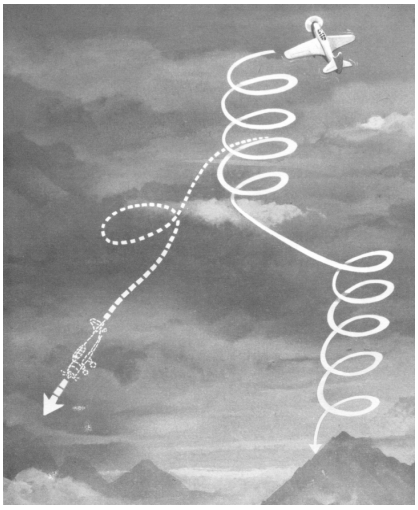
Dans le cas de lésions au niveau des récepteurs labyrinthiques ou des voies vestibulaires, le sujet reçoit des informations asymétriques correspondant dans les conditions normales à un déplacement. Ces informations erronées créent une illusion visuelle (qui peut aller jusqu'au vertige), entraînant un certain nombre de réponses posturales inadaptées (chutes par exemple).



Source : www.spatiald.wpafg.af.mil/Overview.aspx

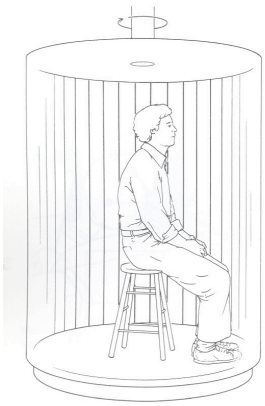
Le système otolithique peut également contribuer à créer des illusions. Il existe toute une famille de ces illusions (otolithiques et canalaires), dues aux ambiguïtés développées par le fonctionnement de ces capteurs. Les travaux menés par l'armée américaine rapportent des accidents parfois mortels imputables à une modification de la perception (composition entre la gravité et l'accélération) par le pilote de la verticale subjective lors d'une accélération se produisant dans un plan horizontal. Une autre survenue classique de ce type d'illusion dite somatogyre (i.e. se produisant lors d'une rotation du corps) se produit dans certaines configurations de mouvements, comme la vrille au surnom doucement évocateur de vrille du cimetière (il existe également le virage du cimetière). Envisageons une vrille sur la gauche. Au début, les sensations dues à l'accélération angulaire sont perçues correctement. Si ce mouvement se poursuit, le pilote est alors soumis après plusieurs tours de vrille à une rotation à vitesse constante et d'une durée suffisante pour que les canaux semi-circulaires ne fournissent plus d'information par manque de stimulation. L'information visuelle ne peut pas donner d'information de position. Lorsque ce pilote va entamer les manœuvres de sortie de vrille, la rotation de l'avion cesse. Les cupules qui étaient

au repos à cause de la dernière opération vont fléchir (par accélération ou ralentissement de la manœuvre : la vitesse n'est alors plus constante). Ce fléchissement va entraîner une sensation de rotation en sens inverse. Afin de compenser cette sensation de départ en vrille dans l'autre sens, le pilote va manœuvrer à nouveau sur sa gauche pour sortir de cette vrille imaginaire, exagérant une vrille (il repart finalement en vrille dans le même sens qu'auparavant).



Les lignes pleines indiquent le mouvement réel, les lignes pointillées indiquent le mouvement perçu. Source : www.spatiald.wpafg.af.mil/Overview.aspx

La vision joue un rôle important dans la détection du mouvement. C'est en effet à partir de la prise en compte de la variation du flux optique (et notamment de la vitesse des éléments du champ visuel) qu'il est possible pour un sujet de déterminer la nature de son mouvement ou de son déplacement dans l'espace. Mais elle peut être à l'origine d'illusions de mouvement, provoquant des conflits sensoriels consécutifs à une contradiction entre deux informations sensorielles. Par exemple, lorsque l'on est assis dans un train stationné en gare et que le train d'à côté démarre, il se crée l'illusion d'être en mouvement alors que le corps reste immobile. C'est une illusion visuelle concernant les interactions visuo-vestibulaires. Ce conflit sensoriel résulte d'une contradiction entre le système visuel périphérique qui détecte un mouvement et le système vestibulaire qui ne détecte rien. Ce phénomène de mouvement induit, appelé vection (sensation de déplacement du corps propre par rapport à l'environnement perçu comme étant stable alors même que le corps est immobile et l'environnement en mouvement), peut s'obtenir de la façon suivante.



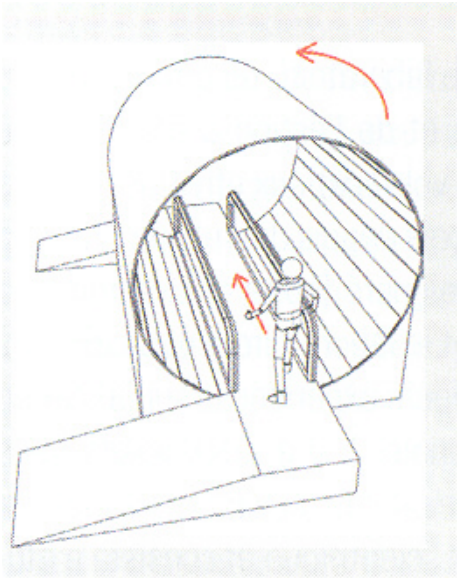
Un dispositif expérimental pour l'étude du mouvement induit de soi.

Le sujet est assis au centre d'une chambre ayant la forme d'un cylindre vertical et dont les murs comportent des rayures verticales noires et blanches de basse fréquence. Si ces murs sont mis en rotation autour de l'axe vertical de la chambre, le sujet perçoit d'abord un mouvement de la chambre, puis se sent progressivement en mouvement, l'illusion de mouvement de soi s'amplifie et, en même temps, la chambre paraît ralentir son mouvement pour enfin s'immobiliser, ce que l'on appelle la

saturation de la vection. Cette illusion de mouvement de soi peut s'accompagner d'effets posturaux importants (ce phénomène est proportionnel à l'âge et à la maturation du sys tème nerveux, des enfants très jeunes chutent parfois).

On distingue généralement deux types de vections, une vection circulaire (rotation) et une vection linéaire (translation). Le phénomène de vection est d'autant plus marqué que varie un certain nombre de paramètres :

- la vitesse de déplacement du champ visuel : en $m.s^{-1}$ pour la vection linéaire ou en $°.s^{-1}$ pour la vection circulaire
- la fréquence temporelle
- la surface totale : la vection est d'autant plus importante qu'une partie large du champ visuel est stimulée.



Le vortex crée les conditions du phénomène de vection circulaire. Le sujet se déplace sur une passerelle située dans un tunnel dont la paroi est en rotation. Ce mouvement crée chez le sujet l'illusion que c'est la passerelle qu tourne, et que lui-même tourne s'il s'immobilise.
Source Revue Découverte, octobre 2006

Il est possible d'étudier les effets moteurs (*i.e.* posturaux) de la vection. Cela peut se traduire par une inclinaison du corps de 0 à 3° vers l'avant par exemple. La structure spatiale de l'environnement est tout à fait fondamentale pour la vection. Un autre type de conflit peut être obtenu si le sujet est déplacé à une certaine vitesse alors que le flux optique possède une autre vitesse. Dans ce type de situation, le système nerveux va privilégier l'information visuelle. Cette vection semble indépendante de la stratégie visuelle du sujet.

L) Affections du système vestibulaire

l_1) le vertige

Vertige vient du latin *vertere*, tourner. Le vertige est un état difficile à définir. En effet, il présente une étiologie (étude des causes) et une symptomatologie (étude des symptômes) très

diversifiées. De nombreux sujets entendent sous cette appellation des sensations très différentes (étourdissement, instabilité, dérobade du sol sous ses pieds, sensation de chute, de vacillement). On peut définir le vertige comme une illusion de mouvement, de déplacement, soit de l'environnement par rapport au sujet, soit comme une sensation par le sujet de son instabilité par rapport à son environnement. Cette illusion de mouvement se manifeste par une impression de rotation ou de pseudo ébriété. Chacun d'entre nous a pu ressentir cette sensation désagréable lors d'un redressement rapide après une attitude fléchie (se baisser pour ramasser un objet au sol et se relever "trop" rapidement, ou se lever trop rapidement de table au cours ou à la suite d'un repas).

Le vertige se caractérise en général par son aspect soudain et inattendu (mais sa survenue peut être progressive) et la fréquence parfois répétée de ses occurrences, avec pour certains types de vertiges comme les vertiges rotatoires (sensation de manège, d'un mouvement circulaire dans un sens ou dans un autre) des manifestations neurovégétatives (nausées et vomissements). Toujours associés à un nystagmus, ces phénomènes temporairement invalidants la plupart du temps peuvent revêtir, en fonction de leur intensité, un caractère plus permanent et être à l'origine d'un processus de désocialisation du patient (milieux professionnel et/ou familial, vie quotidienne : cas de la conduite automobile).

Il convient de distinguer le vertige de l'instabilité posturale (bien que la perception par le sujet de son instabilité puisse parfois s'énoncer comme une sensation de vertige). Celle-ci peut être définie comme la sensation perçue par le sujet d'un déséquilibre survenant soit lors de la marche (sensation de marche ébrieuse par exemple) soit lors du maintien de la station debout, sans mouvement de l'environnement. Le sujet se trouve dans l'impossibilité de maintenir son corps dans une position donnée. L'instabilité signe la présence d'une ataxie, c'est-à-dire d'une privation de la coordination motrice. Ceci est observé de façon marquée chez les personnes âgées. Dans ce cas, un certain nombre de processus peuvent être à l'origine de cet état. Le vieillissement se caractérise par l'installation progressive de déficits sensoriels (diminution de l'acuité visuelle, atteinte de la vision périphérique, moindre capacité à percevoir et à traiter à la fois de façon correcte et rapide les différentes données sensorielles, temps de réaction plus important, capacités physiques diminuées dues par exemple à la fonte de la masse musculaire, réduction des degrés de liberté du corps). A la différence des vertiges dont l'occurrence peut être occasionnelle, l'instabilité posturale se caractérise par son aspect durable. Les études

cliniques menées pour apprécier ces instabilités utilisent le plus souvent les tests de Romberg, de Fukuda, le "Get up and go", pour ne citer que les plus connus).

I_2) les facteurs déclenchants

Comme nous l'avons précédemment précisé, les causes ou les circonstances d'apparition à l'origine des vertiges sont nombreuses. Le vertige, presque toujours unilatéral, peut résulter d'un conflit entre les informations vestibulaires, visuelles et proprioceptives parvenant au cerveau. Il peut survenir à la suite d'une intervention chirurgicale, d'un traumatisme crânien (mais aussi à la suite du "coup du lapin" pour le vertige paroxystique bénin), d'une infection favorisant une atteinte vestibulaire, etc. Si le vertige traduit le plus souvent une atteinte du système vestibulaire périphérique (affectant par exemple les canaux semi-circulaires), et/ou mais plus rarement de ses connexions centrales (noyaux vestibulaires, tronc cérébral), les vertiges ne sont pas tous d'origine vestibulaire. Une chute du débit sanguin cérébral, un accident vasculaire cérébral, des infections virales, la prise de médicaments (anxiolytiques, antidépresseurs), des facteurs d'ordre psychologiques (dépression nerveuse sévère, agora ou claustrophobie, foule, hauteur, …), peuvent en être à l'origine.

I_3) quelques pathologies

I_{31}) le vertige paroxystique positionnel bénin

Ce vertige bref (moins de 30 secondes), souvent violent (d'où le terme de paroxystique) peut survenir spontanément lors de changements de position (retournement dans le lit par exemple), de mouvements de la tête ou de la tête et du corps. Cette affection non pathologique de l'oreille (*i.e.* sans lésion du système vestibulaire) est la plus fréquente. C'est un vertige rotatoire vrai (les sujets ont la sensation que tout tourne autour d'eux ou bien qu'eux-mêmes sont l'objet d'un mouvement giratoire). Associé à des nausées, des vomissements, à un nystagmus, il est dû à une pression anormale, liée au déplacement et au dépôt sur la cupule du canal semi-circulaire postérieur (cupulolithiase –Schuknecht, 1969) ou au déplacement des otoconia de la macule utriculaire dans l'endolymphe de ce canal (canalolithiase –Hall, 1979). Son traitement repose sur la manœuvre de libération de ces ocotonia.

I_{32}) la maladie de Ménière

Cette maladie peu fréquente apparaît généralement après 50 ans et affecte également les hommes et les femmes. La durée de l'évolution de la maladie est en moyenne de six ans. Dans 80% des cas, la maladie de Ménière n'affecte qu'une seule oreille (les formes bilatérales sont rares). L'hypothèse la plus communément acceptée est la présence d'une congestion due à

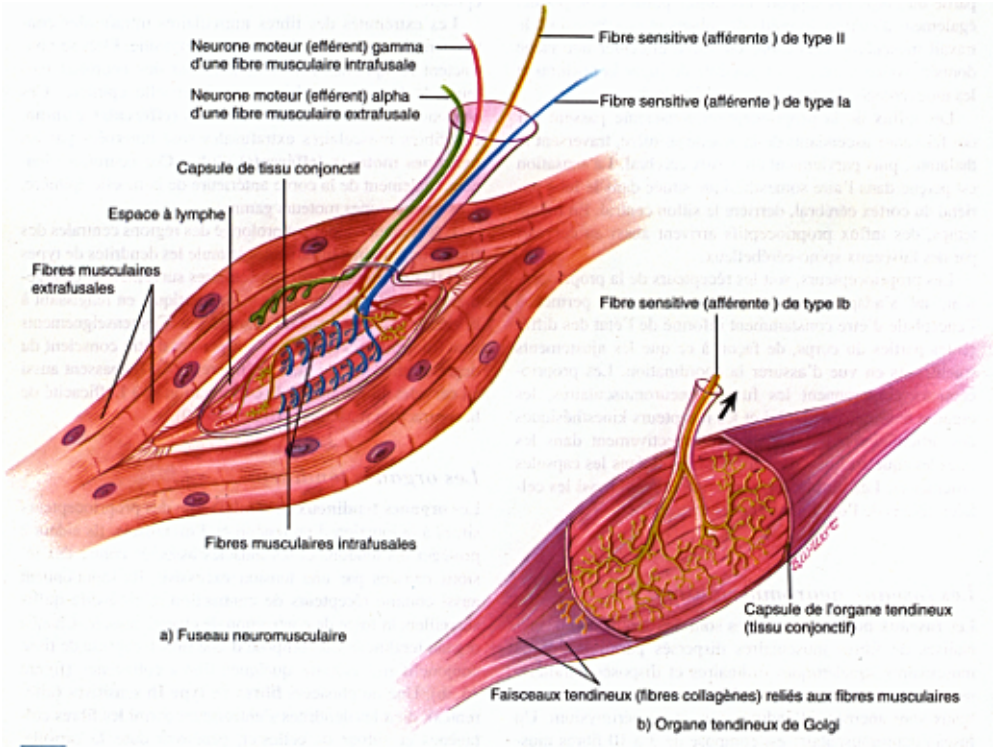
l'augmentation de la pression du liquide au niveau du labyrinthe (on parle d'hydrops -ou accumulation de liquide séreux- endolymphatique). Lorsque cette pression augmente, le signal nerveux transmis au cerveau ne lui permet plus d'interpréter correctement les signaux qu'il reçoit. D'autres causes peuvent entraîner la maladie de Ménière (traumatismes crâniens par exemple).

La maladie de Ménière se caractérise par la baisse de l'audition (hypoacousie) de l'oreille touchée (cette surdité réversible dans les premières phases s'aggrave, pouvant devenir par la suite définitive), des sensations de vertige (de type rotatoire intense) et des acouphènes (bruits ou sifflements dans l'oreille). Ces symptômes surviennent par crises répétées de quelques heures (parfois quelques minutes) à quelques jours, et peuvent être accompagnés de manifestations neurovégétatives (nausées, vomissements).

Les travaux de l'équipe des Professeurs Magnan et Chays (Marseille) montrent qu'il est possible de guérir les patients par neurotomie vestibulaire (section totale du nerf vestibulaire). Une étude menée auprès de 283 patients rapporte ainsi la guérison des vertiges invalidants dans 96% des cas, même si une instabilité persiste parfois.

M) Les capteurs articulaires et musculaires

Plusieurs systèmes concourent à rendre possible l'exécution et le contrôle d'un mouvement, de type acrobatique ou non. Comme nous venons de le voir, le mouvement est détecté chez l'homme par le système vestibulaire (considéré comme une centrale inertielle) et le système visuel, qui n'est pas seulement un capteur, mais également un détecteur du mouvement. Il faut ajouter à cela différents autres capteurs sensoriels (musculaires, articulaires, tactiles). Des informations sont fournies au système nerveux central par un ensemble de récepteurs localisés dans les muscles striés attachés au squelette, dans les articulations, les tendons et dans la peau. Ces récepteurs musculaires, articulaires et cutanés, jouent un rôle important dans le contrôle moteur. Ils alimentent d'une part les circuits qui constituent le substrat des voies réflexes et contribuent au feedback sensoriel, dont l'importance pour le contrôle moteur est à souligner, mais également à la perception du mouvement. Cette modalité sensorielle est globalement mentionnée sous le terme de "proprioception", que l'on pourrait définir comme le sens de la position du corps dans l'espace et de la position relative des différents segments les uns par rapport aux autres (certains auteurs utilisent pour cela le terme d'orientation).

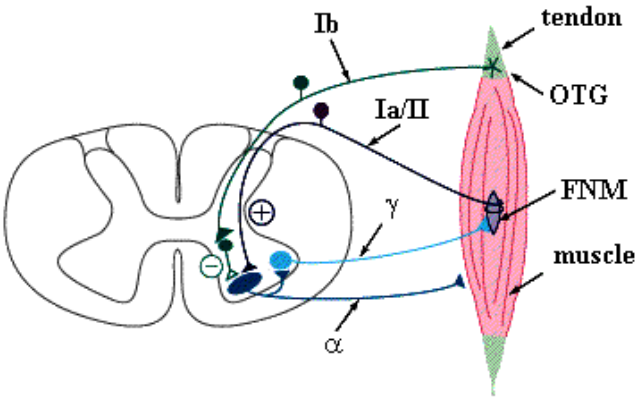


Fuseau neuro-musculaire et organe tendineux de Golgi (d'après Tortora & Grabowski, 1994).

Ces récepteurs musculaires ou mécanorécepteurs sont nombreux, variés. Les plus étudiés et donc les mieux connus sont les fuseaux neuromusculaires intervenant dans le contrôle de la position des membres. Situés dans la partie charnue du muscle, en parallèle avec les fibres musculaires, les fuseaux neuromusculaires agissent comme des capteurs de longueur situés à l'intérieur même de la masse musculaire. Sensibles à l'étirement et à la vibration, ils sont à l'origine du réflexe d'étirement (réflexe myotatique, avec le rôle de la boucle gamma, considérée comme un dispositif de servo-contrôle) qui s'oppose à l'allongement du muscle en augmentant le gain de l'activité lorsque le muscle s'allonge (information transmise par les fibres afférentes Ia). Les fuseaux neuromusculaires renseignent le système nerveux central sur la longueur du muscle. Les mécanorécepteurs comprennent également les organes tendineux de Golgi (découverts par Golgi vers 1880), situés au niveau des tendons, en série avec les fibres musculaires. Ces organes adressent par les fibres Ib une information afférente à des interneurones inhibiteurs, ce qui donne lieu au réflexe myotatique inverse. Ainsi, lorsque la tension musculaire augmente, l'organe tendineux de Golgi agit à l'inverse des fuseaux neuromusculaires afin de diminuer l'activité α. De cet équilibre entre les deux systèmes naît un contrôle réflexe de la raideur musculaire.

Il faut enfin ajouter à ces mécanorécepteurs musculaires l'action de mécanorécepteurs articulaires comme principalement les récepteurs ou corpuscules de Ruffini. Ces récepteurs

articulaires renseignent sur les mouvements articulaires, comme sur la position de l'articulation. Ils sont à la fois dynamiques et statiques (phasiques et toniques).



Circuits nerveux des fuseaux neuromusculaires et des organes tendineux de Golgi.

N) Le cervelet

De nombreuses structures sont donc impliquées dans le maintien de l'équilibre, avec un rôle central accordé au cervelet (qui pèse 150 g chez l'adulte). Celui-ci reçoit en effet des informations en provenance du cortex moteur, des propriocepteurs, de l'appareil vestibulaire et de l'œil. Il agit comme un comparateur, adressant en cas de discordance entre ce qui est initialement prévu et ce qui se passe réellement des signaux de correction au cerveau *via* le thalamus. Il intervient donc comme une boucle de rétroaction interne, modifiant le message moteur avant même le début du mouvement.

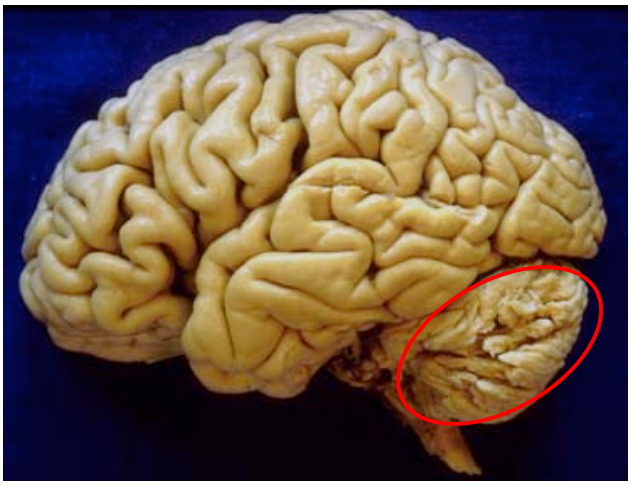
Le cervelet est une structure nerveuse située à la base postéro inférieure du cortex (en arrière du tronc cérébral). Il comprend le vermis et deux hémisphères latéraux. Il est formé de trois couches dont la couche des cellules de Purkinje à partir desquelles se distribuent les voies efférentes, les messages nerveux afférents parvenant au cervelet par les fibres grimpantes et les fibres moussues. On divise classiquement cette structure en trois zones, l'archéocervelet, le paléocervelet et le néocervelet. Chacune d'entre elles est liée à une structure cérébrale spécifique et se trouve par conséquent impliquée dans une fonction précise :

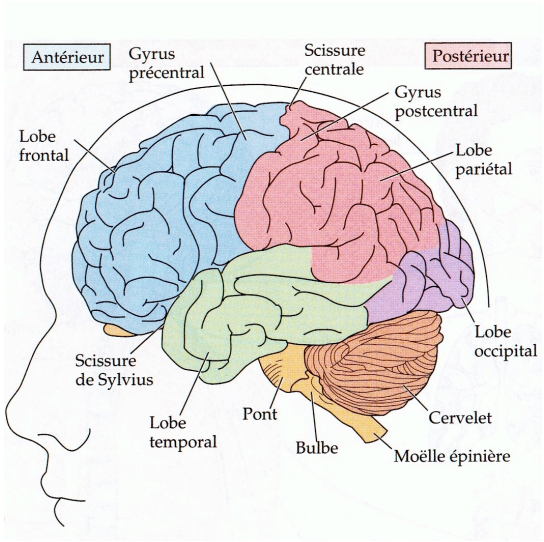
- l'archéocervelet, partie la plus ancienne, reçoit des afférences de la formation réticulée et des noyaux vestibulaires. Relié au vestibule, il est impliqué dans la régulation globale de l'équilibre en position debout par le contrôle exercé sur les mécanismes de la station érigée (équilibration, redressement).

- le paléocervelet reçoit des afférences proprioceptives provenant de la moelle épinière, mais également de nombreuses afférences somesthésiques, vestibulaires et sensorielles. Il intervient dans le contrôle et la régulation de la tonicité posturale, le contrôle de l'équilibre (lutte contre la

gravité par les voies extrapyramidales).

- le néocervelet, relié au cortex, intervient de façon prépondérant dans la coordination, le contrôle précis des mouvements volontaires. Il reçoit des informations proprioceptives, somesthésiques et sensorielles.





Patient cérébelleux avec une asynergie entraînant une altération de la cinétique normale du geste. Le sujet asynergique ne fléchit pas les genoux et tombe en arrière (d'après Babinski, 1899).

Les atteintes cérébelleuses donnent naissance à différents troubles de l'équilibre, selon leur origine anatomique. Le syndrome cérébelleux regroupe l'ensemble des atteintes de cet organe, quelles que soient leurs origines (accident vasculaire cérébral, tumeur, etc.). Celles-ci sont de différents types, comme l'ataxie, l'hypotonie, les tremblements. L'ataxie (il en existe plusieurs sortes) se caractérise par des troubles de la coordination, une désorganisation globale de la motricité. La démarche est ébrieuse, avec un polygone de sustentation élargi, des pas irréguliers, la présence d'oscillations en station debout, des vertiges. D'autres caractéristiques peuvent être notées, affectant les repères spatio-temporels, comme une mauvaise appréciation de la distance, du temps (retard dans le déclenchement du mouvement, lenteur ou décomposition dans son

exécution), de la force nécessaire à l'exécution d'un mouvement. Enfin, l'asynergie (par exemple, l'impossibilité de compenser l'incliner du tronc vers l'avant ou vers l'arrière, entraînant la chute) et l'adiadococinésie (de *a* privatif, *diadokhos* qui se succède et *kinêsis* mouvement : difficulté à enchaîner rapidement certains mouvements, à exécuter des mouvements alternatifs complexes, par exemple celui dit de la manœuvre des marionnettes) enrichissent si l'on peut dire (de façon non exhaustive) le tableau de ce syndrome.

O) Perception de la verticale et de l'horizontale

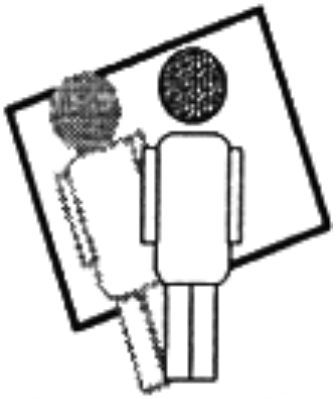
Nous sommes soumis en permanence à l'action de la pesanteur. Dans ce contexte, le sens de la verticalité peut se définir comme la capacité du sujet à s'orienter ou à orienter un élément de l'environnement par rapport à la verticale gravitaire (considérée comme la verticale objective). La représentation de la verticalité se construit au niveau du cortex pariéto-temporal à partir d'informations labyrinthiques (otolithiques), proprioceptives (somesthésiques) et visuelles. Selon certains auteurs, nous nous construirions une verticale subjective, un vecteur "idiotropique" (Mittelstaedt, 1983) ou axe longitudinal corporel prenant en compte l'estimation de la verticale gravitaire du lieu et l'orientation du corps par rapport à cette verticale.

Cette verticale subjective présente un intérêt certain dans l'exploration de la fonction otolithique. Un malade souffrant d'un déficit vestibulaire récent déviera en effet cette verticale du côté déficitaire.

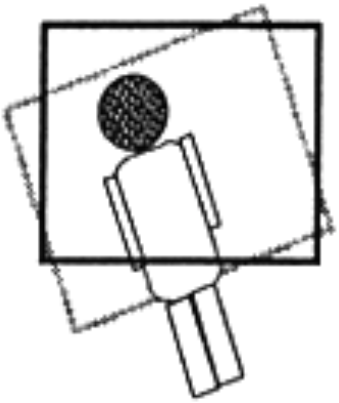
Cette perception subjective de la verticale peut être affectée à la suite d'un accident vasculaire cérébral (AVC). Les travaux de Brandt et al. (1994) montrent qu'à la suite d'un AVC, environ 1/3 des patients présente un biais dans la perception de la verticale subjective, biais contra-lésionnel (c'est-à-dire situé du côté opposé à la lésion) survenant principalement à la suite de lésions temporo-pariétales. Chez le sujet sain, il a été montré qu'une inclinaison corporelle latérale modulait la perception posturale de la verticale, avec une attirance du côté de l'inclinaison (Clark et Graybiel, 1964). Enfin, 40 % des sujets testés dans la perception visuelle (cf. infra) de la verticalité présentent une asymétrie perceptive visuelle, avec une légère prédominance pour une asymétrie gauche. Cependant, cette asymétrie ne semble pas être une caractéristique stable pour tous les individus, elle dépendrait à la fois de l'environnement visuel et de l'âge des sujets (Rousseu & Crémieux, 2003).

Différents tests permettent d'évaluer le rapport des sujets à la verticale, comme le test du cadre et du bâton (*rod and frame test*). Cette épreuve de la baguette et du cadre (Witkin, 1949)

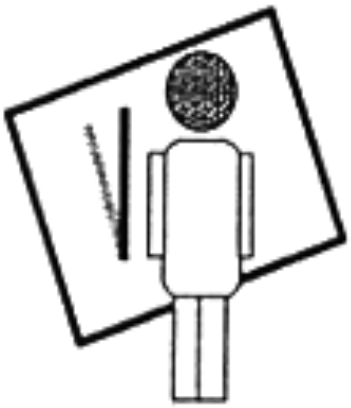
demande au sujet d'ajuster une barre à la verticale à l'intérieur d'un tunnel carré qui peut pivoter (l'angle d'inclinaison fréquemment proposé peut être de 8°, de 18° ou de 28°) par rapport à la verticale gravitaire. Les sujets dits dépendants à l'égard du champ ont tendance à être influencé par les côtés du carré et ne parviennent pas à ajuster la barre à la verticale, les plus indépendants positionnent la baguette au degré près. Cette dépendance-indépendance à l'égard du champ définit chez le sujet un style cognitif basé sur ses activités perceptives.



Body Adjustement Test : il faut redresser le corps à la verticale face à une pièce inclinée

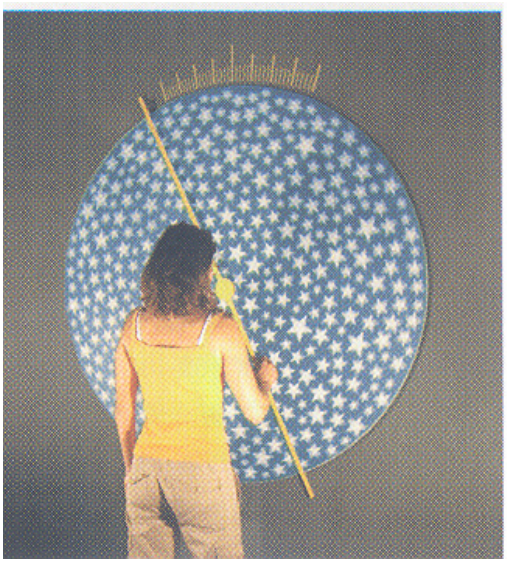


Room Adjustement Test : il faut remettre la pièce à la verticale



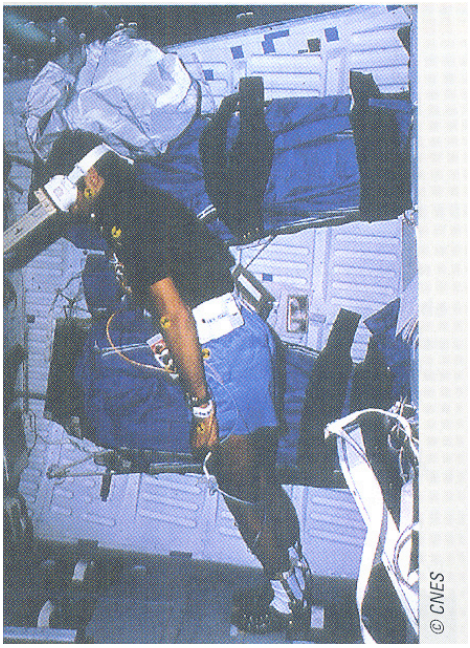
Rod Adjustement Test : il faut remettre la baguette à la verticale, le corps peut être droit ou incliné

Ces tests portant sur « des comportements spatiaux élémentaires impliquant la vision périphérique, les interactions visuo-vestibulaires et par là les comportements en rapport avec la posture » (Ohlmann et Brenet, 1990) font partie du TRTCT (Tilting Room Tilting Chair Test), illustré ci-dessus. Les éléments dont la position se modifie en cours d'épreuve sont en gris, ils sont en noir en position finale (d'après Ohlmann, 1988).



Autres dispositifs expérimentaux possibles pour l'appréciation de la verticale subjective. Il est proposé aux sujets la rotation d'un disque dans le plan frontal. Il leur faut indiquer la direction de la verticale soit à l'aide d'un petit indicateur placé au centre du disque (ici à gauche, photo Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action, Collège de France), soit à l'aide d'une baguette qu'il leur est demandé de positionner verticalement (ici à droite, photo Revue Découverte, octobre 2006, © A. Patras).

La verticale visuelle semblerait obtenir son information gravitaire exclusivement des otolithes, indépendamment non seulement des propriocepteurs des jambes (la somesthésie n'a qu'une faible influence chez le sujet normal), mais également des gravicepteurs du tronc. Il semblerait alors que l'orientation du monde visuel et de la tête par rapport à la verticale soit principalement ou même exclusivement perçue à travers les organes des sens de la tête et de la nuque. De nombreux organes fonctionnent comme des récepteurs de la gravité. Le sang des gros vaisseaux par exemple affecte la graviception à travers la force exercée le long de l'axe Z (c'est-à-dire la verticale) par sa masse (ainsi peut-être que la masse des viscères). Les reins pourraient fonctionner comme des organes gravitaires (la différence de densité entre le rein et la capsule [1.04 *vs* 0.92g.cm^{-3}], multipliée par son volume et l'accélération gravitaire, serait suffisante pour stimuler les récepteurs de pression autour de sa circonférence), mais cette idée demande à être vérifiée finement. Ainsi la posture horizontale subjective ne dépend pas seulement des otolithes, mais aussi dans une large mesure de gravicepteurs somatiques. Le centre des masses gouvernant ces derniers est situé au niveau des dernières côtes. La posture horizontale subjective est affectée par des entrées sensorielles provenant de 12 sources différentes, dans des canaux et à des endroits différents de la moelle épinière (nerf rénal par exemple). Le sens de la verticalité et celui de l'horizontalité sont étroitement liés.

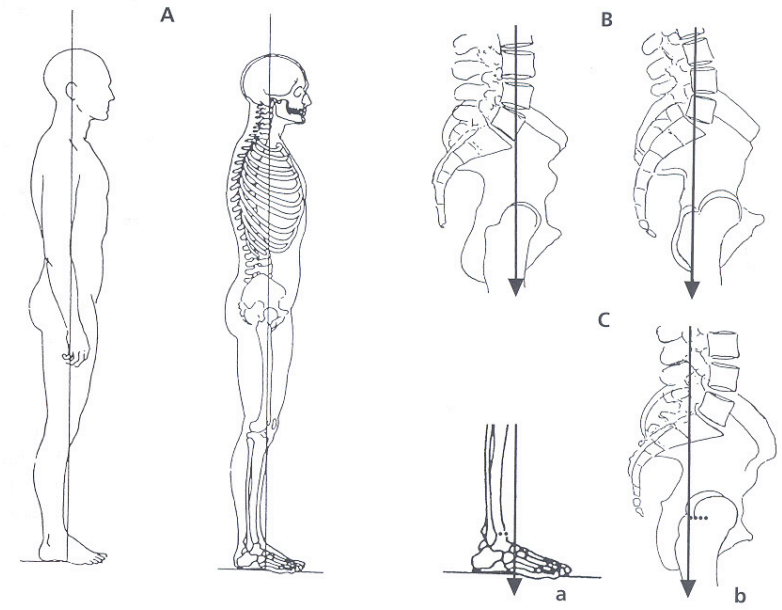


Dans l'espace, l'absence de gravité modifie la perception de sa posture par le spationaute. Lors des premiers jours dans l'espace, lorsqu'on lui demande de se tenir en station debout, il se tient en réalité penché, tout en affirmant qu'il est rigoureusement en station verticale.
Source revue Découverte, octobre 2006, © CNES.

En résumé *: la construction et le maintien de l'équilibre mettent en jeu de nombreuses structures (propriocepteurs, vestibule, vision), avec un rôle central accordé au cervelet. La représentation de la verticalité est le fruit de ces différentes informations. Il existerait selon certains auteurs une verticale subjective, traduisant le rapport du sujet à la verticale gravitaire. Le test du cadre et du bâton permet de préciser ce rapport.*

V) La posture

La posture représente l'attitude fondamentale d'une espèce (il existe des postures de références propres à chaque espèce), elle se traduit par "la stabilisation automatique du corps dans le champ des forces de gravité dans une position standard caractéristique de l'espèce" (Paillard, 1980). Elle peut se définir comme la position relative des différents segments corporels les uns par rapport aux autres et par rapport à l'environnement, chaque posture correspondant à une position d'équilibre du corps (ou bien on se trouve alors " en mauvaise posture "). On désigne traditionnellement la posture par la position globale de l'ensemble des segments corporels à un moment donné, la position de tout ou partie du corps maintenue par l'ensemble des forces musculaires qui s'exercent sur les éléments du squelette et assurent l'équilibre de l'ensemble. Elle se définit par l'orientation des segments corporels relativement à la verticale gravitaire. Il est possible de différencier différents types de posture, la postiure dite antigravitaire s'opposant à la posture directionnelle (Paillard, 1976), la posture orthostatique s'opposant elle à la posture dynamique (Gagey, 1993). La ligne de gravité de la posture debout passe légèrement en avant de l'articulation de la cheville (environ 5 cm).



Ligne de gravité de la position debout commode. Bouisset & Maton, 1996.

La posture correspond à une conformation segmentaire permettant de lutter contre les forces gravitaires. La stabilisation antigravitaire du corps résulte de l'existence de programmes précâblés dans les structures nerveuses de la moelle et du tronc cérébral (Paillard, 1976). La posture debout chez l'homme ne doit pas être considérée comme quelque chose de figé, statique, mais bien au contraire comme un ensemble dynamique de chaînons corporels liés les uns aux autres par un système musculaire actif (en d'autres termes, ce n'est pas se maintenir droit sans bouger). Le contrôle de l'équilibre correspond à un sous-ensemble du contrôle postural, en ajoutant une contrainte supplémentaire.

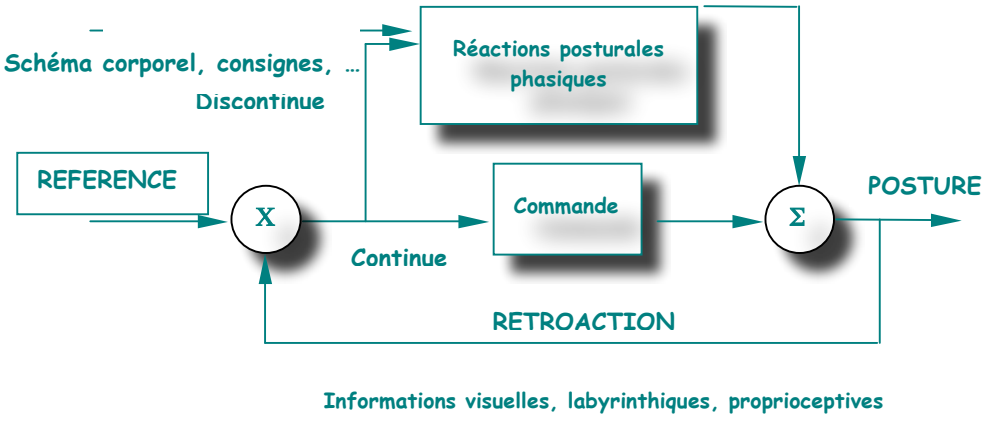
La posture debout habituelle, appelée posture " commode ", est la résultante de l'excitation stationnaire d'un certain nombre de muscles dits antigravitaires et appartenant aux plans postérieurs. Cette position de référence dépend pour son maintien d'une répartition prépondérante de l'activité tonique spécifique de ces muscles. La fonction tonique assure un certain état de mobilisation de l'appareil moteur conditionnant une disponibilité de celui-ci plus ou moins grande. Le tonus correspond à l'état de tension permanente et non volontaire des muscles au repos, résultant des propriétés passives liées aux caractéristiques visco-élastiques des fibres musculaires constituées d'éléments filamenteux (actine et myosine ayant la possibilité d'établir des ponts plus ou moins nombreux). A cet aspect passif s'ajoutent les effets de la tension active qui lient la contraction des fibres musculaires à l'action des potentiels d'action transmis par les axones des motoneurones au niveau de la jonction musculaire (couplage excitation-contraction).

Le tonus est déjà un état préparatoire au mouvement par le maintien de forces musculaires minimales constituant un pré-requis à toute activité motrice. Cela nécessite une activité musculaire faible, peu gourmande en énergie, mettant en jeu un pourcentage très limité de la force musculaire (entre 12 et 22 % selon les muscles et les sujets).

Le maintien de cette station érigée suppose également de résister aux forces de réaction provenant des surfaces d'appui, aux forces d'inerties internes et aux contraintes mécaniques et géométriques liées à l'organisation du corps. Celui-ci est supporté par les organes locomoteurs et les contraintes biomécaniques sont évidemment très différentes chez les quadrupèdes et les bipèdes. Au cours du maintien postural, le corps est l'objet d'oscillations permanentes, plus marquées dans le plan sagittal que dans le plan frontal. L'origine de ces oscillations est imputée à des phénomènes internes (circulation, respiration), à des phénomènes d'origine purement mécanique ou à une modulation de la commande moto neuronale.

Le contrôle de l'équilibre est un phénomène actif et physiologique. Le muscle soleus joue par exemple un rôle important dans le maintien de l'équilibre (le déclenchement de la marche s'effectue après le silence, c'est-à-dire l'inhibition de ce muscle).

Le contrôle et la régulation posturale permettent, par la mise en jeu des processus centraux, la coordination de l'activité musculaire afin de maintenir l'orientation du corps par rapport à la gravité. Ceci nécessite l'intégration de différentes informations sensorielles, impliquant le système somato sensoriel (incluant la proprioception musculaire, articulaire, les afférences cutanées), le système vestibulaire, la vision. Ces informations s'avèrent parfois redondantes.

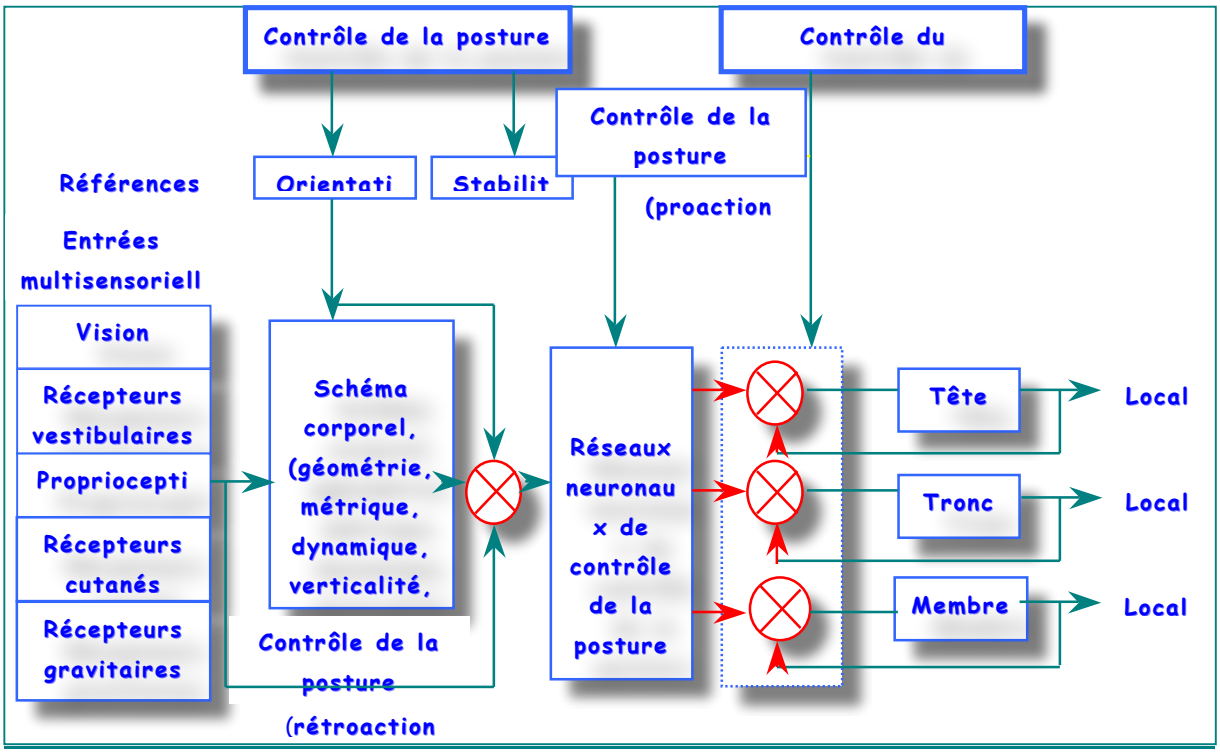


Contrôle de la posture par une boucle de rétroaction continue et discontinue (d'après Massion et Viallet (1990)

L'ensemble des récepteurs sensoriels (extéro et proprioceptifs) participe à la perception et au contrôle de la posture. D'autres éléments interviennent, comme la consigne donnée au sujet, le schéma corporel, la valeur de référence (cf. *infra*), etc.

Pour certains auteurs, le corps humain, bloc non rigide, consiste plutôt en un ensemble de modules superposés, chacun d'entre eux étant lié à l'autre par un ensemble de muscles possédant sa propre régulation centrale et périphérique servant à maintenir la position du module de référence. Pour d'autres, la posture représente la conséquence d'une interaction dynamique dans un ensemble complexe de mécanismes, organisée autour du contrôle de buts fonctionnels comme l'orientation du tronc et de la tête par rapport à des cadres de référence variés.

Le système de contrôle de la posture possède deux fonctions principales : lutter contre la gravité et assurer le maintien de l'équilibre. Il faut ensuite fixer l'orientation et la position des segments qui servent de référence pour la perception et l'action par rapport au monde extérieur. Le contrôle postural se caractérise par sa flexibilité (substitution sensorielle rendue possible par la multimodalité sensorielle) et sa capacité d'adaptation à différents contextes. Cette flexibilité est sous le contrôle de la représentation interne du corps, elle se reflète dans l'intégration multisensorielle mise en jeu dans l'orientation posturale et la stabilisation.



Modélisation des contrôles de la posture et du mouvement. D'après Massion, 1992

A) Notion de valeur de référence

Les schémas de programmation motrice centrale font apparaître la notion de valeur de référence (voir le début du cours portant sur les systèmes fonctionnant en boucle fermée) permettant la régulation de la posture et le contrôle de l'équilibre autour de cette valeur stable. Cette valeur peut être prise sur le sujet lui-même (égocentrée) ou dans son environnement (exo ou allocentrée). La prise en compte d'une valeur de référence s'inscrit dans un processus central d'équilibration mettant en jeu de multiples commandes parallèles et intervenant parfois comme un dispositif de sauvegarde ou de sécurité. Lors de la production d'une action complexe, on peut se poser la question de savoir ce qui est réellement contrôlé par le sujet. Celui-ci doit tout à la fois préserver son équilibre par le contrôle de cette valeur de référence (ce peut être un segment corporel donné, le centre de gravité, la direction du regard résultant de la coordination entre les positions de la tête et de l'œil et permettant au sujet de conserver la stabilité du monde visuel face aux perturbations externes et internes) et par le déplacement de tout ou partie du corps sur une trajectoire donnée. Ces réactions de préservation et de compensation s'expriment par des mouvements anticipateurs ou correcteurs mettant en jeu la position relative des différents segments corporels ou du corps lui-même.

B) Les ajustements posturaux

Les mouvements qui accompagnent le déplacement volontaire d'un segment corporel mettent en oeuvre des ajustements posturaux dont le but est la création de ce que Bouisset (1981) appelle la capacité posturo-cinétique, supposée dépendre de l'état actuel du système sensori-moteur. En fonction de leur date d'apparition par rapport au mouvement volontaire focal perturbateur (par exemple adresser une passe ou réceptionner une balle), ces ajustements posturaux sont dits anticipateurs (anticipés) ou réactionnels. Le cervelet joue un rôle essentiel dans leur acquisition. Leur rôle est prépondérant dans la coordination entre les activités volontaires et les activités posturales. Les ajustements posturaux anticipés, préparatoires au mouvement en quelque sorte et prenant en compte les conséquences de l'action, permettent ainsi notamment de minimiser et/ou de compenser les déséquilibres posturaux produits par le mouvement.

Les premiers travaux mettant en évidence l'existence d'ajustements posturaux chez un sujet en station érigée sont dus à Belenk'ii et al. (1967). Ces auteurs ont analysé les phénomènes posturaux associés à l'élévation volontaire du bras. Ils ont enregistré l'activité électrique de différents muscles et montré l'activation anticipée de muscles des membres inférieurs et du

tronc ayant pour but de maintenir l'équilibre du sujet avec une dépense d'énergie minimale, ces ajustements se modifiant en fonction de la situation. D'autres auteurs depuis (Bouisset et Zattara, 1981 ; Zattara et Bouisset, 1986) ont enrichi ces travaux en ajoutant à l'utilisation de la plate-forme de forces et de l'électromyographie les données de l'accélérométrie. Leurs travaux concluent notamment à la spécificité des ajustements posturaux anticipés en fonction du mouvement, à leur programmation centrale et à leur intégration dans le programme moteur.

Différents éléments interviennent dans l'organisation des ajustements posturaux, comme la valeur de référence à stabiliser, les capteurs détecteurs d'erreur, la représentation interne du corps en termes de géométrie et de dynamique. Par l'apprentissage et l'adaptation, le système nerveux central anticipe les effets mécaniques d'un mouvement volontaire afin de réduire les effets de la perturbation. La réponse posturale est toujours appropriée au mouvement exécuté, notamment bien sûr chez le sujet habile/expert. Ces ajustements appartiennent au programme moteur. On le voit dans la mise en jeu des muscles des jambes avant l'élévation rapide du bras par exemple. Les aspects postural (ou global) et focal (ou local) sont tous deux intégrés à la planification du mouvement. Dans la perspective d'une posture considérée non pas comme un état statique, mais comme une interaction dynamique entre contexte et tâche spécifique, les ajustements posturaux ne sont pas la somme de simples réflexes, mais le fruit d'un système complexe de contrôles sensori-moteurs. Une stratégie posturale constitue donc un plan formulé par le système nerveux central à haut niveau.

C) Notion de représentation

Le système nerveux a pour fonction d'organiser la séquence motrice dans l'espace et dans le temps afin que le mouvement atteigne son objectif. Cette organisation implique :

- un système de références (coordonnées spatiales) permettant une représentation interne de l'espace extracorporel dans lequel l'individu se repère pour localiser la cible du mouvement ou pour effectuer la prise d'un objet, un déplacement vers un but précis.

- une représentation du mouvement en termes de trajectoires à réaliser. Pour l'extrémité du membre (le plus souvent la main qui va atteindre la cible), ceci suppose la définition (le codage, le paramétrage, c'est-à-dire l'attribution d'une certaine valeur) de déplacements, directions, angles pour chaque articulation engagée dans le mouvement (par exemple, épaule, coude, poignet, doigts, etc.)

- la transformation effectuée par le système nerveux central des coordonnées externes en coordonnées internes. Le passage d'un mode de représentation à l'autre permet le "codage

cinétique" des couples de forces appliqués aux articulations par la mise en jeu des muscles. La correction en cours d'exécution des mouvements nécessite de faire des comparaisons entre les ordres moteurs et les informations sensorielles qui rendent compte du déroulement réel de l'exécution (fonctionnement en boucle fermée)

- des fonctions de coordination entre tous les muscles mis en jeu : agonistes et antagonistes au niveau d'une même articulation, synergistes agissant sur des articulations différentes, tous ont une activité caractérisée par une alternance de phases de contractions et de relaxations (ou d'excitations et d'inhibitions) qui doivent être parfaitement définies dans le temps.

Nous avons déjà évoqué la nécessité d'une représentation qui organiserait les interactions entre les différentes informations, fonctionnant comme un intégrateur (au niveau des informations sensorielles par exemple). Les interactions perception/action permettent à un individu de se construire une représentation cohérente de l'environnement. La construction de cette cohérence pose un problème difficile qui pourrait constituer une explication aux problèmes rencontrés parfois dans le monde du sport, au niveau de la maîtrise ou de la perte momentanée de certaines habiletés (on évoque ainsi parfois la perte de figure dans des activités acrobatiques comme le trampoline). Un judoka peut ainsi momentanément, au cours du processus de perfectionnement d'une habileté particulière, perdre son « spécial » (pour le retrouver plus tard généralement beaucoup plus fort).

D) Notion de référentiel

La coopération entre les différents systèmes sensoriels nécessite de la part du système l'existence et l'utilisation de ces référentiels ou cadres de références, permettant la perception et le contrôle du mouvement. Les données de la littérature permettent de distinguer différents référentiels en fonction du but et du contexte de la tâche. Ces référentiels sont généralement de nature égocentrée (*i.e.* centré sur l'individu lui-même), exo (ou allo) centrée (favorisant l'évaluation des déplacements du corps par rapport à l'espace) et/ou géocentrée (basé sur la verticale gravitaire et les forces de réaction de la surface de support, proposant un cadre de référence aux actions orientées dans l'espace et permettant notamment, comme nous l'avons déjà évoqué, la construction par le sujet d'une verticale subjective). La puissance de cette notion de référentiel est de permettre une manipulation mentale des relations entre les objets sans avoir à les référer en permanence au corps propre. La représentation mentale de l'espace devient indépendante de l'endroit où l'on se situe (on peut se représenter un espace sans se trouver physiquement dans cet espace), elle devient manipulable par certaines opérations. Une

autre caractéristique des références utilisées par le cerveau en plus de leur multiplicité est leur flexibilité lui permettant, en fonction de l'action, de jouer sur un répertoire de référentiels possibles.

d_1) repères d'espace et de temps

Mathématiquement, la notion de mouvement est inséparable de la notion de référentiel (repère d'espace et de temps). La description d'un mouvement dans un référentiel d'espace donné est l'étude de la position du mobile dans ce repère en fonction du temps. On suppose pour le repérage du temps l'existence d'une horloge de référence dont dispose l'observateur. Un repère de temps est constitué par la donnée d'un point correspondant à un événement particulier et d'une unité des durées qui est un vecteur de base dans un espace vectoriel des durées. La même démarche s'applique pour le repère d'espace. Celui-ci est constitué par la donnée d'un point de l'espace (E) appelé origine (0) du repère, et d'un ensemble de trois vecteurs de l'espace vectoriel associé linéairement indépendants (i ,j, k) formant une base de (E). L'association d'un repère d'espace et d'un repère de temps définit un référentiel dans lequel chaque événement est caractérisé par ses coordonnées dans les trois dimensions de l'espace plus le temps.

d_2) illustration de la notion de référentiel

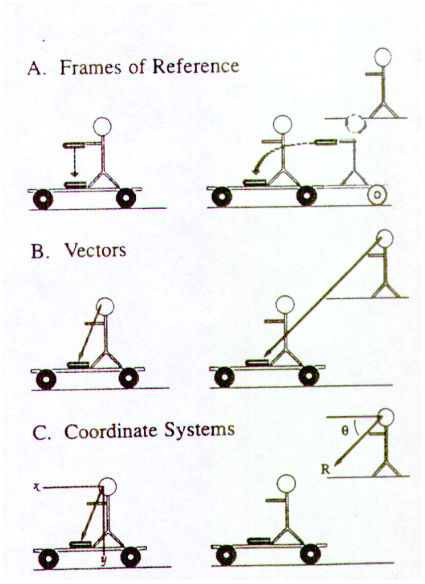
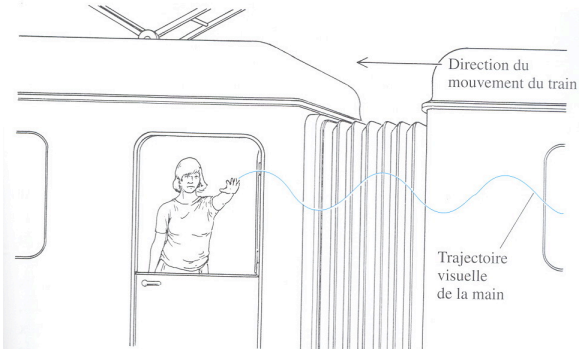


Illustration schématique des représentations d'objets dans des référentiels : (A) définis par rapport au passager en déplacement (à gauche) et à l'observateur fixe (à droite), vectoriellement (B), i.e. dont la localisation est définie par une origine, une direction et une amplitude, et (C) par un système de coordonnées polaires (R, θ) d'après Soechting & Flanders, 1992.

Si l'on veut comprendre la production d'une posture particulière ou d'un geste donné dans l'espace, il est nécessaire de déterminer les commandes motrices à l'origine de ce mouvement, que celui-ci ait pour but l'atteinte d'une cible ou la production d'une forme particulière. Toute coordination multi segmentaire nécessite, lorsque les mouvements possèdent un but spatialement orienté, un ou plusieurs référentiels soit dans le monde physique, soit dans les capteurs eux-mêmes, soit dans le système effecteur (Berthoz, 1991). Le concept de référentiel est lié à celui

d'espace. Ces référentiels sont construits de façon interne par le cerveau pour effectuer des calculs dans l'espace. Nous avons vu qu'ils étaient flexibles (le sujet peut changer de référentiel selon les phases du mouvement) et dépendants du mouvement.

La notion de référentiel est centrale à toute description mettant en jeu l'espace. Elle s'illustre par l'expression familière "cela dépend de quel point de vue on se place", concernant la prise en compte d'une question donnée ou l'approche d'un événement particulier. La figure ci-dessus, illustrant le principe galiléen de la relativité du mouvement, permet de mieux appréhender cette notion : le passager du train est en déplacement par rapport au référentiel terrestre, mais immobile par rapport au référentiel du train. Si le passager laisse tomber son livre, la chute de celui-ci sera verticale par rapport au référentiel du train alors que l'observateur, lié au référentiel terrestre verra cet objet suivre une trajectoire courbe. Ainsi donc, la description de l'événement dépend du référentiel dans lequel il est décrit.



La trajectoire visuelle de la main d'une personne qui fait un signe au revoir, tandis que le train quitte la gare, ressemble à une sinusoïde, mais on voit la main bouger de haut en bas. Source : Irving Rock.

d_3) différents systèmes de coordonnées

Un système de coordonnées est un ensemble de nombres réels caractérisant la position d'un point particulier dans un repère d'espace donné. Les systèmes de coordonnées les plus utilisés sont les coordonnées cartésiennes (où les valeurs d'un vecteur correspondent aux projections orthogonales de ce vecteur sur les trois axes d'un repère dans une base orthonormée), polaires (où les valeurs du vecteur sont données par la norme de ce vecteur et l'angle qu'il forme avec l'axe des abscisses par exemple).

D'autres systèmes de coordonnées sont possibles (cylindrique, sphérique), prenant en compte chacun selon ses caractéristiques des paramètres tels que la distance radiale, l'azimut, l'élévation. Si chacun de ces différents systèmes mène aux mêmes conclusions, le choix entre eux peut relever par exemple du plus faible nombre de termes polynomiaux nécessaires aux calculs, c'est-à-dire en définitive de la moindre complexité de ces calculs.

En résumé *: la construction, le maintien de la posture, la production d'un mouvement donné nécessitent la mise en jeu de processus de représentation, la prise en compte de nombreuses données comme la valeur de référence, différents référentiels, différents systèmes de cordonnées.*

E) Comprendre les moyens de contrôle mis en œuvre par le sujet.

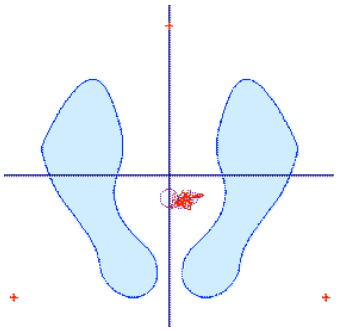
La posturographie, utilisée dans des conditions statiques, permet d'analyser, de mesurer, de comprendre les moyens de contrôle mis en œuvre par le sujet. "Dans des conditions statiques, elle vise à apprécier la qualité du système de régulation posturale d'un sujet en position orthostatique. Cette analyse se fait à l'aide d'une plate-forme de forces constituée d'un plateau indéformable qui repose sur trois capteurs rigides. Le patient reçoit alors la consigne de rester debout sur la plate forme, le plus immobile possible, dans deux conditions expérimentales : "yeux ouverts" et "yeux fermés". Pour la plate-forme de marque Satel®, chaque séquence dure 51,2 secondes. Le polygone de sustentation ne se déformant pas et ne se déplaçant pas, ces conditions sont assimilées à des conditions d'équilibration statiques. En combinant les informations fournies par les trois capteurs, un ordinateur est capable, à tout moment, de donner la position du centre de pression des pieds du sujet." (source Société Satel®).

En effectuant le relevé successif de cette position plusieurs fois par seconde, l'ordinateur trace à l'écran, en temps réel, le chemin parcouru par cette projection : une petite pelote de fil que l'on appelle le statokinésigramme. Ce tracé va permettre le calcul automatisé d'un certain nombre de paramètres qui, comparés à des valeurs normalisées, rendent compte de l'aptitude du sujet à maintenir son équilibre orthostatique. L'examen de posturologie est intéressant et utile à plus d'un titre. Il permet de mettre en évidence, de quantifier les dysfonctionnements de certains processus (équilibration, sensibilité particulière à certains facteurs distracteurs dans la conservation de cet équilibre), dans la définition du profil d'un sujet (son organisation posturale singulière). Il joue un rôle également dans le traitement rééducatif "pour objectiver la nature des corrections posturales à engager et vérifier leur efficacité à court et moyen terme" (source Société Satel®).

Différentes mesures sont ainsi effectuées, comme le montrent les figures situées ci-dessus : la surface de l'ellipse de confiance tracée à partir des positions successives du centre des pressions, la longueur du déplacement, le rapport de la longueur à la surface qui "reflète la quantité d'énergie dépensée par un individu pour contrôler son équilibre orthostatique", etc. Les

variations des valeurs observées en X peuvent signer "une asymétrie du tonus postural qui peut engendrer un syndrome de déficience posturale", les variations des valeurs observées en Y "indiquent la valeur moyenne des mouvements d'équilibration avant/arrière, variables avec l'âge.

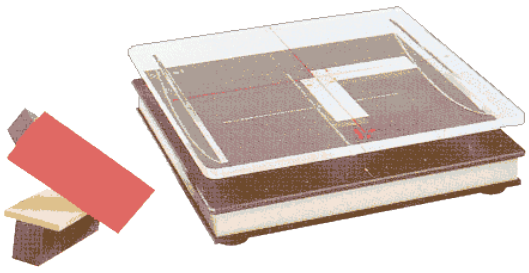
Plate-forme statique (Société Satel®)



Le statokinésigramme (Société Satel®) inscrit les positions successives échantillonnées du centre de pression par rapport à un référentiel dont l'origine est située au barycentre du polygone de sustentation. Seules ces positions du centre de pression sont situées avec précision sur la figure.

Statokinésigramme (Société Satel®) : à partir de 90 % des positions successives du centre de pression podale relevées au cours de l'acquisition, une mesure statistique de la surface de l'ellipse de confiance est réalisée, exprimée en mm^2. Les 10 % des points les plus extrêmes, résultant de mouvements mal contrôlés (hypothèse), sont éliminés.

Utilisée dans des conditions dynamiques (*i.e.* sur une plate-forme mobile), la posturographie permet d'analyser les stratégies d'équilibration dynamiques mises en oeuvre par le sujet.



Stabilomètre (Société Satel®) plan cylindrique. C'est une plate-forme constituée d'un plateau (48 cm x 48 cm) sous lequel sont fixés deux arceaux au rayon de courbure de 55 cm et dont la flèche mesure 6 cm.

Le stabilomètre Satel® ne possède qu'un seul degré de liberté (soit antéro-postérieur, soit latéral). La consigne délivrée au sujet est de maintenir le plateau de la plate-forme aussi horizontal que possible. Les variations d'inclinaisons que le sujet impose au stabilomètre afin de

maintenir son équilibre sont transmises à un ordinateur qui calcule et enregistre les différentes positions angulaires de ce stabilomètre par rapport à l'horizontale.

L'acquisition de ces différentes positions est effectuée à la fréquence de 40 Hz. Là encore, différentes mesures sont effectuées, permettant de quantifier l'aptitude du sujet à s'équilibrer dans des conditions dynamiques. Ce sont par exemple la longueur du parcours d'équilibration (somme des déplacements du pivot de la plate-forme pendant les 26 secondes de la mesure, exprimée en mm), l'amplitude maximale des oscillations du stabilomètre, exprimée en degrés, la position moyenne de la plate-forme autour de laquelle le sujet s'est équilibré (source Société Satel®).

F) Un modèle interne, le schéma corporel

La régulation de la position et de l'orientation du corps nécessite de la part des centres supérieurs l'élaboration d'une représentation interne. Les données de la littérature s'accordent pour définir celle-ci comme un modèle interne de configuration du corps et de son orientation dans l'espace, un schéma corporel (notion proposée pour la première fois en 1911 par les physiologistes Head et Holmes et permettant en quelque sorte au sujet d'apprécier, de mesurer les modifications de sa posture, mais terme créé en 1923 par le neuropsychiatre autrichien Schilder) impliquant classiquement une connaissance (inconsciente pour certains – Head, Merleau-Ponty, plus ou moins consciente pour d'autres, comme Schilder) de la configuration du corps (Berthoz, 2003, rappelle que le schéma corporel, ce double du corps existant dans le cerveau, n'est pas seulement une simulation interne de muscles ou de parties du corps, mais réellement un corps situé dans l'espace). Pour Head (1926, cité par Gallagher, 1986), le schéma corporel est un modèle postural du corps qui modifie activement "les impressions produites par les entrées sensorielles de telle façon que la sensation finale de position, ou de localisation, émerge à la conscience en relation avec quelque chose ayant déjà existé auparavant". Cependant, en dépit de l'expression "émerge à la conscience", Head pense que le schéma postural n'est pas conscient. Enfin, pour Fisher (1972, *in* Gallagher, 1986), le schéma corporel représente la façon avec laquelle une personne a appris à organiser et à intégrer son expérience corporelle.

Pour certains auteurs, cette connaissance inconsciente dépendrait d'un réseau important de neurones mettant en jeu les cortex sensoriels et associatifs.

Pour Merleau Ponty (1945), le schéma corporel n'est pas le résultat de l'association de signaux kinesthésiques, mais plutôt une trame dans laquelle ces signaux sont synthétisés sur la

base d'une représentation interne. Le schéma corporel propose une synthèse entre des perceptions variées provenant des différentes parties du corps, créant au niveau du cortex cérébral un modèle postural modifiant activement les impressions issues des différentes informations sensorielles. Le schéma corporel, non conscient (ou, comme le précise cet auteur, présent dans une conscience marginale), est le fruit d'une expérience et de la dynamique d'un corps agissant au sein d'un environnement donné.

Cette représentation interne du corps n'est pas innée. Elle se construit progressivement au cours du développement et serait élaborée à partir de la prise en compte par le sujet de sa représentation de la verticalité basée sur l'intégration des informations sensorielles multiples (labyrinthiques, proprioceptives et visuelles), sur la perception du grand axe du corps, sur la géométrie, la métrique (perception de la position des différents segments corporels les uns par rapport aux autres, des amplitudes relatives de leur orientation, des relations entre ces segments), la dynamique (masses et inerties segmentaires, forces d'appui au sol).

Le traitement continu des informations proprioceptives relatives à la cinématique des segments corporels et aux tensions musculaires fournit une contribution essentielle à l'entretien du schéma corporel, représentation du corps constituant un système de référence pour la perception et l'action. Chaque message sensoriel peut être localisé dans cette représentation et chaque programme moteur peut être élaboré dans le cadre de ce référentiel remis à jour en permanence. Ce schéma corporel peut se définir comme une action opératoire se construisant sur la base des expériences motrices actives et déterminant les relations qu'entretient le corps avec l'espace et, plus largement, le sujet avec le monde. C'est pour Merleau Ponty un fonctionnement expérientiel et dynamique du corps dans son environnement. L'action du sujet apparaît comme le facteur d'intégration des différents espaces et des réponses de l'environnement, favorisant la construction d'une représentation stable de l'espace dans lequel évolue le sujet. Comme le précise Darlot, c'est "par l'apprentissage sensori-moteur que se construit dans le système nerveux central ce modèle interne du corps, cohérent parce qu'il reproduit les relations géométriques et physiques entre les parties du corps. Pour chaque segment corporel sont calculées son orientation par rapport aux segment adjacents et son orientation par rapport à la gravité."

L'organisation du schéma corporel se traduit par des activités spatialement orientées, qu'elles soient de positionnement ou de transport. Pour certains auteurs, cette représentation

serait pour partie déterminée génétiquement, largement pré câblée, pour partie acquise par apprentissage, avec une prise en compte par les centres supérieurs des afférences et réafférences sensorielles. C'est cette représentation interne qui permettrait la flexibilité du contrôle postural et finalement, pour une tâche définie et à l'intérieur d'un contexte donné, créerait pour le mouvement les possibilités d'atteindre son but de façon coordonnée. C'est elle également qui permettrait la simulation du mouvement et sa répétition sans exécution.

Enfin, il est possible d'ouvrir, d'élargir ou d'enrichir cette notion de schéma corporel en lui intégrant une possibilité d'extension par l'outil, un outil qui prolongerait le corps en quelque sorte. "Lorsque … nous bricolons … lorsque nous écrivons avec un stylo ou un crayon … ", nous dit Berthoz (2003), 'l'outil prolonge le corps. Nous sentons l'objet non pas au bout de l'outil mais au bout d'un ensemble constitué par la main et l'outil comme si, soudain, l'outil était devenu une partie de notre corps, comme si la main s'était prolongée … et s'était assimilée au corps propre".

G) La régulation posturale

g_1) Stabilisation de la tête

Ce sont les travaux princeps de Marey (1893) sur la chute du chat qui permettent de souligner le rôle déterminant de la stabilisation du segment céphalique dans le contrôle de l'équilibre. Les bandes chronophotagraphiques, montrant des images prises à raison de soixante poses par seconde, décrivent le redressement du chat lâché à une certaine distance du sol en position dorsale.

La réaction de l'animal se déroule en plusieurs phases, en une succession de séquences ordonnées. Une première phase de retournement montre une amorce de la rotation de la tête rétablissant en premier sa position horizontale correcte. Les pattes antérieures, suivant avec un certain délai temporel, initient une deuxième phase de redressement de la courbure vertébrale favorisant le retournement du corps. Puis une troisième et dernière phase de préparation à l'atterrissage met en jeu le train postérieur. Finalement, chacun des points du corps de l'animal décrit une rotation de 180° autour d'un axe longitudinal. Le même processus se déroule lorsque la tête du chat est encapuchonnée (donc sans possibilité de se repérer par rapport à l'espace environnant).

Cette réaction prend normalement son origine dans la stimulation des récepteurs labyrinthiques. Elle cesse après section des deux labyrinthes, le chat tombant alors sur le dos. Par contre, l'animal labyrinthectomisé (ne disposant donc plus d'informations de son oreille

interne) peut par la seule utilisation de la vision réaliser le positionnement correct de sa tête dans l'espace et retomber ainsi sur ses pattes.

Phase 1

Phase 4

Phase 2

Phase 5

Phase 3

Phase 6

Redressement du chat qui tombe d'après les images chronophotographiques de Marey, 1894 (in Paillard, 1976)

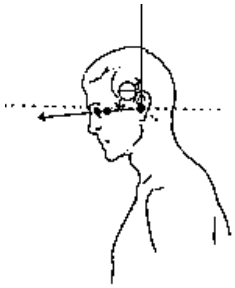
Cette photo de J.H. Lartigue (1905) laisse apparaître une très belle attitude de cette jeune femme, avec une tête stabilisée et un ancrage du regard positionné vers le lieu de réception ou d'atterrissage, favorisant le contrôle de l'équilibre dans cette phase très aérienne.

g_2) Une conception descendante

Les premières études expérimentales sur les mécanismes physiologiques de la régulation posturale ont été menées par Sherrington (1904) sur des animaux décérébrés. Il y développait alors une conception réactionnelle de la posture s'opposant à la gravité afin notamment de préserver l'équilibre du corps. Diverses expérimentations ont abordé l'étude des régulations posturales sous cet aspect, accordant le primat de la régulation posturale à un schéma de type réflexe (monosynaptique), probablement parce que l'étude de la posture s'était focalisée sur une approche réflexologique des réactions aux perturbations et non sur une perspective d'intégration de la posture et du mouvement.

Par rapport à ce point de vue, d'autres expériences menées dans les années mil neuf cent soixante dix (*e.g.* Vidal et al., 1978) ont permis de rompre avec cette école de pensée alors majoritaire. En reconnaissant à la vision un rôle précoce (entre 100 et 150 ms après le début de la perturbation) et déterminant dans la régulation posturale, ces travaux ont permis d'envisager la posture autrement que comme un processus de nature essentiellement réflexe, favorisant par la suite le développement d'une conception descendante (*top-down*), en référence à une lecture traditionnelle ascendante (*bottom-up*) de la posture considérant les pieds comme référentiel et privilégiant la prise en compte des réactions observées au niveau des membres inférieurs. Cette théorie descendante suggère que l'estimation otholithique est essentielle dans la définition du plan de stabilisation de la tête qui amène les canaux semi-circulaires à se trouver perpendiculaires par rapport à la gravité. La tête est alors utilisée comme une centrale inertielle stabilisée en rotation, permettant, par la mise en correspondance des informations visuelles et vestibulaires, un meilleur contrôle postural.

g_3) Plan de Francfort



Plan de Francfort (d'après Pozzo, 1990)

Choisi conventionnellement lors d'une réunion d'anatomistes à Francfort en mil huit cent quatre vingt deux, ce plan joint le bord inféro externe de la cavité orbitaire au bord supéro externe du méat auditif. Selon les études et les auteurs, il observe une inclinaison variant entre

25 et 35° sous l'horizontale, se situant approximativement dans le plan du canal semi circulaire latéral (horizontal).

Toute une série d'expériences a montré une stabilisation de la rotation de la tête dans le plan sagittal (*i.e.* de ce plan) au cours de différentes activités. L'idée mise en jeu au cours de ces expérimentations est que le couplage visuel avec l'environnement représente une solution intéressante pour l'organisme dans l'élaboration d'un cadre de référence stable à partir duquel le contrôle de la posture est organisé. La stabilisation du segment céphalique lors de l'exécution du mouvement pourrait jouer un rôle déterminant dans ce couplage visuel. Par ailleurs, l'orientation fixe de la tête par rapport à la verticale gravitaire permet au système vestibulaire de jouer son rôle de référentiel spatial.

Mouvements de la tête et du corps dans le plan sagittal au cours de diverses conduites locomotrices (d'après Berthoz et Pozzo, 1988, sur des travaux originaux de Muybridge).

Les figures ci-dessus (Berthoz et Pozzo, 1988) montrent le tracé du plan de Francfort sur des chronophotographies réalisées par le photographe américain Muybridge, contemporain de Marey. Superposant les différentes prises de vue à partir du segment céphalique pris comme élément fixe, ils ont montré une remarquable stabilité de la tête dans le plan sagittal lors de l'exécution de différentes tâches locomotrices.

Saut et succession de sauts (Marey, 1886). On pourrait s'amuser également à repérer la stabilisation de la tête dans le plan sagittal au cours de ces différents sauts

En résumé *: Berthoz & Pozzo ont proposé dans les années 70-80 une approche descendante (top-down) du contrôle de la posture. Cette approche accorde un rôle déterminant à la stabilité de la tête dans l'espace, objectivée par l'angle du plan de Francfort par rapport à la verticale gravitaire.*

g_4) Ancrage positionnel du regard

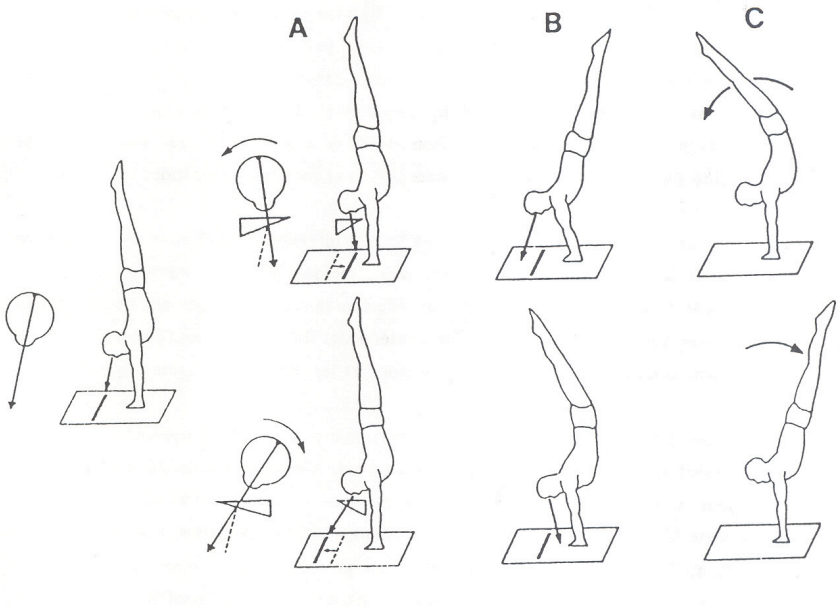
La notion d'ancrage positionnel (directionnel) du regard est due à Paillard (1971). Ce processus régulateur met en jeu deux circuits fonctionnant en parallèle, un premier circuit nourri par des signaux d'origine vestibulaire assurant une stabilisation approximative (Paillard, 1982) de la direction du regard, et un second circuit mettant en jeu le réflexe optocinétique (glissement de l'image sur la rétine) permettant une stabilisation précise de la fovéa (vision centrale) sur la cible. Les expérimentations menées sur le rôle de la direction du regard pendant l'appui tendu renversé (Pozzo et Clément, 1988) montrent que le fait pour le sujet de positionner au sol un repère correspondant à la direction du regard (spontanément adoptée par les sujets lors des pré-expérimentations) et de demander aux sujets d'ancrer leur regard sur cette marque augmente (cf. figure *infra*) de façon tout à fait sensible la stabilité de la posture, quel que soit le niveau de performance des sujets (les travaux de Clément & Rézette, 1985, ont montré que la dorsiflexion de la tête assurait la meilleure stabilité). La stabilité de l'appui tendu renversé se trouve accrue lors de la projection de la verticale du centre de gravité (ou centre de masse) en avant de la verticale du point d'équilibre (matérialisé par les appuis au sol du sujet). Rappel de l'expérience.

Positionnement du regard du gymnaste sur un repère (d'après Pozzo, 1990)

Les résultats de ces études soulignent selon les auteurs l'importance d'un ancrage du regard dans le contrôle d'une posture nécessitant le réglage fin d'un équilibre qualifié de luxe par Thomas (1940). Les auteurs supposent que cet ancrage, créant ou s'appuyant sur un repère

solidaire de l'environnement, joue un rôle dans la détection et l'évaluation de l'amplitude des oscillations du corps, fonctionnant finalement comme un réducteur d'écart par rapport à une position assurant le contrôle de l'équilibre. Ils soulignent également le fait qu'un segment (ici les membres supérieurs) qui ne possède habituellement pas de fonction antigravitaire peut l'acquérir et affiner ensuite cette fonction par l'apprentissage et l'entraînement.

Ces données ont été largement confirmées par une série d'expérimentations menées par ces mêmes auteurs sur le même protocole, mais en employant des lunettes entraînant une déviation visuelle prismatique chez les sujets (figure ci-dessous).

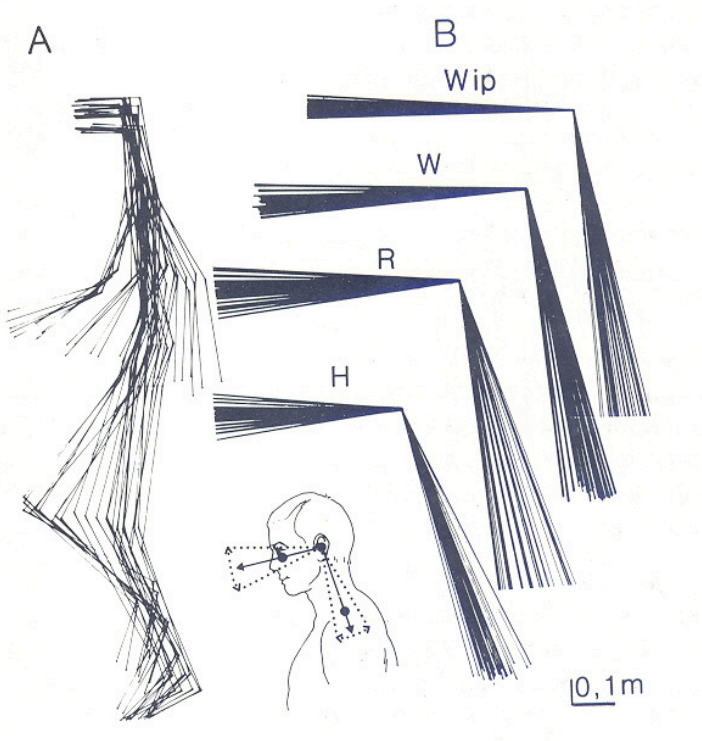


Effets perceptifs et posturaux en vision prismatique. Illustration de la déviation visuelle prismatique (A), de la position perçue du corps (B) et des réajustements posturaux consécutifs (C) induits par les prismes à bases supérieures (en haut) et à bases inférieures (en bas). Pozzo, 1990.

La performance des sujets était mesurée dans trois conditions différentes : fixation du regard sur leur marque visuelle (condition normale N), fixation sur une marque placée à 5cm en avant ou en arrière de leur marque de référence (causant un mouvement volontaire de l'œil vers le haut ou vers le bas), fixation de leur marque de référence avec des lunettes prismatiques (10 dioptries) soit à base inférieure (induisant un déplacement involontaire vers le haut) soit à base supérieure (induisant un déplacement involontaire vers le haut). Chaque condition est séparée de la suivante par une condition normale afin de réadapter la vision après l'utilisation des prismes. Les résultats montrent qu'en vision prismatique, la fixation de la marque induit une rotation de l'œil involontaire dont les sujets n'ont pas conscience. La position moyenne des oscillations du corps est déplacée dans la direction oppose au mouvement de l'œil et les sujets montrent une instabilité accrue.

Dans le cadre de ces hypothèses d'un contrôle de l'équilibre et de la posture par une stabilisation du segment céphalique, ces auteurs ont mené par ailleurs diverses expérimentations (1990) sur la stabilisation de la tête au cours du mouvement. Dix sujets ont été testés au cours de 4 tâches locomotrices : la marche normale (sur 6m), la marche sur place, la course sur place, le saut à cloche-pied (ces trois dernières conditions étant exécutées pendant 5 secondes, chacune à une fréquence de pas choisie par le sujet). Les différentes tâches ont été réalisées en lumière normale et dans l'obscurité.

Les conclusions de ces travaux soulignent la capacité des sujets à stabiliser partiellement leur tête (ceci se traduisant par une réduction importante de la rotation dans le plan sagittal) au cours de l'exécution de ces tâches locomotrices, cette stabilisation simplifiant la correspondance entre les informations visuelles et vestibulaires et fournissant au système nerveux vestibulaire une référence gravitaire stable. Les déplacements angulaires de la tête restent faibles comparés à l'amplitude des mouvements des autres segments. Le plan de Francfort est maintenu dans une position proche de l'horizontale. La stabilisation de la tête en rotation dans le plan sagittal n'est pas affectée de façon significative par l'obscurité. Selon certains auteurs, la capacité pour le système régulant la position de la tête dans l'espace à fonctionner également en l'absence d'informations visuelles reposerait alors probablement sur la base d'un mode de contrôle sensori-moteur de type prédictif.



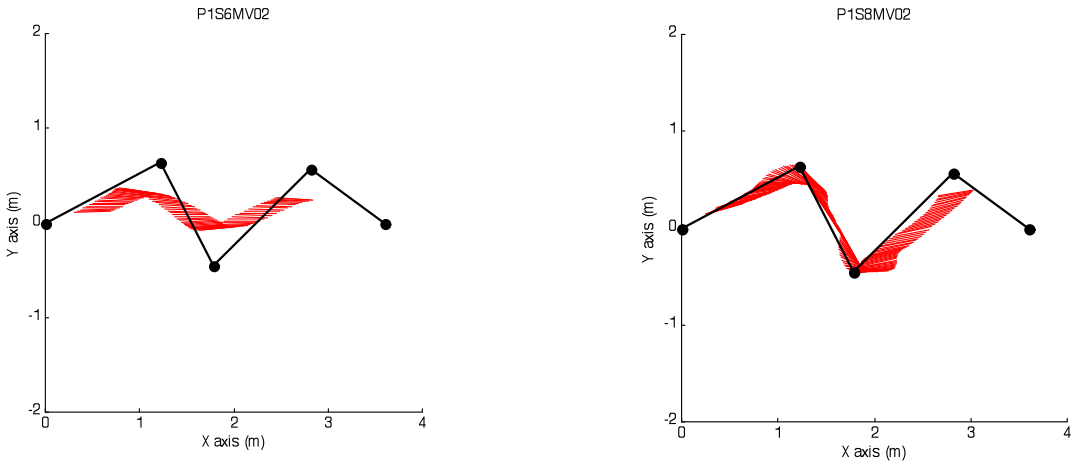
Déplacements angulaires de la tête au cours des 4 conditions.

A) Diagrammes en bâtons d'un sujet courant sur place. Le plan de Francfort est stable dans une position proche de l'horizontale.

B) Liaisons définies par les 3 marqueurs placés sur la tête et le trapèze au cours de la marche (W), de la marche sur place (Wip), de la course (R) et du saut à cloche pied (H). Pozzo, 1990.

Dans une autre expérimentation, Dunbar et coll (2000, non publié) ont demandé à des sujets d'enchaîner trois sauts à pieds joints sur des cibles dessinées au sol avant d'atteindre une quatrième et dernière cible. Ce déplacement était constitué de trois phases aériennes entrecoupées de deux phases dites terrestres au cours desquelles les sujets atterrissaient sur le sol, amortissaient le saut précédent et fournissaient l'impulsion nécessaire au saut suivant. Le tracé correspondait à un zigzag, avec des cibles disposées sur le sol de façon irrégulière.

Les mouvements de la tête dans le plan sagittal mettent en évidence deux phénomènes particuliers. On peut noter en premier lieu de faibles amplitudes de ces mouvements en rotation dans le plan sagittal, ceci s'apparentant à un ancrage directionnel. Cette amplitude varie en fonction des sujets, les valeurs les plus faibles s'observant lors de la production de mouvements produits par un corps tonique et rigidifié. Par ailleurs, l'orientation moyenne de la tête subit de larges variations en fonction de la nature des entrées visuelles. En effet, lorsque les sauts sont effectués en vision normale, la tête des sujets est orientée vers le bas alors qu'en absence de vision elle bascule vers l'arrière pour s'orienter vers le haut. Ce phénomène de bascule de la tête en absence de vision a été observé chez tous les sujets de cette expérience.

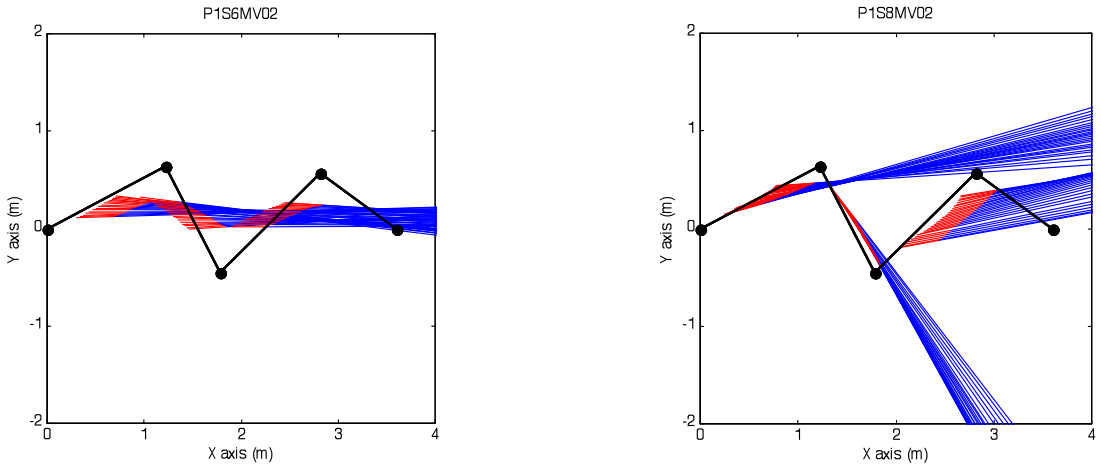


Stratégie en "S" *Stratégie en "Z"*

Projection horizontale des déplacements de la tête selon les axes X et Y du laboratoire. Le tracé rouge correspond au marqueur central de la tête du sujet (d'après Dunbar et coll, 2000)

Cette expérimentation a permis de mettre en évidence deux types de stratégies développées par les sujets pour atteindre la cible finale. Une première stratégie qualifiée de "S" dans laquelle le sujet dissocie fortement les mouvements de ses membres inférieurs des mouvements du tronc et des épaules. Ceci se caractérise par des mouvements de tête de faible amplitude angulaire dans le plan horizontal aussi bien en vision normale (13.7°) qu'en vision occultée (8°), la tête du

sujet étant orientée vers la cible finale dès le décollage du premier saut. Cet ancrage directionnel de la tête est conservé jusqu'au dernier atterrissage. Une deuxième stratégie dite "Z" montre une position du corps plus verticale, avec des changements de direction beaucoup plus marqués et nombreux. Ces changements directionnels ont lieu durant les phases terrestres et sont renouvelés pour chacune d'entre elles. Ceci conduit le sujet à accompagner son mouvement de rotations de la tête de très grande amplitude (76.9° en vision normale et 111.9° en vision occultée).

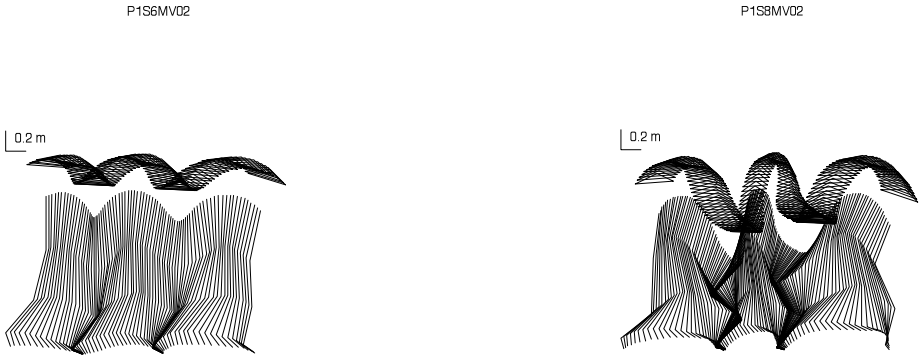


Projection horizontale de la direction de la tête selon les axes X et Y du laboratoire permettant de souligner les changements directionnels de la tête dans ce plan. Exemple typique pour 2 sujets de saut triple avec enchaînement en vision normale. La tête est tracée en rouge pour une série de 3 sauts. Les phases aériennes des mêmes sauts ont été isolées, et la direction de la tête a été prolongée en bleu. Le tracé est réalisé à 60 images par seconde (d'après Dunbar et coll, 2000).

Dans cette expérience, le sujet adoptant une stratégie en "S" met en jeu des mouvements du corps complètement différents de ceux implémentant la stratégie en "Z". Le corps du sujet oscille successivement autour de deux points de rotation formés par l'axe des pieds et l'axe des épaules. A partir de la position de départ, le corps s'incline vers l'avant et une impulsion est donnée pour commencer la phase aérienne. La phase aérienne se caractérise par une vitesse des épaules et du tronc plus faible que celle des pieds ce qui permet au sujet de passer d'une position inclinée vers l'avant au décollage à une position moins inclinée à l'atterrissage.

Inversement, lors des phases terrestres la fixation des pieds au sol permet au corps de pivoter autour des chevilles pour conserver la position avancée des épaules. Ce type de comportement produit une alternance de positions en pendule simple lors des phases aériennes et de pendule inversé lors des phases terrestres sans qu'on observe, pour ce type de sujet, de

larges variations de la hauteur de la ligne d'épaules ou du bassin du fait d'un maintien d'une extension des membres inférieurs assez prononcée.



Vue latérale du mouvement selon les axes X et Z du laboratoire. Exemple typique pour 2 sujets de saut triple avec enchaînement en vision normale. Le sujet se déplace de la gauche vers la droite. La partie supérieure de chaque graphique représente la tête et la partie inférieure une suite de liens entre les épaules, les hanches, les genoux, les chevilles et les pieds. Le tracé est réalisé à 60 images par seconde (d'après Vieilledent et coll).

On ne retrouve pas cette alternance d'oscillations autour des pieds et des épaules dans la stratégie "Z". En effet, celle-ci se caractérise par une position du corps plus proche de la verticale dans les phases terrestres et aériennes. Les inclinaisons du corps vers l'avant au décollage et vers l'arrière à l'atterrissage sont moins prononcées. Pour ces sujets, les phases terrestres ont une durée importante qui leur permet d'amortir le saut précédent en abaissant tout le corps par flexion marquée des hanches et des genoux avant de produire une extension verticale lors de l'initiation du saut suivant. On observe pour ces derniers de larges variations de la hauteur de la ligne des épaules et du bassin.

En résumé *: Les expériences princeps de Marey, puis, à la suite, de nombreux autres auteurs, ont montré l'importance de la stabilisation de la tête dans le contrôle de la relation posture-mouvement. Cette stabilisation faciliterait la prise en compte par le système des relations entre informations visuelles et vestibulaires.*

VI-Notion de fonction de coût, d'optimisation

Les données qui précèdent laissent à voir combien la mise en œuvre et le maintien de l'équilibre relèvent de nombreux processus en interaction, permettant des réglages fins. Cependant, nous n'avons pas abordé au cours de cette rapide présentation des processus

d'équilibration et des différentes théories sous-jacentes les aspects neuro-musculaires, pas plus que la mise en action des différentes forces musculaires intervenant.

Il convient dès lors de rappeler que le maintien d'une posture ou d'un équilibre stables nécessite un état d'équilibre des couples de muscles fléchisseurs et des extenseurs, impliquant par là même une régulation adaptée des forces musculaires (ou de l'action des différents muscles, agonistes et antagonistes, comme nous avons pu le rappeler dans la construction d'un appui tendu renversé). Ces réglages fins de l'interaction entre les différentes forces musculaires permettant l'exécution d'un mouvement possèdent un coût (informationnel quant au choix de l'action à réaliser, à planifier, énergétique dans la production elle-même de l'action, etc.). Pour mémoire, la notion de degrés de liberté et la réduction de la complexité du système nous ont permis d'entrevoir la nécessité d'une prise en compte de cette fonction de coût, considérée finalement comme un processus d'optimisation des ressources du système.

En ingénierie, une fonction objective est utilisée pour sélectionner une solution unique à un problème. Cette fonction objective est choisie afin d'évaluer quantitativement la production du système sous contrôle. Elle est habituellement définie comme l'intégrale d'un coût instantané pendant un intervalle de temps. Le but est de minimiser la valeur de cette fonction objective, minimisation fournissant les valeurs pertinentes pour les différents paramètres caractérisant le mouvement à produire. L'optimisation est un processus qui met en jeu différents critères dont la prise en compte permet soit de minimiser un coût donné, par exemple le coût énergétique, soit de maximiser une dimension particulière, comme la performance, l'efficience. L'introduction d'une fonction de coût permet de réduire le nombre de dimensions d'un système et donc de résoudre plus aisément le problème mathématique qui se pose. Cela peut s'illustrer par la mise en œuvre de couplages, ces derniers permettant par le contrôle d'une articulation de maîtriser une chaîne segmentaire dans son ensemble. La locomotion constitue de ce point de vue un exemple caractéristique de gestion de l'ensemble de la chaîne segmentaire du membre inférieur, la maîtrise d'un degré de liberté (une seule dimension) permettant de contrôler l'ensemble cheville - genou –hanche.

De nombreux modèles basés sur l'optimisation ont été développés dans la littérature afin de traiter du problème de l'excès de degrés de liberté. En effet, nous savons bien qu'une action peut être produite par différents mouvements. Quand la main est déplacée vers une cible, le système nerveux central doit sélectionner une trajectoire spécifique parmi un nombre infini de

trajectoires possibles menant à la position de la cible. Comment, selon quels critères, le système sélectionne-t-il le comportement mis en jeu parmi ce nombre infini de possibilités qui lui sont offertes ? Mathématiquement parlant, c'est un problème mal posé au sens ou plusieurs solutions sont possibles. La question centrale est de savoir comment le système nerveux central choisit certaines valeurs par rapport au grand nombre de paramètres à contrôler. En d'autres termes, selon quels principes certaines trajectoires sont-elles sélectionnées pour des mouvements habiles ?

L'hypothèse proposée est que, dans la production d'une tâche motrice, le cerveau produit des actions coordonnées qui minimisent une mesure de la performance (comme l'effort par exemple). Comme le rappelle Viviani (1994), "une vieille intuition est de supposer que le choix parmi ces modalités possibles est régi par un critère d'optimisation, en sélectionnant les gestes les moins coûteux." Pour Rosenbaum et al., (1996), une part essentielle de la planification et du contrôle du comportement physique est la capacité à spécifier de façon flexible quels coûts peuvent être maîtrisés. Le sujet assigne des coûts, redéfinissant la tâche jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'ambiguïté sur la façon de la réaliser. Cette recherche d'un coût le plus réduit possible dans l'exécution d'un mouvement est une question relativement récente, datant des années soixante-dix (Bryson & Ho, 1975, cité par Uno et al., 1989). Elle s'est illustrée notamment par la théorie de l'optimisation qui a constitué un outil de recherche important afin de découvrir les principes d'organisation et de favoriser la compréhension des processus neuraux permettant la production de comportements moteurs dirigés vers un but (Hogan, 1984 ; Flash & Hogan, 1985 ; Hasan, 1986 ; Flash & Hogan, 1995).

La théorie de l'optimisation est devenu un important outil de recherche dans les tentatives de découvrir les principes d'organisation qui guident la production de comportements moteurs dirigés vers un but. Elle fournit un moyen commode de formuler un modèle approchant des calculs neuraux sous-jacents sans besoin de détails spécifiques de la façon dont ces calculs sont effectués. Elle propose globalement un modèle de calcul pour le traitement de l'information par le système nerveux central : 1) détermination de la trajectoire désirée, 2) transformations des coordonnées visuelles de la trajectoire désirée aux coordonnées corporelles et 3) génération de la commande motrice (prenant en compte selon les modèles les aspects cinématiques ou les aspects dynamiques). De façon générale, l'application de la théorie de l'optimisation consiste en la définition d'une fonction objective qui quantifie ce qui est considéré comme la performance optimale (c'est-à-dire la plus intéressante pour le système) et ensuite en l'application des outils

de calculs variés afin d'identifier le comportement spécifique qui réalise cet optimum. Tous les comportements moteurs ne sont pas forcément optimaux, mais les tentatives d'identification des principes d'optimisation peuvent être utiles pour et améliorer la compréhension des processus neuraux qui produisent le comportement moteur.

En résumé *: la théorie de l'optimisation se fonde sur l'idée que le système cherche à fonctionner de la façon la moins coûteuse possible. Cette recherche de l'économie supporte l'hypothèse de l'existence d'une fonction de coût, une fonction objective qui se fixerait pour but de minimiser par exemple un certain nombre de paramètres afin de produire le mouvement le plus efficient possible.*

A) Cinq théories/modèles ont principalement été proposés par différents auteurs

Nous ne présentons ici que quelques modèles parmi les différentes propositions de modélisations, relativement nombreuses et prenant en compte un certain nombre de critères. Ce peut-être par exemple une dépense d'énergie la plus faible possible ou bien encore la recherche de la fluidité dans la production d'une trajectoire. Cependant, quel que soit le modèle proposé, aucun ne semble pouvoir répondre à toutes les questions posées. Ainsi, la prise en compte de l'aspect énergétique ne permet pas forcément de souscrire aux exigences de la fluidité de la trajectoire. Finalement, le bon critère de performance consiste peut-être dans la plupart des cas en une prise en compte encore une fois optimale des différents critères de coût proposés, dans la réponse à des fonctions de coût composites.

a_1) Modèle de l'accélération minimale (minimum jerk)

Pour les auteurs à l'origine de ce modèle cinématique dans lequel l'hypothèse proposée est celle d'un contrôle du mouvement par le système nerveux central dans un repère extrinsèque ou repère de la tâche, un principe fondamental de la programmation motrice est celui de fluidité. Pour eux, les mouvements exécutés doivent être " fluides et gracieux ". Ce critère de fluidité serait un trait caractéristique des mouvements naturels et un but majeur de la programmation et de la coordination motrice. Son principe d'organisation se définit ainsi : " Générer le déplacement le plus lisse qui amènera le membre de l'équilibre à la position de départ à l'équilibre à la position de la cible en un temps donné." Le mouvement serait coordonné de façon à minimiser les variations d'accélération (jerk) de l'effecteur, ces variations étant coûteuses pour l'organisme. On conçoit aisément que la réduction des variations d'accélération puisse produire de la fluidité dans la production du mouvement. Cette maximisation de la fluidité serait obtenue par la minimisation du carré moyen de la moyenne du jerk. Cette minimisation du jerk, en fournissant

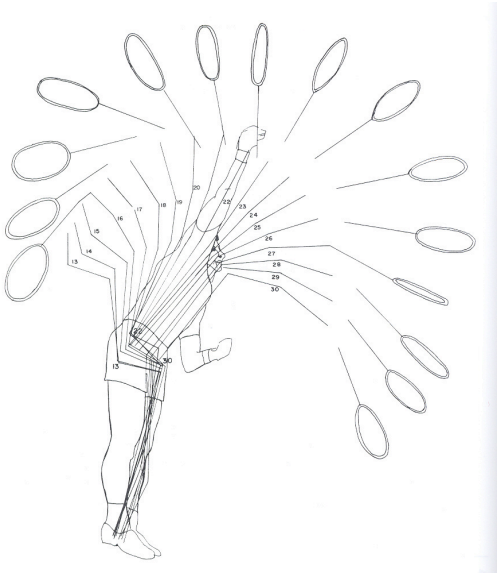


Illustration de la cinématique chez le joueur de tennis au service. Les chiffres indiquent les positions segmentaires successives. In Bouisset, 2002, d'après Plagenhoef, 1971.

une description concise d'une grande variété de mouvements, permettrait de simplifier le contrôle du système, la réduction de l'amplitude des dérivées élevées du déplacement (le jerk ou accélération en est la dérivée seconde) impliquant alors une réduction du niveau de l'information requise pour spécifier, stocker ou prédire la trajectoire.

Ces auteurs ont proposé une modélisation mathématique de la coordination des actions motrices avec une fonction objective exprimée en termes de coordonnées cartésiennes de la main telles que :

$$C = \int_{t0}^{tf} \left(\left(\frac{d^3 x}{dt3} \right)^2 + \left(\frac{d^3 y}{dt^3} \right)^2 \right) dt$$

où x (t), y (t) décrivent les coordonnées dans un plan de la position de la main se déplaçant d'une position initiale à une position finale dans un temps donné tf (la durée du mouvement). Il est possible de calculer cette fonction de coût en trois dimensions, il suffit simplement d'introduire une valeur z.

L'étape critique dans l'analyse est la sélection d'une fonction objective appropriée. Ici, les résultats expérimentaux suggèrent que puisque l'apprentissage et la pratique permettent la production de mouvements fluides et plus gracieux, ceci peut indiquer la mise en jeu d'une fonction objective permettant de produire la trajectoire la plus fluide possible d'une position d'équilibre à une autre. Flash & Hogan ont ensuite généralisé ce principe d'organisation au mouvement multi-articulé en utilisant cette théorie de l'optimisation dynamique afin de déterminer l'unique trajectoire fournissant la meilleure performance.

a_2) théorie de l'effort minimal

Hasan (1986) a proposé la théorie de l'effort minimal. Ses travaux ont porté sur la production de mouvement mono-articulé (membre supérieur par exemple) basée sur un modèle qui décrit le comportement neuromusculaire comme équivalent à un élément d'un ressort (*spring-like*) conduisant le membre vers une position d'équilibre définie neuralement, déterminée par l'activation simultanée des groupes musculaires agonistes et antagonistes. La minimisation de l'effort est exprimée comme suit :

$$C = \int_{t0}^{tf} \left(\sigma(t)\left(\frac{d\beta}{dt}\right)^2\right) dt$$

où σ est la raideur articulaire et $d\beta/dt$ est la dérivée par rapport au temps de la position d'équilibre.

a_3) théorie du minimum torque change model (modèle du changement minimal de couple)

Cette théorie (ce modèle) a été proposée par 3 chercheurs japonais (Uno, Kawato et Suzuki) en 1989, vraisemblablement en réponse au modèle du minimum jerk proposé par Flash et Hogan en 1985. Les critiques formulées par Uno et ses collaborateurs à l'encontre du modèle du minimum-jerk ont porté essentiellement sur l'absence de prise en compte par Flash et Hogan de l'aspect dynamique (*i.e.* les forces et les moments articulaires) dans la définition de la fonction objective. Pour Uno et al., il semble surprenant que la trajectoire optimale d'un mouvement volontaire se base uniquement sur la cinématique (*i.e.* prenant en compte la position et ses dérivées successives, la vitesse et l'accélération) du mouvement et soit déterminée indépendamment de données dynamiques comme la commande motrice, le couple ou la force externe appliquée au système. En termes purement physiques, les forces générées par les interactions dynamiques ne peuvent en effet être ignorées. Partant de l'idée présumée que la fonction objective doit être liée à la dynamique, ces chercheurs ont proposé de définir la fonction objective permettant de déterminer la trajectoire comme étant l'intégrale de la somme du carré de la dérivée du couple durant la durée du mouvement, appelé minimum torque-change model (modèle du changement minimal de couple). Cette fonction objective CT est définie comme suit :

$$C_T = \frac{1}{2}\int_0^{tf} \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{dz_i}{dt}\right)^2 dt$$

où z_i est le couple produit par le i-^{ème} actuateur (c'est-à-dire le muscle) parmi n actuateurs, et t_f est le temps de mouvement. La fonction objective du "minimum torque-change model" est donc fondée sur des variables dynamiques (le degré de modification du couple articulaire). Ces auteurs

ont mesuré les mouvements volontaires du bras et les trajectoires de la main chez l'homme dans diverses situations comportementales afin d'évaluer leur modèle. Ces résultats supportent l'idée selon eux que la trajectoire de la main chez l'homme est planifiée et contrôlée par rapport au critère du minimum de modification du couple (basés par conséquent sur une représentation dans l'espace articulaire, alors que le modèle du minimum jerk se fonde sur une représentation dans l'espace de la main) et que la sélection du mouvement optimise le degré de modification des efforts de l'actuateur (c'est-à-dire ici les couples articulaires, mais cela aurait pu aussi bien être la prise en compte de la force de la main).

a_4)modèle de la variance minimale

Harris & Wolpert (1998) proposent une approche critique des théories du minimum-jerk model et du minimum torque change model, soulignant l'absence de principe explicatif (autre que le fait que ces modèles prédisent des trajectoires fluides) disant pourquoi le système nerveux central devrait avoir évolué pour optimiser ces valeurs. Par ailleurs, selon ces auteurs, la façon dont le système nerveux central pourrait estimer ces valeurs demeure inconnue, de même que l'avantage de la fluidité de la trajectoire reste inexpliqué. Ils proposent une théorie unifiée des mouvements de l'œil et du bras selon laquelle les signaux de contrôle normal sont corrompus par un bruit (physiologique) dont la variance augmente avec l'amplitude du signal de contrôle (le bruit dans le signal de contrôle neural augmentant avec le niveau moyen du signal). Ceci est basé sur l'observation empirique selon laquelle la déviation standard de l'activation du motoneurone augmente avec le niveau moyen, avec un coefficient de variation situé entre 10 et 25 %. Ces auteurs émettent l'hypothèse selon laquelle en présence d'un tel signal dépendant du bruit, la forme de la trajectoire est sélectionnée afin de minimiser la variance de la position finale de l'œil ou de la main. Les trajectoires de l'œil et du bras ne seraient donc pas des conséquences inévitables des propriétés mécaniques des muscles, mais refléteraient la mise en œuvre d'un patron organisé d'activation neurale par les neurones moteurs et pré-moteurs prenant en compte ce bruit physiologique inhérent au fonctionnement du système. C'est ce paramètre qui serait responsable des déviations de la trajectoire par rapport au chemin désiré. Si le bruit était indépendant du signal de contrôle, alors l'erreur accumulée serait minimisée par une réalisation la plus rapide possible du mouvement. Selon ces auteurs, l'avantage de cette approche réside dans le fait que le système nerveux central n'a pas besoin de construire des signaux hautement dérivés (donc avec un coût calculatoire important) pour estimer le coût du mouvement, comme la variance de la position finale. De tels coûts seraient disponibles directement et la trajectoire optimale pourrait être apprise à partir de l'expérience de

mouvements répétés. Ces trajectoires optimales seraient par conséquent fluides, des modifications trop abruptes entraînant du bruit. Pour Harris et Wolpert, "la théorie de la variance minimale fournit un principe unificateur simple et puissant pouvant être appliqué à des mouvement dirigés vers un but et implique que le bruit dépendant du signal joue un rôle fondamental dans la planification motrice". Selon Kawato, ce modèle représente une proposition majeure en théorie calculatoire du contrôle moteur, suggérant fortement que les modèles internes cinématiques et dynamiques (deux approches très âprement débattues dans la planification de la trajectoire) sont utilisés dans la planification et le contrôle du mouvement.

a5) modèle du contrôle optimal en boucle fermée (optimal feed-back control)

Le modèle du contrôle optimal en boucle fermée propose une loi de contrôle non spécifique, c'est-à-dire ni cinématique ni dynamique. Elle se fonde sur un principe parcimonieux d'intervention minimale selon lequel, dans le cadre de la production d'une trajectoire, les déviations observées par rapport à la trajectoire moyenne sont corrigées uniquement si elles interfèrent avec la réalisation de la tâche. En d'autres termes, la variabilité observée n'est prise en compte que si elle interfère avec le but final de l'action. Une déviation dans un sens peut être corrigée par une déviation dans un sens opposé. La redondance, gérée en choisissant la meilleure loi de contrôle possible, apparaît ici comme un mécanisme permettant la mise en œuvre de ce processus de correction utilisant la variance de chaque degré de liberté du système. L'idée qui prévaut est celle de la réalisation de la tâche et non plus uniquement celle de la réalisation d'un patron moteur stéréotypé. La variabilité fait ici partie intégrante du mouvement, elle en est même un élément de réussite. Todorov et Jordan précisent par ailleurs que cette approche s'inscrit pleinement dans une perspective dynamique dans la mesure où ce modèle élimine la distinction traditionnelle entre planification et exécution du mouvement.

B) Les théories du point d'équilibre

Le muscle étant considéré comme un système masse-ressort non linéaire amorti (si une force externe perturbe le système, celui-ci revient spontanément à l'état d'équilibre précédent, une fois l'effet de cette force dissipée), la transition de la position désirée d'une articulation à une autre dans le cas de mouvements réalisés serait sous-tendue par un glissement rapide à un équilibre final réglé par le système entre muscles agonistes et antagonistes. Ce qui serait contrôlé serait la position finale de la trajectoire, les " détails " de cette trajectoire étant réglés par les propriétés viscoélastiques des membres et des muscles. Cette idée est intéressante parce qu'elle correspond à un moindre coût pour le système nerveux central en lui

évitant des calculs complexes (il lui suffit de définir le nouveau point d'équilibre), introduisant ainsi le principe d'économie proposé par Nelson (1983) dans la production du mouvement.

L'hypothèse du point d'équilibre fournit un niveau de description de la façon dont le système nerveux central contrôle les muscles de façon qu'une posture stable soit maintenue ou qu'un mouvement soit produit. Cette hypothèse propose par exemple que la trajectoire du bras est produite par un glissement progressif du point d'équilibre vers la cible, les forces des muscles élastiques nécessaires pour une trajectoire voulue sont automatiquement produites comme étant le résultat de la raideur du système musculo-squelettique et la différence entre l'équilibre et la trajectoire réelle (Bizzi et al., 1984 ; Hogan, 1985). Par rapport à cette hypothèse, le rôle principal du système de contrôle moteur est de programmer la trajectoire du point d'équilibre et la raideur articulaire. La raideur peut se définir comme le rapport de la variation de la force appliquée au muscle sur la variation de longueur de ce muscle à la suite de l'application de cette force sur ce muscle ($\Delta F/\Delta L$) (l'inverse de la raideur porte le nom de compliance ou extensibilité).

L'équilibre se réfère à un état du système dans lequel les forces agissantes sont égales à zéro. En résumé, si le système atteint un point d'équilibre, il y reste. La transition de la posture au mouvement pourrait être réalisée par un contrôleur déplaçant graduellement son point d'équilibre du point de départ du système vers son état final (son but). En d'autres termes, l'hypothèse du point d'équilibre propose qu'en manipulant le seul point d'équilibre du champ de contrôle, l'état du système est contrôlé à la fois durant la posture et durant le mouvement.

La contribution majeure de l'hypothèse du point d'équilibre a été de décrire le mouvement comme une transition graduelle à partir de la posture. Pour des mouvements lents pour lesquels les forces (dites de Coriolis et les forces centripètes) produites sont faibles, on devrait s'attendre à ce que la trajectoire de ce point d'équilibre suive de très près la trajectoire réelle du système. Les expérimentations de Bizzi et al. (1984) ont montré que c'était effectivement le cas.

Le modèle du point d'équilibre a été initialement proposé par Bernstein, puis repris par Feldman (1966) qui définissait la posture comme le résultat de forces dépendantes de la longueur produite par les muscles agonistes et antagonistes, le comportement ressort des muscles prenant alors une importance déterminante. Selon cet auteur, le système nerveux central peut produire un mouvement en générant des signaux modifiant l'activation relative des agonistes et des

antagonistes. Cette activation va créer des couples articulaires dont dépendra le déplacement final (ainsi que des charges externes au système).

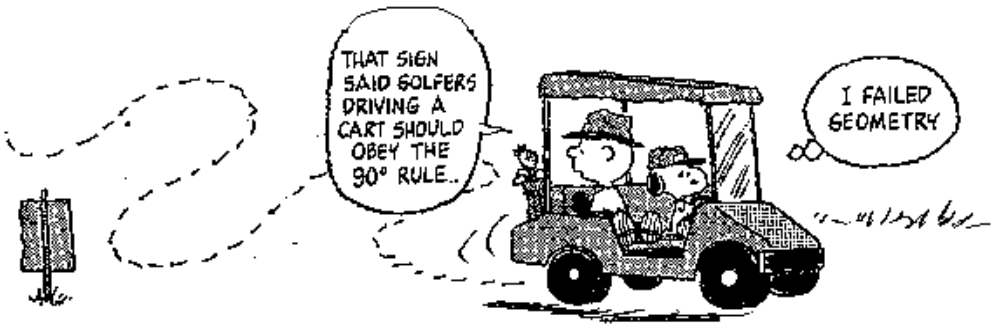
C) Application du principe de contrôle optimal à la locomotion

Nous nous intéresserons ici uniquement aux déplacements circulaires, c'est-à-dire les déplacements locomoteurs où le centre de rotation de la trajectoire est éloigné du sujet (le sujet se déplace par exemple sur un cercle tracé au sol). Ce centre de rotation peut être fixe dans le cas d'un cercle ou mobile dans le cas de trajectoires elliptiques ou plus généralement sinueuses. Pour le sujet, il ne s'agit plus de tourner sur place mais de tourner autour d'un point ou d'un obstacle qui peuvent être réels (par exemple un piquet de slalom en ski) ou virtuels (par exemple lors d'une course d'élan en saut en hauteur). La modélisation d'une telle trajectoire s'avère parfois difficile à cause de ses possibles variations, comme dans le cas d'une trajectoire elliptique par exemple.

Comme nous l'avons déjà évoqué, en termes calculatoires, le nombre élevé de degrés de liberté définis comme le nombre minimal de coordonnées permettant de décrire le système musculo-squelettique rend les opérations de contrôle très coûteuses (Bernstein, 1967 ; Saltzman, 1979). La production d'une trajectoire donnée peut être obtenue par la mise en jeu de patrons d'activation musculaire différents ce qui offre un grand nombre de solutions pour résoudre la tâche (Hebb, 1949). Pour aborder ce problème, certaines approches privilégient le fait que la définition de ces patrons moteurs est spécifiée sur la base de principes simples.

c_1) géométrie et cinématique

Comme le rappelle Viviani (1991) il existe plusieurs méthodes pour décrire le mouvement d'un point dans le plan quand celui-ci est représenté dans un système de référence extrinsèque. Il en présente trois ... non exclusives d'autres possibilités.



Comment spécifier les caractéristiques d'un trajet ...?

- premièrement, le mouvement peut être décrit en fournissant le décours temporel des coordonnées du point considéré. Dans ce cas le système se résume à deux fonctions de forme x = x(t) et y = y(t).

- deuxièmement, il peut être décrit lorsque sa forme géométrique (*G*) et le mouvement (*M*) sont donnés. Il est alors nécessaire de spécifier un couple d'équations paramétriques pour *G* tel que x = x(s) et y = y(s) où s est une coordonnée curviligne. Il faut aussi spécifier une loi de mouvement de type l = l(t) qui indique la longueur de trajectoire parcourue à l'instant t après le début du mouvement.

- troisièmement, il peut être décrit en spécifiant le rayon de courbure (*R*) de la trajectoire et la vitesse tangentielle (*V*) en fonction de la coordonnée curviligne.

c_2) un exemple de loi de mouvement : "la loi de puissance 2/3"

Les premières observations scientifiques sur les variations mutuelles de la vitesse et de la courbure des trajectoires lors de mouvements de traçage manuel sont déjà anciennes (Binet et al., 1893; Jack, 1895 cités par Wann et al. ; 1988). On sait depuis la fin du 19° siècle que la vitesse du tracé d'une trajectoire dépend du rayon de courbure de telle sorte que la vitesse de l'effecteur (ou de déplacement du sujet) augmente dans les parties peu courbées et qu'inversement elle diminue fortement dans les parties très courbées. Au début des années 80, de nombreux travaux ont été consacrés à l'étude de la structure fine des relations entre vitesse et courbure du mouvement, notamment par des auteurs comme Lacquaniti et Viviani. La version originale de la formalisation mathématique de la relation entre les aspects géométriques et cinématiques a été donnée par Lacquaniti et al. (1983) à partir de l'enregistrement de mouvements de dessins de formes elliptiques ou de formes plus complexes. Ces auteurs ont montré, pour des classes de mouvements particuliers de rayon de courbure R et de vitesse tangentielle V ne comprenant pas de points d'inflexion (c'est-à-dire de modification de la courbure), que la relation peut s'écrire sous la forme :

$$A = KC^{2/3} \text{ avec } C = 1/R \text{ pour la courbure de la trajectoire}$$

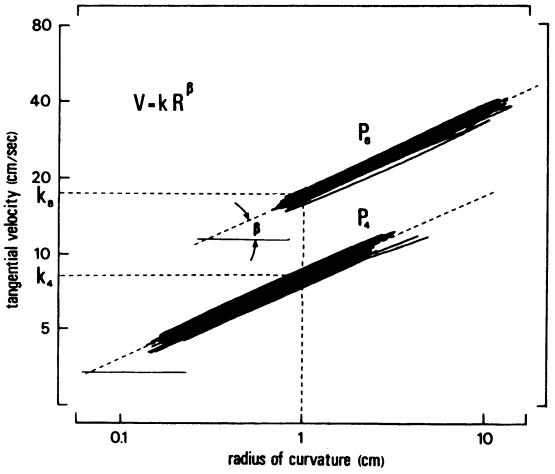
$$A = V/R \text{ pour la vitesse angulaire}$$

ou, de façon équivalente

$$V = KR^{1/3}$$

ou encore $\text{Log } V = \text{Log } K + 1/3 \text{ Log } R$

ce qui permet de caractériser la production d'un tracé manuel par une analyse de régression linéaire entre les logarithmes du module de la vitesse et du rayon de courbure. Le paramètre K est appelé gain de vitesse. Il dépend du rythme de l'exécution du mouvement.



Expression de la loi de puissance 2/3 (Viviani et al., 1991) : Relation entre les logarithmes du rayon de courbure et du module de la vitesse de la main lors du traçage d'ellipses de périmètre 6.63 cm (P4) et 26.51 cm (P8).

Wann et al. (1988), en analysant les données de sujets adultes pour le traçage d'ellipses d'excentricité différente, ont montré que la loi de puissance 2/3 pouvait être expliquée par des modèles prenant en compte le coût du mouvement tels que le modèle du minimum jerk (Flash et al., 1985). Cependant, ils ont du apporter des modifications au modèle initial. Ils ont ajouté une composante visco-élastique au modèle initial et ont adressé une série de remarques critiques quant à la possible modélisation de la loi de puissance 2/3 à l'aide de fonctions de minimisation de coût.

Des confirmations expérimentales de l'existence de cette loi, initialement établie pour des mouvements de graphisme réalisés dans un plan (*i.e.* en 2D) par le membre supérieur, ont été apportées dans le domaine du graphisme en 3D (Soechting et al., 1986), des déplacements passifs de la main (Viviani et al., 1997), de la production des mouvements oculaires (Viviani et al., 1987) et même de la perception visuelle (Viviani et al., 1989 ; Viviani et al., 1992). Dans ce dernier cas par exemple, il a été montré que la forme d'un trajet objectivement circulaire pouvait être perçue comme elliptique si la diode qui le parcourt, observée par le sujet, suit une loi de mouvement conforme à la loi de puissance 2/3. Inversement, la vitesse d'une diode se déplaçant à vitesse constante est perçue correctement si elle se déplace sur un cercle alors que des accélérations et décélérations sont perçues si elle se déplace sur une ellipse. Les erreurs perceptives sont tout à fait en accord avec la loi de puissance 2/3 et les auteurs interprètent leurs résultats comme la manifestation d'interactions perceptivo-motrices. Même en absence de

toute intention de produire le mouvement, certaines propriétés du système moteur influencent de façon implicite l'interprétation perceptive du stimulus visuel.

Les origines neurales de la loi sont encore mal connues. A l'heure actuelle, deux types de théories ont été proposés. Les premières privilégient des hypothèses de programmation centrale, voire des mécanismes corticaux pour expliquer la planification du mouvement (Massey et al., 1992; Pelliszer, 1997; Pelliszer et al., 1999) alors que les secondes sont plus favorables à l'intervention de facteurs d'origine périphérique (Gribble et al., 1996; Harris et al., 1998; Sternad et al., 1999; Wann et al., 1988). Pour autant, il est difficile actuellement de trancher la question de l'origine de cette loi.

VII- Un principe caractéristique du contrôle moteur : la relation vitesse-précision

Les différents modèles ou théories explicatives proposées précédemment nous rappellent que, quels que soient les mouvements exécutés par le sujet, il existe des problèmes de contrôle et de coordination très importants. Comme le rappelle Bonnet et coll (1994), ces problèmes sont si généraux que l'on peut les rapporter à une classe particulière de mouvements sans crainte de réduire ou de déformer la réalité de ce qui se passe au plan plus global. Il s'agit là en effet (Schmidt, 1991) de lois ou de principes de mouvements simples, décrivant des relations fondamentales entre le temps de mouvement, la distance et la vitesse. "Par nombre d'aspects," dit Schmidt, "ces principes sont analogues aux lois simples de la physique et de la mécanique qui définissent le comportement des objets physiques dans le monde. En tant que tels, ces principes forment le fondement d'une grande partie des savoirs relatifs au mouvement." Différents paramètres permettent donc de rendre compte de lois générales de fonctionnement du système.

Nous avons vu que la plupart des théories proposées précédemment dans ce cours s'intéressaient dans un premier temps aux mouvements mono articulés, puis se proposaient d'étendre leur modèle à des mouvements pluri articulés. Même dans les expérimentations mettant en jeu les gestes les plus simples, le déplacement d'un seul segment corporel nécessite la mise en jeu coordonnée de plusieurs articulations ou d'un nombre important de muscles. Nous avons vu également que, selon l'approche des différents auteurs, il était possible d'envisager la programmation et la modélisation du mouvement dans différents espaces. Ainsi, certains auteurs, se plaçant dans une perspective cinématique, prennent en compte principalement le déplacement de l'extrémité distale du segment corporel (sa trajectoire, sa vitesse). Si le sujet a pour consigne d'être le plus précis dans son action, on conçoit que l'attention se porte

majoritairement sur le trajet parcouru par l'effecteur terminal. D'autres auteurs, par contre, considèrent que la programmation et le contrôle s'exercent surtout par la prise en compte des couples articulaires, l'allongement ou le raccourcissement des muscles, le seuil du réflexe d'étirement. Quoi qu'il en soit, il faut se rappeler que la réalisation d'un mouvement particulier impose au sujet la gestion d'un certain nombre de contraintes. Dans le cas de la réalisation de la performance la meilleure possible, si l'on se place dans le cadre de la théorie du contrôle optimal, le sujet doit, pour réussir la tâche qui lui est ou qu'il s'est proposée, résoudre différents types de conflits.

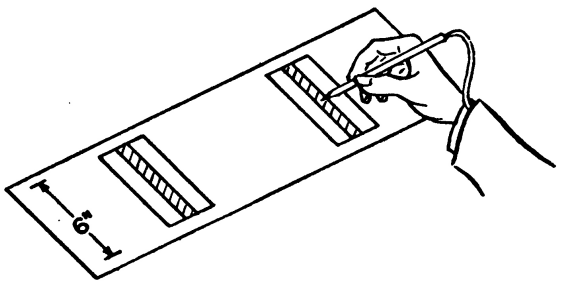
Le conflit vitesse-précision est l'un d'entre eux. L'observation du profil généralement en forme de cloche des courbes de vitesse d'un mouvement de pointage ou de saisie permet de constater une asymétrie de ces courbes de vitesse, asymétrie qui souligne une décélération finale du mouvement moins vive que son accélération initiale. Ceci pourrait révéler en fait la mise en œuvre par le sujet d'une stratégie particulière (un ralentissement du geste dans sa phase finale), visant dans une tâche donnée par exemple à obtenir la plus grande précision possible. On voit bien que l'on entre ici dans le cadre d'un conflit dit de vitesse-précision (où l'on doit aller moins vite si l'on veut être plus précis), conflit que l'on rencontre de façon constante à la fois dans le monde du travail, mais également dans le domaine des activités physiques et sportives.

Ce travail sur la précision du mouvement volontaire n'est pas récent puisque Woodworth en avait déjà fait en 1899 le thème de certaines de ses recherches. Ses travaux soulignent l'existence d'un lien fort entre vitesse et précision du mouvement, lien qui se traduit par l'existence d'une relation inverse entre les deux termes de cette équation (en général, plus l'on va vite et moins l'on est précis. Une part importante de l'apprentissage d'une habileté motrice dans certains domaines ne vise pas autre chose que la maîtrise ou à tout le moins l'établissement d'une relation optimale entre ces deux aspects de la performance). "On peut vérifier qu'il en va bien ainsi en essayant de souligner, dans un texte imprimé, un mot de cinq à six caractères à l'aide d'une règle et d'un crayon. Si l'on se donne comme objectif de faire coïncider exactement le trait avec le mot, le mouvement sera exécuté à une allure lente, tout au moins la vitesse de la pointe du crayon se réduira sensiblement bien avant l'atteinte du dernier caractère du mot. Si l'on essaie, en revanche, de tirer le trait le plus rapidement possible, il sera probablement trop court ou trop long, se terminant en deçà ou au-delà du dernier caractère. La mesure de l'erreur sera ici la différence entre la longueur du trait dessiné et la longueur du mot, différence négative pour un trait trop court et positive pour un trait trop long. Après avoir répété cette

mesure plusieurs fois, on peut caractériser (mesurer) la précision des mouvements de deux façons : d'une part, en calculant la moyenne algébrique des erreurs, ou erreur constante (EC), on pourra détecter l'existence dans le mouvement d'un éventuel biais systématique, une sous estimation (hypométrie) ou une surestimation (hypermétrie) de la distance requise ; d'autre part, le calcul de l'écart-type des erreurs, ou erreur variable (EV) fournira une mesure de la variabilité aléatoire qui affecte la production du mouvement". (Citation intégrale - sauf les termes entre parenthèses - de Bonnet et al., 1994).

Fitts (1964) est le premier à avoir cherché à quantifier les relations entre la rapidité et la précision du mouvement, ainsi que les conséquences de cette relation sur la vitesse d'exécution de ce mouvement. Ses travaux s'inscrivent dans le cadre de la théorie du traitement de l'information, dans le contexte théorique des travaux de Shannon, de Shannon et Weaver, avec "l'idée d'interpréter certaines caractéristiques du contrôle moteur en termes d'incertitude. Puisque la coordination sensori-motrice implique la transmission de messages dans des circuits nerveux de capacité limitée, la conclusion est que la probabilité *a priori* d'une réponse motrice limite la vitesse avec laquelle elle peut être exécutée." (Viviani, 1994).

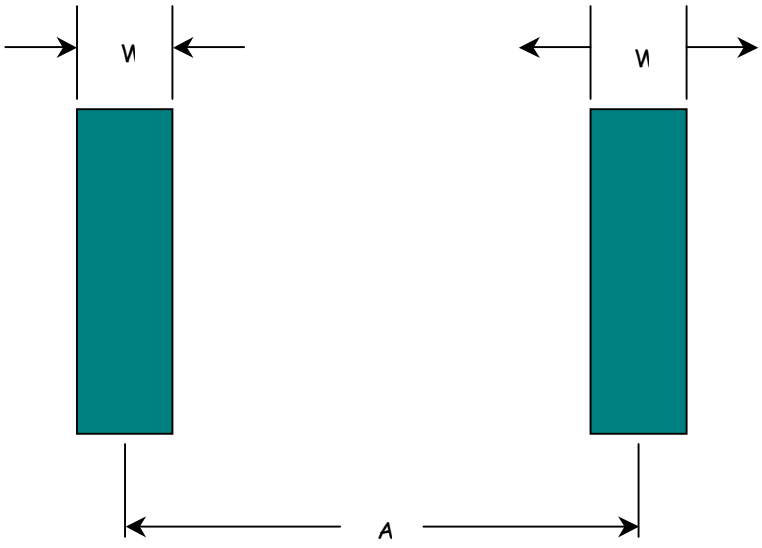
Fitts a proposé aux sujets une tâche de pointer alternatif (cf. schéma ci-dessous). Il s'agit pour le sujet de pointer autant de fois que possible (c'est-à-dire le plus grand nombre de fois possible) généralement en 20 secondes, deux cibles séparées, selon les conditions expérimentales, par une distance de 2, 4, 8 et 16 pouces (pour mémoire, la valeur du pouce définie dans le Système international d'unités est de 0.0254 m). L'amplitude du mouvement est traduite par la distance entre les cibles. Celles-ci présentent, toujours selon les conditions expérimentales, des largeurs différentes (2, 1, 0.5 et 0.25 pouce), chacune d'entre elles représentant en quelque sorte l'erreur permise au sujet. Les variations possibles de l'amplitude du mouvement et de la largeur de la cible permettent de proposer en tout 16 conditions expérimentales (4 amplitudes et 4 largeurs).



Paradigme expérimental proposé par Fitts (1954)

La principale consigne pour le sujet est d'être précis plutôt que rapide. Fitts a proposé une relation mathématique liant l'amplitude du mouvement, la largeur de la cible et le temps de mouvement. Celle-ci, dénommée de nos jours loi de Fitts, s'écrit : TM = a + b $\log_2$ (2A/W), où TM représente le temps moyen de mouvement d'une série de pointers, A l'amplitude de l'écart entre les deux cibles, W la largeur des cibles. a et b sont des constantes déterminées de façon empirique et dont la valeur peut changer selon les conditions expérimentales proposées. La constante b est un index de l'efficience du mouvement (une fonction de la complexité). Plus la valeur de b est faible, plus faible également est l'influence de la complexité de la tâche sur le temps moteur.

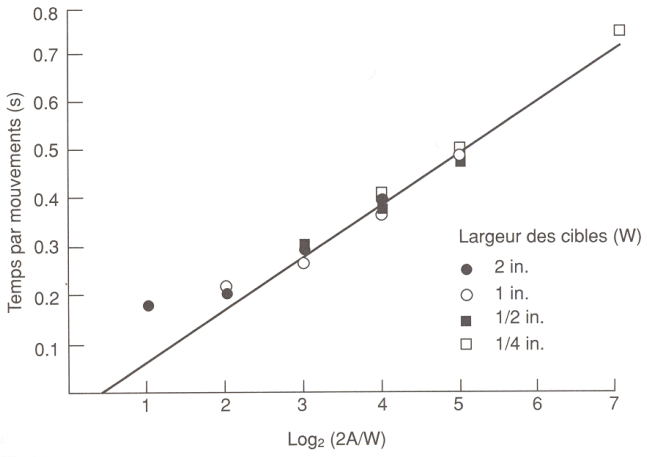
Dans un essai typique ou représentatif, la constante a présente une valeur moyenne de -70ms et b une valeur d'environ 74 ms. W représente selon Fitts l'ensemble des pointers corrects, la somme 2A étant, de part et d'autre de chaque cible, l'ensemble des pointers possibles. Fitts a également proposé aux sujets de placer des disques sur des fiches. A représentait la distance entre ces fiches et W était d'une certaine façon la tolérance (la différence) entre la taille du trou central du disque et le diamètre de la fiche.



Paradigme expérimental. Fitts (1954)

Il est possible d'écrire cette loi sous une autre forme, TM = a (Log2 2A/W) + b. Cette écriture différente laisse apparaître une fonction linéaire de la forme y = ax + b. En effet, on voit bien ici que, dans la mesure où a et b sont des constantes, le temps moyen varie de façon linéaire en fonction de la valeur du terme log2 2A/W (logarithme à base 2 de 2A/W). Ce terme est appelé par l'auteur indice de difficulté de la tâche. Dire que la fonction est linéaire revient à

dire que la valeur du temps de mouvement évolue donc strictement en fonction de la valeur de l'index de difficulté de la tâche. Ceci s'observe particulièrement sur le graphique ci-dessous, avec en ordonnées le temps de mouvement en secondes et en abscisse les valeurs de l'index de difficulté du mouvement. Des travaux ultérieurs (Langolf et al., 1976) ont montré que la linéarité entre l'indice de difficulté de la tâche et le temps moteur était conservée quel que soit le segment corporel utilisé par le sujet (le doigt, le poignet, le bras, le pied).



Fonction linéaire de la loi de Fitts

En termes de programmation, les interprétations de cette loi qui ont été proposées (Schmidt, 1991) font état d'un mouvement initial de type balistique. Au cours de ce mouvement, et plus particulièrement vers la fin, interviendrait une action en retour permettant une correction ou un ajustement terminal. Cette correction terminale permettrait au sujet d'être le plus précis possible dans son pointer. Il semblerait donc, si l'on souscrit à cette interprétation, que la loi de Fitts constitue également un exemple de l'action coordonnée d'habiletés de type ouvert et d'habiletés de type fermé.

Fitts a montré que le temps de mouvement demeurait approximativement constant lorsque le rapport A/W demeurait lui aussi constant. En d'autres termes, cela signifie que des mouvements de très faible amplitude sur des cibles étroites demandent à peu près le même temps que des mouvements de plus grande amplitude vers des cibles plus larges. Pour un rapport donné de l'amplitude du mouvement sur la largeur de la cible, le temps de mouvement demeure donc constant. En d'autres termes, toute modification de distance et de précision qui laisse le rapport distance/précision inchangé laisse également inchangé le temps moyen de mouvement. Cette modification éventuelle d'un facteur d'échelle n'intervient donc pas sur la valeur de ce critère

quelle que soit l'amplitude du mouvement réalisé (on utilise par exemple le même temps pour écrire une phrase sur une feuille de papier et pour écrire la même phrase au tableau).

Ce qui précède nous rappelle que, comme pour la loi de puissance deux/tiers, la loi de Fitts respecte le principe d'isochronie. Celui-ci nous dit qu'en l'absence de contrainte temporelle explicite, la vitesse moyenne d'un geste covarie de façon spontanée avec la longueur de sa trajectoire. On constate ainsi une variation faible de la durée (celle-ci croît proportionnellement moins que la longueur de la trajectoire) lorsqu'un geste est exécuté à des échelles différentes.

Enfin, pour mémoire, le temps de mouvement est lié à la largeur de la cible par une relation inverse (il augmente quand la largeur de la cible diminue).

Bien que l'expérience de Fitts ne porte pas sur une action que l'on effectue quotidiennement, il faut retenir de ses travaux et de la pertinence de l'application de sa loi à de nombreuses activités, quel que soit le domaine de l'activité humaine envisagé, l'importance de la démonstration et de la prise en compte de l'un des principes les plus fondamentaux dans le domaine du contrôle moteur.

***En résumé** : la réalisation d'un mouvement particulier impose parfois au sujet la gestion d'un nombre élevé de contraintes. Surmonter ces contraintes peut se traduire par la résolution de différents types de conflits, comme le conflit vitesse-précision que l'on rencontre fréquemment aussi bien dans le monde du travail que dans la pratique sportive. Les travaux de Fitts ont proposé une formalisation mathématique et la prise en compte d'un principe fondamental dans la compréhension du contrôle moteur.*

VIII- Un exemple particulier : localiser et saisir

Nous effectuons quotidiennement sans effort apparent un grand nombre de gestes afin de saisir des objets présents dans notre environnement immédiat. Pour le sportif, ce peut être l'interception de la trajectoire d'un ballon, la mise en coïncidence d'un objet avec un autre (raquette-balle) ou d'une arme particulière (poing, pied) avec une partie du corps de l'adversaire. A d'autres moments, les mouvements de préhension comme la saisie d'une tasse à café, la tenue d'un stylo ou la manipulation d'un outil nécessitent également des ajustements précis entre les différents éléments de la main. Ces gestes requièrent une série de coordinations précises entre le système visuel et le système moteur permettant la conversion de ces entrées visuelles en commandes motrices (on parle de transformation visuo-motrice, de fonction visuo-motrice). La

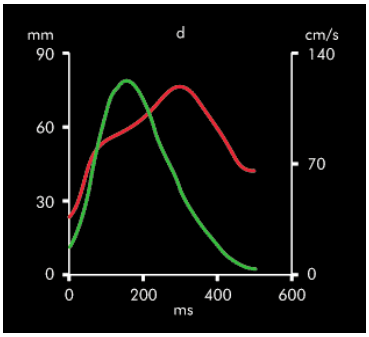
saisie d'un objet implique au préalable la perception de cet objet ainsi que sa reconnaissance. Ces deux problèmes sont résolus par le cortex au moyen de deux voies visuelles différentes qui ne sont pas totalement indépendantes l'une de l'autre.

Localiser et saisir

Un certain nombre d'études portant sur la saisie et le transport d'objet ont mis en évidence la présence de deux éléments : un transport de la main par un déplacement rapide du bras et une ouverture adaptée de celle-ci en fonction de la taille et de la configuration de l'objet à saisir. La localisation et la préhension font appel à des opérations cérébrales complexes. Une fois l'objet perçu, sa préhension doit ensuite être traduite en une commande coordonnée des différents muscles du bras et de la main. Pour certains auteurs, l'atteinte et la saisie semblent faire l'objet d'un contrôle indépendant, mettant en jeu deux canaux visuo-moteurs parallèles, ce qui n'est pas surprenant dans la mesure où atteinte et prise n'obéissent pas aux mêmes contraintes.

Arbib (1981), Jeannerod (1981) et Paillard (1982) ont ainsi formulé l'hypothèse de l'existence de canaux visuo-moteurs séparés,l'un chargé du transport de la main permettrait d'atteindre l'objet et l'autre, chargé en quelque sorte de préparer la conformation de la main à la taille ou la forme de l'objet, en permettrait la saisie.

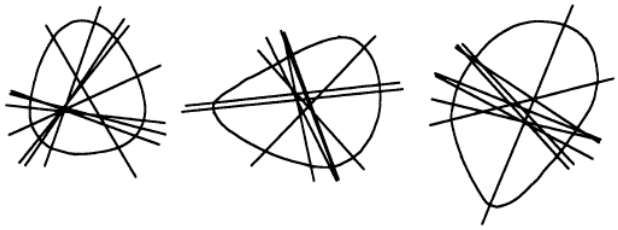
La main vers l'objet. Le geste de saisie d'un objet se décompose en deux phases ; une phase de transport de la main à proximité de l'objet, et une phase de formation de la pince de saisie. L'observation au ralenti de l'ouverture entre le pouce et l'index montre une ouverture maximale qui se situe aux 2/3 de la composante de transport. Puis une phase de fermeture de la pince s'amorce pour s'ajuster à la taille de l'objet en fin de mouvement (d'après Jeannerod, 1998).



Courbes de la vitesse du poignet en fonction du temps (en vert) et de l'écartement des deux doigts (en rouge). Noter l'écartement progressif jusqu'à un maximum, puis la fermeture autour de l'objet. (d'après Jeannerod, 1998).

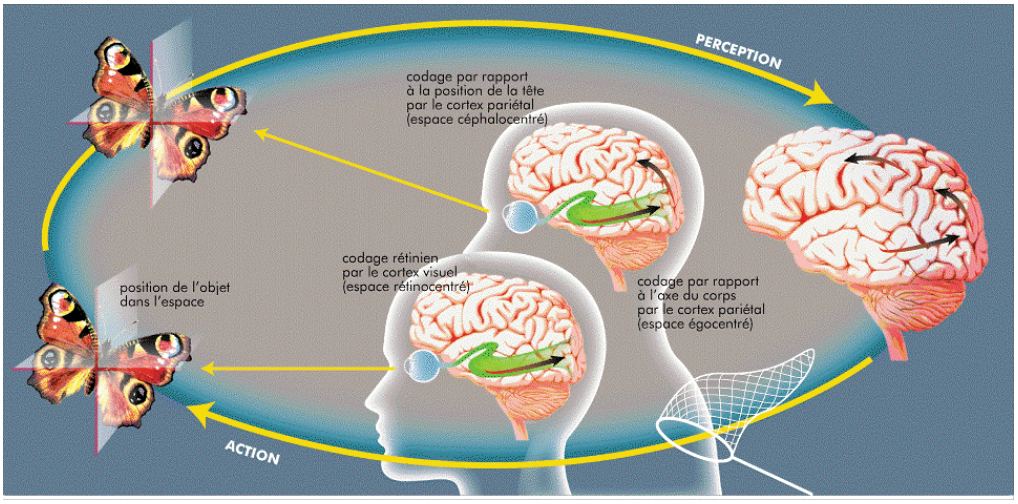
Il est important de noter que le mouvement d'atteinte doit s'arrêter à l'instant précis où les doigts se referment sur l'objet (ce qui nécessite le calcul et la prise en compte des vitesses de déplacement de l'objet et de la main). Cette synchronisation des deux composantes doit anticiper le contact : le mécanisme de transport de la main ne peut pas attendre le contact avec l'objet (le signal tactile) pour interrompre sa course. Plus de 70 millisecondes seraient en effet nécessaires pour qu'un tel signal donne lieu à une commande motrice. Dans ce cas, la main dépasserait l'objet et la saisie échouerait. Enfin, l'atteinte et la saisie nécessitent également la coordination de nombreux degrés de liberté des différents segments corporels impliqués dans l'exécution du mouvement.

L'approche computationnelle (ou calculatoire, supposant que le cerveau effectue un certain nombre d'opérations et notamment de calculs) formule l'hypothèse que le système visuel possède la capacité de coder certains attributs ou propriétés intrinsèques d'un objet (la taille, la forme) dans un repère (un système de coordonnées, un invariant directionnel) objectif ou allocentré (référé à l'espace environnant). Ce système de traitement "sémantique" de l'information visuelle permettrait l'élaboration d'une représentation perceptuelle consciente de l'objet et la configuration de la main (force de la prise) en fonction de la forme de l'objet et de sa taille, quelle que soit sa position dans l'espace. Il faut pour cela que les doigts se positionnent sur l'objet selon un axe (appelé axe d'opposition) qui passe par son centre de gravité et où sont appliquées les forces qui permettent de prendre et de déplacer l'objet (ou d'en interrompre la trajectoire). Un mauvais choix entraînerait inévitablement une prise instable et la perte de cet objet.



Lignes de saisie (joignant les points où l'index et le pouce établissent en premier le contact avec la forme de l'objet). Les orientations différentes avec lesquelles chaque forme a été présentée ont subi une rotation de façon à ce qu'elles soient alignées. Aucune distinction n'apparaît ici entre les points de contact du pouce et de l'index. Goodale & Humphrey, 1998.

Mais pour atteindre et saisir un objet, il est nécessaire de calculer sa position spatiale par rapport au corps. Le système visuel utiliserait alors également un référentiel subjectif ou égocentré (référé à l'axe du corps du sujet), mettant en jeu un traitement "pragmatique" de l'information visuelle afin de transporter efficacement la main au voisinage de l'objet.

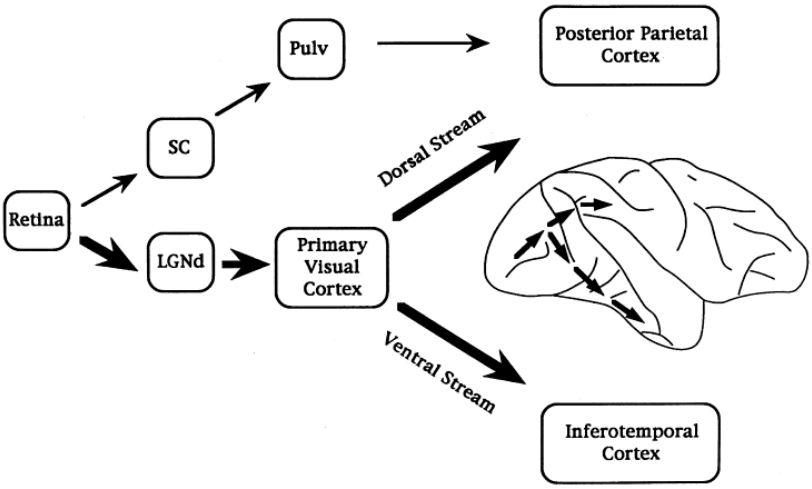


De l'objet au cortex et du cortex à l'objet. Les coordonnées spatiales de l'objet sont codées par la rétine (système rétinocentré). Le cerveau doit aussi tenir compte de la position de l'œil dans l'orbite (transformation de coordonnées (système céphalocentré). Il faut enfin que le cerveau tienne compte de la position de la tête par rapport au corps (système égocentré) : deuxième transformation de coordonnées. Les choses sont en réalité plus compliquées, parce que le cerveau doit sans doute aussi coder directement la position de l'objet par rapport à la tête. Et puis il faut coordonner l'action. (d'après Boussaoud, 1998).

A) Les voies mises en jeu

La question qui se pose est celle de l'identification des circuits mis en jeu lors d'un geste de préhension par exemple. L'étude de dysfonctionnements ou de cas présentant des difficultés à réaliser ce type de tâches à permis de mettre en évidence l'existence de lésions touchant différentes zones du cortex et entraînant des incapacités fonctionnelles soit pour atteindre et saisir un objet, soit pour identifier les objets qui leur sont présentés (par contre, ces patients n'éprouvent aucune difficulté pour atteindre et saisir des objets qu'ils sont pourtant incapables d'identifier).

A partir du cortex visuel primaire, les informations visuelles traitées dans les différents modules sont distribuées dans de nombreuses aires visuelles distinctes (on en dénombre actuellement plus de 30). A partir de là, selon une conception proposée au début des années quatre-vingt, la division fondamentale du système visuel serait réalisée par deux grandes voies corticales permettant le transfert des informations visuelles. La première de ces voies (la voie ventrale) distribue les efférences des deux aires V1 et V2 vers les aires extra striées occipito-temporales (projections dans le lobe temporal inférieur), la seconde (voie dorsale) distribuant ces efférences vers les aires extra striées occipito-pariétales (projections dans le lobe pariétal postérieur).

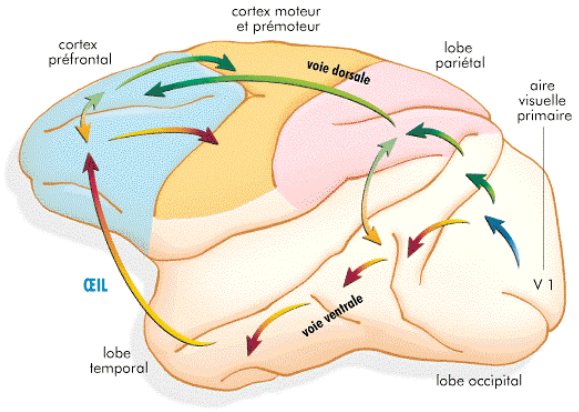


Routes principales par lesquelles l'entrée rétinienne atteint les voies dorsales et ventrales. Le diagramme du cerveau de macaque montre les routes approximatives des projections cortico-corticales depuis le cortex visuel primaire jusqu'aux cortex pariétal postérieur et inférotemporal respective-ment. Goodale, 1998.

La voie inférieure ou ventrale, projetant sur le cortex inféro-temporal, semble spécialisée dans l'identification et la reconnaissance des différentes caractéristiques des objets (avec des neurones sensibles non seulement à la forme et à la couleur de ceux-ci, mais aussi à des caractéristiques sémantiques : usage, degré de familiarité). Le cortex inféro-temporal intervient dans des aspects psychologiques importants de la perception visuelle, l'attention et la mémoire. Dans des tâches de mémoire à court terme par exemple, certains neurones du cortex inféro-temporal vont continuer à répondre pendant la période durant laquelle le stimulus visuel complexe n'est pas physiquement présent et doit être mémorisé.

La voie supérieure ou dorsale, projetant sur le cortex pariétal postérieur, semble spécialisée dans l'exécution d'actions dirigées vers les objets (avec des neurones sensibles à leur localisation spatiale et à certaines caractéristiques tridimensionnelles, comme la taille, la forme). Elle aurait pour fonction de gouverner l'envoi des commandes motrices, c'est-à-dire d'accomplir cette transformation visuo-motrice déjà évoquée. Les régions du lobe pariétal interviennent donc dans l'attribution de relations spatiales, dans la perception du mouvement (de nombreux arguments peuvent être avancés en faveur de l'idée selon laquelle le mouvement est traité dans des régions cérébrales spécifiques, comme par exemple la partie postérieure du cortex pariétal). Les neurones de l'aire médiane temporale sont tous sélectifs à la vitesse et à la direction du mouvement. La lésion de cette aire entraîne des déficits spécifiques dans la perception du mouvement, les performances visuo-motrices. La fonction du cortex pariétal postérieur ne se limite pas à l'analyse du mouvement. Chez l'homme, des lésions de cette région produisent une désorientation visuelle, avec pour conséquence l'impossibilité d'atteindre correctement une cible et des difficultés à se déplace sur un parcours jalonné d'obstacles. Ces patients voient mais ne peuvent bien localiser.

Deux voies distinctes mais coordonnées. Les informations lumineuses en provenance de l'objet sont transformées par l'œil (non représenté ici) en influx nerveux. Les informations partent de l'aire visuelle primaire et suivent deux voies de fibres nerveuses, une voie ventrale et une voie dorsale. La voie ventrale semble spécialisée pour reconnaître l'objet, la voie dorsale pour agir sur cet objet. Tout le problème est de savoir comment ces deux voies interagissent et sont coordonnées (d'après Jeannerod, 1998).



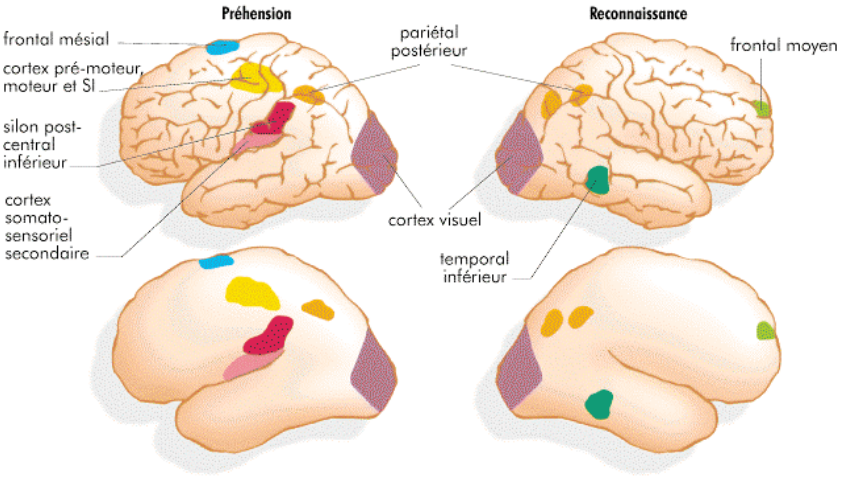
La voie dorsale répondrait donc à la question : où ? et la voie ventrale à la question : quoi ? Dans cette conception, les deux voies corticales se distingueraient par la nature des informations visuelles admises à l'entrée. L'intégrité des circuits constituant la voie ventrale assure la conscience visuelle des objets. Mais l'interruption de ces circuits n'altère pas la capacité d'agir manuellement sur des objets. Les deux dissociations neuropsychologiques complémentaires que sont l'agnosie visuelle et l'ataxie optique indiquent en effet que la perception visuelle consciente et l'action efficace sur des objets représentent deux sous-systèmes séparables du système visuel humain.

B) Actions coordonnées des deux voies

Au début des années 1990, il a été proposé par certains auteurs de mettre l'accent sur la différence entre le rôle fonctionnel ou le résultat des opérations accomplies respectivement par les voies dorsale et ventrale. Selon eux, la voie ventrale serait consacrée à la perception et à la reconnaissance des objets grâce auxquelles un individu peut stocker des informations sur eux dans sa mémoire et raisonner à leur sujet. A la séparation entre un système de localisation et un système d'identification succède donc désormais la séparation entre un système gouvernant l'action dirigée et un système d'identification. On peut alors supposer que des circuits neuronaux distincts, responsables de deux déficits cognitifs séparés, servent de substrats à deux fonctions cognitives distinctes. L'ataxie optique et l'agnosie visuelle forment justement une double dissociation de ce genre (bien que ce dogme, qui apparaît limité, ait été remis en question dans les années récentes – voir notamment Rossetti & Pisella, 2000).

Pourtant, entre la vue et la saisie, tout se passe au contraire comme si la perception et les différentes modalités de l'action étaient intégrées dans un même comportement déclenché par la vue de l'objet dans le but de s'en saisir. En fait, il serait erroné d'attribuer des fonctions aussi

globales que la « vision pour la perception » ou « vision pour l'action » respectivement à la voie ventrale et à la voie dorsale. On sait bien maintenant que la perception se distribue sur les deux voies classiques du système visuel.



Activation cérébrale comparée lors d'une tâche visuo-motrice (à gauche, saisie) et lors d'une tâche perceptive (à droite) portant sur les mêmes objets. La tâche visuo-motrice, effectuée avec la main droite, implique uniquement la voie dorsale, tandis que la tâche perceptive implique la voie ventrale (cortex inféro-temporal) et la voie dorsale (d'après Jeannerod, 1998).

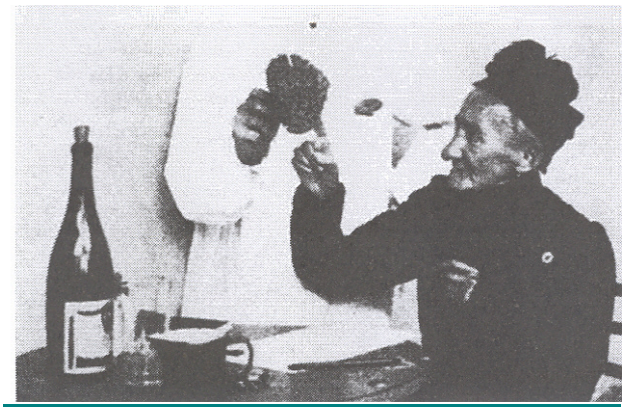
L'analyse du mouvement de préhension semble révéler l'existence de stratégies et de synergies impliquant l'ensemble des canaux concernés. Les données les plus récentes ont mis en évidence l'intervention de mécanismes plus globaux (planification, programmation) prenant en compte le but d'une action ainsi que l'ensemble des différents éléments mis en jeu dans cette action. Une telle notion n'est pas en contradiction avec celle de canaux distincts pour chaque opération élémentaire. Mais elle suggère l'existence d'un mécanisme complémentaire de contrôle descendant (*top-down*) sur les différentes étapes de la transformation visuo-motrice. Cette coordination pourrait être le fait de structures cérébrales recevant des informations sur le déroulement des gestes, comme le cervelet par exemple. Mais elle pourrait aussi résulter de l'organisation même des réseaux qui relient les différentes aires cérébrales mises en jeu lors de chacune de nos actions.

C) Pathologies des coordinations visuo manuelles

c1) l'agnosie visuelle

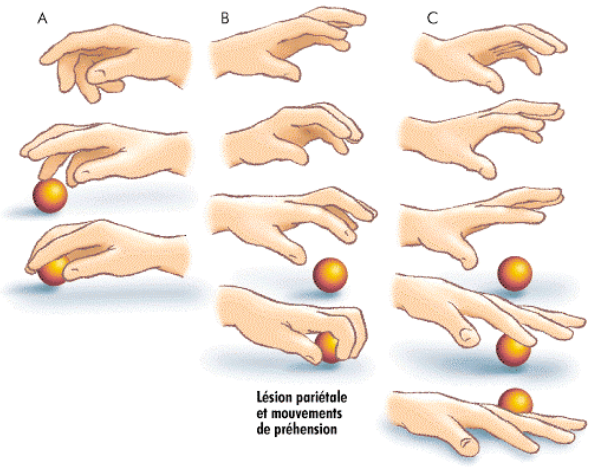
Une patiente atteinte d'agnosie visuelle (*a* privatif et racine grecque *gnôsis* signifiant connaissance) à la suite d'une lésion occipito-temporale bilatérale s'avère incapable de discriminer la forme des objets et donc de les identifier. Elle semble capable de reconnaître la forme de certains objets familiers aisément identifiés grâce à leur couleur et à leur texture, mais reconnaît très mal la forme d'objets géométriques arbitraires (lettres de l'alphabet, dessins en noir et blanc, incapacité à distinguer un cercle d'un triangle). Par contre, le transport

de sa main vers un objet, l'orientation de cette main et sa disposition particulière nécessaires à la saisie ne posent aucun problème. L'absence de conscience visuelle de la forme des objets qui l'environnent n'affecte pas la capacité d'effectuer efficacement des actions dirigées vers les objets qu'elle ne perçoit pas consciemment.



Agnosie visuelle. Cette malade ne reconnaît pas l'objet qui lui est présenté visuellement (ici une tranche de pain). Elle le reconnaît immédiatement en utilisant le canal tactile (d'après Poppelreuter, 1913).

c_2) l'ataxie optique



Dessins reconstitués à partir d'un film. A gauche, la main droite, du même côté que la lésion, effectue un mouvement normal d'atteinte et de prise : la main épouse la forme de l'objet. Au centre et à droite, la main gauche, contralatérale à la lésion, est imprécise, s'adapte mal ou pas du tout à la forme de l'objet. (d'après Jeannerod, 1998).

A contrario, les sujets privés de la capacité normale d'atteindre et de saisir des objets entre les doigts de la main souffrent d'ataxie (de *a* privatif et de la racine grecque *taxis* ; ce terme désigne la privation de la coordination motrice) optique provoquée par des lésions pariétales altérant la voie dorsale ou par des lésions qui interrompent l'entrée des informations provenant des aires visuelles primaires dans le circuit de la voie dorsale. Ceci n'exclut pas la possibilité de transporter la main à proximité de l'objet à saisir, d'identifier et de nommer des objets présentés dans le champ visuel. Ce n'est pas la localisation spatiale qui est défaillante, mais la prise en compte des caractéristiques intrinsèques de l'objet (forme, taille, orientation).

Incapables de donner à leurs doigts la conformation permettant de pincer l'objet, ces sujets peuvent cependant en estimer la taille par l'écart entre le pouce et l'index. Ce qui est impossible dans une tâche de préhension devient donc possible dans une tâche de jugement perceptuel.

IX- Un autre aspect du contrôle moteur : les désordres du mouvement volontaire

Les praxies peuvent se définir comme les mouvements plus ou moins élaborés, plus ou moins habiles que l'individu met en œuvre au quotidien dans les différents domaines (travail, activités physiques et sportives, etc.). C'est un système fonctionnel complexe (Hecaen, 1978) qui intègre un grand nombre de facteurs ou de paramètres. Ceux-ci sont dépendants des structures corticales ou sous-corticales. La carence ou la lésion de l'une ou l'autre de ces structures peut expliquer les différents désordres moteurs.

Le terme apraxie a été créé par Gogol en 1873, à partir du grec *apraxia*, qui signifie inaction. Selon la classification de Liepmann (1902), il est possible de définir l'apraxie comme un désordre du mouvement volontaire, résultant de différentes perturbations au niveau du système moteur (de l'expression motrice). Il faut préciser de ce point de vue que ces perturbations de l'activité gestuelle ne s'expliquent "ni par une atteinte motrice, ni par une atteinte sensitive ni par une altération intellectuelle" (Déjerine, 1914, cité par Gil, 2003). Pour Signoret et Worth (1979, cité par Eustache et Faure, 2000) "l'apraxie est un trouble acquis de l'exécution intentionnelle d'un comportement moteur finalisé consécutif à une lésion cérébrale fixe.

En accord avec Liepmann, on distingue généralement trois formes principales d'apraxie gestuelle : l'apraxie idéatoire, l'apraxie idéomotrice et l'apraxie mélokinétique ou motrice. La réalisation d'un geste suppose en effet, selon cet auteur, plusieurs étapes : la conception globale ou générale d'un projet, impliquant une représentation de ce projet, et dont l'altération se traduit par l'apraxie idéatoire. Puis, la transmission de ce projet, dont la remise en cause se traduirait par l'apraxie idéomotrice (même si la conception idéatoire initiale est correcte), et enfin une perturbation ou une désorganisation des activités musculaires devant réaliser le mouvement (apraxie motrice).

L'apraxie idéatoire se traduit par la difficulté pour le sujet de réaliser une action ou une suite d'actions finalisées, ceci donnant lieu à des comportements jugés absurdes. Le sujet, incapable de manipuler des objets réels parfaitement identifiés, se retrouve dans l'incapacité la plus totale de trouver une cohérence entre son action et le but qu'il s'est fixé. Tout se passe comme s'il perdait le schéma de son action, comme s'il se trouvait dans l'impossibilité de se

représenter exactement l'ordre de succession des différentes actions motrices envisagées, alors que celles-ci sont, d'un point de vue strictement moteur, correctement réalisées. Elle est conçue comme un trouble de l'association entre un concept, en l'occurrence celui de l'objet, et le geste qui lui correspond. C'est donc vraisemblablement un trouble ou un déficit de l'association. Par exemple, le fumeur va placer l'allumette entre ses lèvres et frotter la cigarette sur le grattoir. Selon les auteurs, cette apraxie idéatoire est interprétée comme une perturbation du plan général de l'action ou comme une trouble de l'organisation séquentielle de cette action (Eustache et Faure, 2000).

L'apraxie idéatoire s'observe lors de lésions étendues de l'hémisphère gauche ou des deux hémisphères cérébraux (partie postérieure de l'hémisphère gauche et plus précisément de la région temporo-pariétale), suite le plus souvent à un accident d'origine vasculaire ou à la présence d'une tumeur cérébrale. C'est une affection qui est fréquemment présente dans la maladie d'Alzheimer, ainsi que chez les malades déments.

L'apraxie idéomotrice concerne les gestes simples, n'impliquant pas la manipulation d'objets réels. Ces gestes simples, répétés quotidiennement et peu à peu automatisés, peuvent ne pas laisser apparaître ce désordre. On a ainsi recours le plus souvent à l'examen clinique pour mettre en évidence le phénomène apraxique (il est demandé au sujet, à la suite d'une consigne verbale ou d'une imitation, de réaliser un geste donné, que celui-ci soit non significatif – former un anneau avec les pouces et les index, etc. - ou significatif – cf. *infra*). Contrairement à l'apraxie idéatoire, l'apraxie idéomotrice n'affecte pas le plan général de l'action. Mais, si ce plan général est conservé, ces gestes simples isolés ou des séquences gestuelles particulières montrent des perturbations. Le sujet ne peut atteindre le but qu'il s'est ou qu'on lui a proposé, bien qu'il soit parfaitement conscient de ce but. Il existe en quelque sorte "une perte des souvenirs cinétiques propres" à un segment ou à un membre (Hecaen, 1978). Certains gestes ne peuvent ainsi être réalisés sur ordre, d'autres gestes apparaissent inadaptés (parapraxies), d'autres fois encore le sujet persévère dans la réalisation de ce geste inadapté ou tente vainement de le corriger. Cependant, placé dans des conditions particulières ou dans un contexte familier (entrée dans une église par exemple), le geste (signe de croix) est exécuté de façon automatique, comme s'il était déclenché automatiquement par le contexte environnant (ce qui laisse supposer l'importance de la dimension émotionnelle dans la réalisation correcte du geste). L'apraxie idéomotrice peut n'intéresser que le membre supérieur gauche (chez le droitier – l'atteinte de l'extrémité droite ne peut être observée que chez les gauchers) ou bien être bilatérale. Elle résulte le plus souvent

de lésions pariétales gauches. L'apraxie idéomotrice unilatérale gauche est observée en cas de lésions calleuses (corps calleux) : les consignes verbales reçues par l'hémisphère gauche, ne peuvent être transmises à l'aire pré motrice de l'hémisphère droit. Des lésions frontales font apparaître une difficulté dans l'imitation des gestes et dans la réalisation de gestes séquentiels (Gil, 2003). Une déconnexion interhémisphérique peut également entraîner une apraxie diagonistique, où les deux mains semblent présenter des comportements antagonistes (ce n'est en effet pas une simple incoordination de deux membres en action, mais l'action opposée de deux membres visant normalement à un même but). Quoi qu'il en soit, dans ces différents aspects apraxiques, "un soin particulier doit être porté dans la description de la nature d'une atteinte unilatérale de la gestualité, des asymétries non prévues par les schémas classiques pouvant parfois se révéler" (Tzavaras, 1978).

Enfin, l'apraxie motrice (apraxie motrice et apraxie mélokinétique, *i.e.* concernant les mouvements des membres, sont souvent confondues) affecte la réalisation des mouvements rapides et précis, non isolés. Elle ne perturbe généralement qu'un segment musculaire de façon unilatérale. Elle peut tout aussi bien concerner les mouvements volontaires comme les mouvements automatiques. Le sujet éprouve ainsi parfois des difficultés importantes à réaliser des mouvements spécialisés ou acquis au cours de l'apprentissage. Il se comporte alors comme s'il réalisait ces mouvements pour la première fois. Il n'existe pas de dissociation automatico-volontaire comme dans l'apraxie idéomotrice. Pour ces raisons, cette apraxie est considérée par différents auteurs comme un trouble moteur résiduel, apparaissant par exemple au décours d'une hémiplégie, et non comme une réelle apraxie. Les lésions à l'origine de cette affection se situent généralement dans le lobe frontal et notamment à proximité de l'aire de Broca ou de son homologue droit.

Il semble parfois difficile d'opérer une nette distinction entre les déficits gnosiques et les troubles praxiques, tant ils apparaissent intimement liés.

Il existe d'autres types d'apraxies, comme l'apraxie de l'habillage (due le plus souvent à une lésion de la région postérieure de l'hémisphère droit, parfois à une hémiasomatognosie ou perte de connaissance de la moitié de son corps par le sujet, comme dans le cas des héminégligences) ou le sujet se révèle incapable de s'habiller correctement, l'ordre ou le lieu des vêtements n'étant plus correctement conceptualisé, ou bien encore l'apraxie de la marche, se traduisant pour le sujet par l'incapacité mobiliser correctement ses membres inférieurs (par exemple, mobiliser

ceux-ci alternativement). Les affections frontales peuvent expliquer ces apraxies, observés parfois chez les sujets âgés et les personnes démentes.

Les classifications des apraxies ont été remises en question (Eustache et Faure, 2000), et la notion de troubles de l'organisation des comportements moteurs finalisés tend à se substituer à ce terme. Un certain nombre de modèles ont été proposés, prenant en compte par exemple la représentation de l'action d'un côté et la réalisation effective de cette action d'un autre côté. Une classification plus ancienne, fondée sur la physiologie (Luria, 1966) prend en compte le fait que tout mouvement dépend pour son exécution d'un flux d'informations kinesthésiques ou cutanées. En cas de déficience (organe lésé ou autre) de ces afférences, il est alors difficile voire impossible d'intégrer les différentes informations sensorielles et d'organiser le mouvement.

X- D'autres conceptions de l'apprentissage et du contrôle moteur

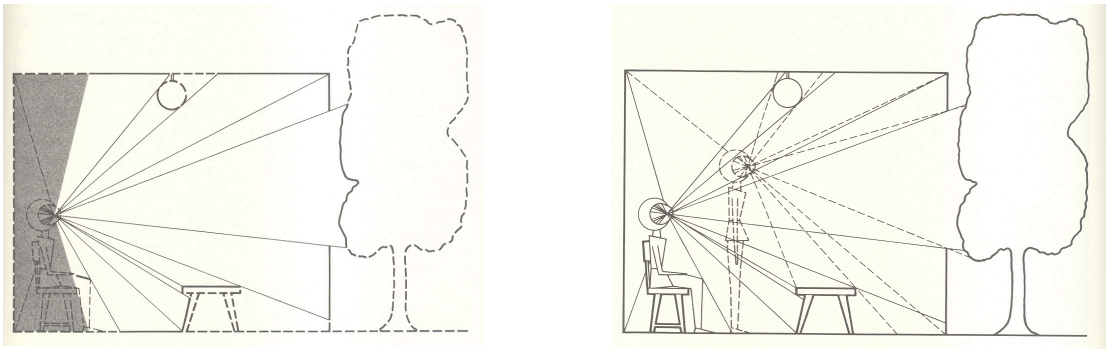
Historiquement, la plupart des travaux portant sur l'apprentissage moteur se sont fondés sur les notions de programme moteur, de schéma (Schmidt, 1975), de représentation, de modèle interne. Dans cette conception, l'apprentissage moteur implique que l'individu développe un certain nombre de schèmes, construise des règles de paramétrisation du mouvement (angles, vitesse, raideur, etc.) lui permettant de reconstruire le mouvement lorsque cela s'avère nécessaire. Ce qui est appris n'est pas le mouvement en soi, mais l'habileté à le construire en fonction des contraintes de la tâche. Toutefois, le rôle de l'environnement n'est que peu pris en comptes dans ce type de théories issues des sciences cognitives.

La présupposition de l'existence de programmes moteurs a fait l'objet d'un certain nombre de critiques. Ceci suppose en effet un nombre très (trop) important d'opérations et de contrôle direct par les différentes structures du système nerveux central. Un des reproches très fréquemment avancé évoque par exemple la nécessité de l'existence d'une représentation explicite de chaque mouvement au niveau du système nerveux central, ce qui pose de façon abrupte la question des capacités de stockage des centres supérieurs. Plus généralement, un des reproches adressés à l'approche cognitive du contrôle moteur porte sur la gestion, dans ce cadre précis, d'un nombre très élevé de variables dont le contrôle particulier apparaît difficilement concevable. Il en est ainsi par exemple des nombreux degrés de liberté que le système doit contrôler, maîtriser, etc.

A) L'approche écologique

Pour certains auteurs (Béguin & Clot, 2004), l'approche écologique (Gibson, 1950, 1966, 1979) est issue d'une remise en question de la validité de la démarche expérimentale pour rendre compte de la pensée dans les situations rencontrées quotidiennement. La théorie écologique se fonde sur les relations qu'entretient le sujet avec son environnement, mais Gibson ne se situe pas dans une perspective calculatoire, pas plus que dans la nécessité d'un traitement cognitif. Selon cet auteur, le cerveau ne code pas, ne calcule pas des paramètres complexes. "Pourquoi" dit-il "chercher une explication soit dans l'esprit soit dans le corps ? C'est une fausse dichotomie". Gibson propose d'abandonner le dogme kantien selon lequel "les percepts sans concepts sont aveugles". Si le système fonctionne toujours selon des lois de contrôle comme dans le cas de l'approche cognitive, ces lois de contrôle proviennent, au contraire, des informations issues de l'environnement et disponibles directement pour le sujet. Les lois soulignent la relation forte existant entre les aspects perceptifs et moteurs et jouent un rôle déterminant dans le contrôle moteur.

Le cadre théorique proposé par Gibson (1979) est celui de la perception directe par le sujet, l'environnement présentant différentes caractéristiques invariantes. La perception ne peut s'expliquer, écrit-il, en termes de communication. On ne peut fournir aux autres des informations sur le monde à moins d'avoir perçu le monde, et l'information disponible pour notre perception est radicalement différente de l'information que nous transmettons. Pour Gibson, la perception n'a pas besoin de reposer sur l'existence de modèles ou de représentations internes du monde - construits par le sujet au cours de ses différentes expériences, le dispositif optique ambiant (c'est-à-dire qui doit complètement entourer un point donné ou une situation particulière dans l'espace) contenant déjà dans la structure de la lumière suffisamment d'information détaillée que le sujet va prélever (*pick-up*) directement.



Deux dispositifs optiques différents selon la position du sujet (Gibson, 1979)

Ce dispositif, même s'il n'est pas reconnu par la physique, rappelle Gibson, représente selon lui une meilleure base pour la compréhension de la vision en général que le concept d'image rétinienne. Il n'y aurait ici nul besoin d'une organisation particulière puisque l'information est fournie au sujet au travers de la stimulation de sa perception par un certain nombre de messages portés par l'environnement (notamment la possibilité ou la faisabilité d'un certain nombre d'actions). Au contraire d'une approche cognitiviste où l'information doit être traitée, l'information est en quelque sorte donnée au sujet. La perception n'est pas une réponse à un stimulus, mais l'action de prélever une information. Comme dans la théorie de la forme, l'expérience perceptive du sujet est essentiellement déterminée par la structure du monde physique. Le couplage perception-action prend ici une dimension fondamentale (la perception nourrit l'action par l'information qu'elle lui procure, l'action agit en retour sur la perception). Dans ce modèle, l'interaction sujet/environnement est permanente, et la perception émerge de cette interaction.

En résumé : *la théorie écologique (Gibson, 1950, 1966) se fonde sur les relations qu'entretient le sujet avec son environnement. Gibson ne se situe pas dans une perspective calculatoire. Selon lui, le cerveau ne code pas, ne calcule pas des paramètres complexes. L'information est en quelque sorte donnée, fournie directement au sujet au travers de la stimulation de sa perception par un certain nombre de messages portés par l'environnement. Le couplage perception-action prend ici une dimension fondamentale.*

a_1) La notion d'affordance

Dans la logique de sa théorie, Gibson a proposé une notion importante permettant de traduire l'adaptation immédiate du sujet à son environnement, la notion d'affordance. A partir du verbe *to afford* (procurer, fournir), il a créé le terme d'affordance (1979). Ce concept dérive des concepts de valence (pouvant être définie comme une charge attirante ou repoussante possédée par l'objet – cette valence peut dépendre du besoin qu'à le sujet de l'objet) et d'invitation proposés par la psychologie de la forme. Gibson se réfère d'ailleurs très explicitement à Koffka ("Chaque chose dit ce qu'elle est… un fruit dit mange-moi, l'eau dit bois-moi, le tonnerre dit effraie-moi, la femme dit aime-moi – Principles of Gestalt Psychology, 1935 - l'objet possède donc un caractère de demande : la boîte à lettres «appelle» la lettre) et à Lewin (ce psychologue connu pour ses travaux sur la dynamique de groupe a proposé le terme d'Aufforderungscharaketer, qui peut être traduit par un caractère d'invitation et la notion de valence s'opérationnalisant par des vecteurs correspondants qui pourraient être représentés par

des flèches attirant l'observateur ou le repoussant de l'objet), mais s'en différencie notamment par le fait de la permanence de l'affordance (présente, même en absence du sujet).

La notion d'affordance désigne la possibilité pour un organisme inséré dans un environnement d'effectuer une action finalisée. L'affordance possède une capacité suggestive d'action, ce serait en quelque sorte selon Gibson une invitation à l'action : « avec la théorie des affordances, la perception est une invitation à l'action et l'action est un élément essentiel de la perception. » Percevoir un objet, c'est percevoir les actions que cet objet suggère. La question qui peut en effet se poser lors de la première rencontre d'un sujet avec un objet donné est de savoir ce qu'il est bien possible de faire avec cet objet, comment l'utiliser. L'affordance de l'objet rend évidente pour le sujet la façon dont il doit l'utiliser, son aspect fonctionnel. Invariante, elle ne change pas en fonction des besoins du sujet. Elle demeure, même en l'absence de ce dernier. Perçue ou non, l'affordance existe, elle est par elle-même indépendante de la perception (le sujet peut ou non la percevoir, nous y reviendrons un peu plus bas). L'affordance d'un objet représente une combinaison particulière, originale, des propriétés de la matière dont est constitué l'objet et de sa texture, de sa surface. La discrimination de ces différentes caractéristiques par le sujet lui permettra la perception de l'affordance de cet objet. Comme le précise Gibson, « l'objet offre ce qu'il offre parce qu'il est ce qu'il est. » On ne saurait être plus clair.

La notion d'affordance implique selon Gibson (1979) « la complémentarité entre l'animal et son environnement. Elle est reliée au concept de niche dans lequel le plus important n'est pas où vit l'animal mais comment il y vit. Cette niche pourrait représenter un ensemble d'affordances. La niche implique une espèce particulière d'animal et l'animal implique une sorte particulière de niche. » Une affordance est souvent valable pour tous les membres d'une même espèce. Elle est d'égale manière une réalité de l'environnement et un fait du comportement. On peut imaginer de ce point de vue, rappelle Gibson, que les modifications apportées par l'homme à son environnement lui permettent de rendre plus disponible ce qui lui est bénéfique et moins ce qui lui cause du tort. Quoique.

Cette affordance doit être mesurée, appréciée par rapport à cet animal. Elle est relative à la taille du sujet (chez l'homme, par exemple, le filet de volley-ball, placé à une hauteur donnée ne possède par exemple pas les mêmes affordances selon les sujets). L'affordance d'un objet dépend donc tout autant des caractéristiques de cet objet que de celles de l'observateur (ou sujet). L'affordance est unique pour chaque sujet, elle ne possède une signification particulière

que pour lui. Des situations apparemment identiques sont très différentes selon les sujets parce qu'elles suscitent en fait des affordances différentes (l'herbe pour la vache ou pour le chat, un taillis pour un animal).

On pourrait sans doute relier cette idée à la théorie de la signification proposée par Von Uexküll (1965). Cet auteur pose la question du rôle joué par la tige d'une fleur sauvage dans les milieux suivants : 1) dans le milieu d'une jeune fille qui cueille des fleurs et en fait un bouquet multicolore qu'elle épingle à son corsage 2) dans le milieu de la fourmi qui utilise la texture unie de la surface de la tige comme un carrelage idéal pour aller vers sa nourriture dans les pétales de la fleur 3) dans le milieu de la larve de cigale qui perce le canal médullaire de la tige et l'utilise comme poste de pompage pour construire les murs fluides de sa maison aérienne 4) dans le milieu d'une vache qui arrache feuilles et tiges pour les introduire dans son large mufle et s'en nourrir. La même tige de fleur joue, selon le milieu, tantôt un rôle décoratif, tantôt un rôle de chemin, tantôt un rôle de pompe et enfin un rôle d'aliment. Ainsi, selon Von Uexküll, autant les porteurs de signification diffèrent quant à leur contenu dans les différents milieux, autant ils se ressemblent quant à leur structure. Par une partie de leur caractère ils vont devenir, pour le sujet du milieu, porteur de caractères perceptifs, par d'autres aspects ils seront porteurs de caractères actifs. Ainsi chaque action, avec sa composante perceptive et active, imprime sa signification à tout objet neutre et en fait dans chaque milieu un porteur de signification rattaché au sujet.

Les affordances ne se limitent pas aux objets, elles concernent également les substances, les lieux, les événements, d'autres personnes ou animaux. Elles sont de véritables perceptions non pas de propriétés physiques, mais des actions que ces propriétés physiques suggèrent ou permettent (nous ne percevons pas les caractéristiques des objets, mais les actions que ces objets permettent). "Pour nos ancêtres", nous dit Gibson, "un lapin qui approche "afforde" de la nourriture, alors qu'un tigre qui approche "afforde" de se faire tuer ou dévorer". Ces propriétés des objets ou des lieux (etc.) sont celles qui sont utiles à l'action, Gibson (1971, 1982) en propose une description et une classification :

- il est possible de marcher, rouler, grimper, monter, … sur une surface (un sol lisse et dur permet par exemple au sujet d'exercer ses talents dans le domaine de la glisse ou de la roule, alors qu'un milieu liquide et mouvant lui permet de surfer)

- certaines surfaces révèlent ou dissimulent (vitre opaque, glace sans tain, cachette pour l'enfant, …)

- les objets proposent différentes manipulations. Ils peuvent être portables ou non, saisissables ou non (*e.g.* posséder ou non une poignée, avec une saisie dépendant de l'empan de saisie), permettre de couper (et de se couper !), de frapper, percer, …

- les substances (le medium) peuvent, en fonction de leur nature et de leur consistance, engager le sujet à verser, barbouiller ou peindre (c'est parfois la même chose selon les talents), modeler, …

- les objets présentent des valences positives ou négatives (cf. *supra*).

Par ailleurs, le choix du référentiel ou de la modalité sensorielle mis en œuvre (le propos gibsonien porte essentiellement sur la modalité visuelle) pourrait, lorsque l'on prend en compte la singularité de l'individu et les caractéristiques de l'environnement, s'interpréter en termes d'affordance, c'est-à-dire de perception par l'organisme d'une utilité ou d'une possibilité. Ainsi, un espace vide deviendra pertinent pour le joueur de sport collectif (adresser la balle là où son équipier ne se trouve pas encore, les joueurs de rugby font cela très bien au pied maintenant), le son d'une course à ses côtés renseignera utilement le porteur de balle sur la possibilité de passer à son coéquipier.

Les affordances peuvent être indirectes, c'est-à-dire secondaires (ainsi, un sol dur permet la marche et la bipédie, entraînant la libération de la main pour le toucher, la saisie, etc.). Toujours différentes selon les sujets, elles dépendent de trois paramètres : la situation (perçue comme une boucle perception-action), l'organisme (celui-ci ne retient de l'environnement que le stimulus utile : l'air favorise ainsi le déplacement pour certaines espèces, mais évidemment pour d'autres) et l'environnement. Ces affordances mènent parfois, par la réalisation de l'action proposée, à d'autres affordances. Gaver (1991) propose pour cela la notion d'affordances séquentielles : l'action à partir d'une affordance conduit à une information indiquant de nouvelles affordances. C'est par exemple seulement la perception de l'affordance « actionner la poignée » liée à l'affordance « tirer la porte » que se découvre l'affordance « ouvrir la porte ». Se confirme de ce point de vue le caractère actif de la perception des affordances, fruits de l'activité exploratoire du sujet.

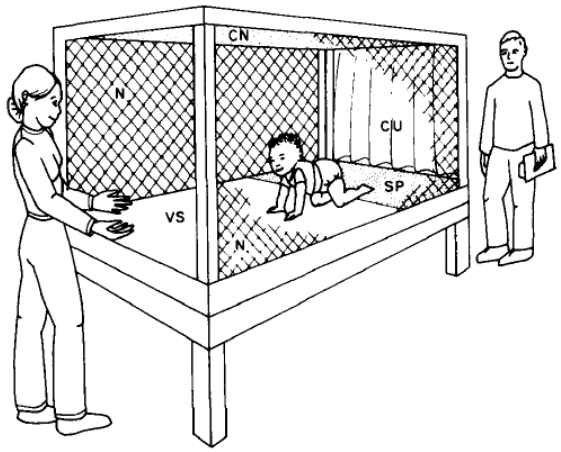
Les affordances peuvent être parfois non perçues ou mal perçues (l'absence d'opacité d'une vitre permet le contact rapproché et direct avec le marcheur distrait, le siège peut sembler solide et accueillant et ne pas l'être). La plupart des exemples relatifs aux affordances évoquent leur perception possible, avec une information disponible. Il arrive cependant que ce ne soit pas le cas, l'affordance étant alors cachée. L'évocation de ces différentes possibilités peut se

formaliser, comme dans le cas de la théorie de la détection du signal (Bonnet, 1986), par une matrice de perception :

		AFFORDANCE	
		OUI	NON
INFORMATION PERCEPTIVE	OUI	**Affordance perceptible**	**Fausse affordance**
	NON	**Affordance cachée**	**Rejet correct**

Séparer les affordances de l'information disponible permet la distinction entre les rejets corrects et les affordances perçues, cachées ou fausses. D'après Gaver, 1991.

La question se pose de l'existence d'affordances chez l'enfant. Les travaux de E.J. Gibson et al. (1987) montrent que ceux-ci appréhendent très tôt par exemple la traversabilité d'une surface en fonction de la perception de cette surface. Rappel de l'expérience.

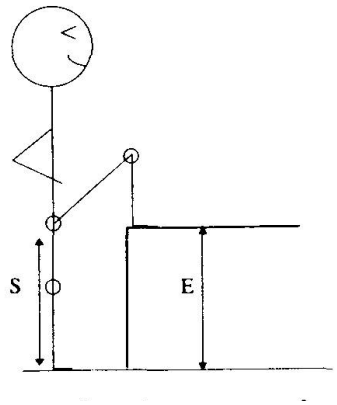


Protocole expérimental. La maman du sujet se trouve à l'extrémité de la surface à parcourir, un expérimentateur étant situé, caché, au départ. CU = rideau, VS = surface variable, CN = baldaquin, N = filets de protection, SP = plate-forme de départ. D'après Gibson, E. J. et al., 1987.

Différents domaines se sont emparés de cette notion d'affordance, et plus particulièrement le monde du design industriel, travaillant sur la relation homme-machine avec pour idée de rendre les affordances perceptibles aux utilisateurs. Boy et Morel (2004) évoquent à ce propos une esthétique des interfaces (Norman, 1999, établit clairement dans ces domaines, par exemple le domaine informatique, une différence entre une affordance perçue, qui relève le plus souvent selon lui d'une dimension culturelle, d'une convention ou d'une réaction et une affordance réelle – « quand vous apprenez à ne pas cliquer à moins d'avoir la forme appropriée du curseur, vous observez une contrainte culturelle ») et rappelant l'influence directe de cette esthétique sur

l'acceptabilité de ces interfaces : on n'évolue bien dans un environnement que lorsque l'on s'y sent bien. Cet aspect émotionnel permet le glissement ou le rapprochement vers une perspective cognitiviste, mettant en jeu les affects et les émotions du sujet dans sa relation à l'environnement. Au gré des propositions et hypothèses de différents auteurs, et pas toujours en accord avec Gibson, d'autres aspects se sont d'ailleurs progressivement ajoutés à cette notion d'affordances, comme (cf. Norman, 1988, 1999) la nécessité de prendre en compte la dimension culturelle du sujet (suivant les peuples et les cultures, les affordances ne sont pas les mêmes, au niveau des relations sociales intervenant dans les domaines sexuels, du combat, des jeux, des relations).

Dans le domaine sportif, la compréhension par l'attaquant de l'action du défenseur lui permet d'initier une réponse ou une prise d'initiative appropriée (dribble, passe, etc.). Il en est de même au tennis ou au tennis de table où la lecture du service de l'adversaire ou du vol de la balle organise la réponse du receveur. Les invariants spécifiant les affordances sont directement détectés par le joueur au cours du mouvement. On pourrait ainsi multiplier les exemples.



D'après Temprado & Montagne, 2001

La mise en relation des paramètres individuels (morphologie, données biomécaniques, etc.) du sujet et de la situation permet d'envisager une action donnée. Les travaux de Warren (1984) portant sur la "montabilité" d'un escalier ont par exemple montré qu'à partir des seules informations visuelles le sujet pouvait déterminer le gravissement "normal" (sans s'aider de ses mains) d'un escalier ou s'il devait à un moment donné s'organiser de façon différente (mise en œuvre d'une forme de quadrupédie). Warren a mis en relation la longueur (L) des membres inférieurs et la hauteur (H) (respectivement S et E sur la figure) des marches (les hauteurs présentées sur diapositives aux sujets s'échelonnaient entre 50.8 et 101.6 cm). Warren a nommé pi (□), chiffre sans dimension, sans unité, ce rapport L/H, traduisant cette possibilité d'action, et a montré qu'il était en proportion constante de la hauteur des jambes des sujets et donc lié à leurs caractéristiques morphologiques. Cet auteur a montré également l'existence d'une perception directe par le sujet d'une hauteur de marche optimale, permettant la mise en œuvre d'un principe d'efficience dans le gravissement de cette marche relative à la taille des sujets.

D'autres travaux (Warren et Whang, 1987) ont porté sur la "passabilité" d'une ouverture. Le rapport était alors celui de l'ouverture et de la largeur des épaules du sujet. Les résultats montrent que si la valeur de ce rapport est inférieure à 1.30, celui-ci franchit l'ouverture en effectuant une rotation des épaules. Par contre, une valeur supérieure à 1.30 n'amène pas de rotation des épaules. Ces deux exemples soulignent l'existence de lois de contrôle entre la perception et l'action, ils rappellent également l'existence de seuils ou de valeurs critiques à partir desquels s'effectuent des modifications, des transitions dans les différentes modalités d'action des sujets.

Enfin, les affordances permettent de vérifier la présence des vicariances. Il faut nécessairement de nouvelles contraintes situationnelles pour qu'un processus vicariant, jusqu'ici masqué, soit activé et conduise à de nouvelles affordances (Ohlmann, 1990).

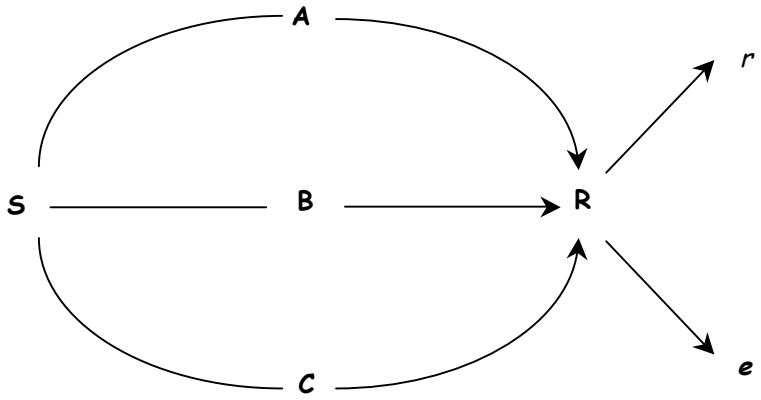
En résumé : *la notion d'affordance, proposée par Gibson (1979), désigne la possibilité pour un organisme inséré dans un environnement d'effectuer une action finalisée. Les affordances sont de véritables perceptions non pas des propriétés physiques des objets ou des lieux, mais des actions que ces propriétés physiques permettent.*

a_2) Une notion non définie par l'approche écologique : la notion de vicariance

Précisons tout de suite que cette notion n'apparaît pas dans l'approche écologique. Nous la mentionnons car selon certains auteurs (et notamment Ohlmann, 1990), affordances et vicariances sont liées. Ceci s'explique dans la mesure où les affordances définissent des points critiques (voir par exemple Pepper et al., 1994) à partir desquels les sujets adaptent leur comportement (cf. Warren & Whang, 1987) à la modification perçue d'une situation donnée. La notion de vicariance correspond à la capacité de l'organisme à substituer un système sensoriel à un autre avec la même efficacité.

Ce terme a été proposé par Reuchlin en 1978 dans le cadre de la psychologie différentielle. Le modèle différentiel des vicariances, se caractérise selon cet auteur, par deux propriétés principales : (i) chaque individu possède une partie, sinon la totalité du répertoire des processus susceptibles de traiter un problème déterminé ou de faire face à une même situation donnée (on parle parfois de catalogue et de rotation du catalogue, c'est-à-dire du choix de la réponse la mieux à même de faire face aux contraintes rencontrées, avec un facteur particulier permettant de choisir l'outil le mieux adapté : dans le cas de la chute, le moteur de rotation sera la posture, alors que dans le cas des canards – cf. figure *infra* -, c'est le rapport distance/vitesse) (ii) chez

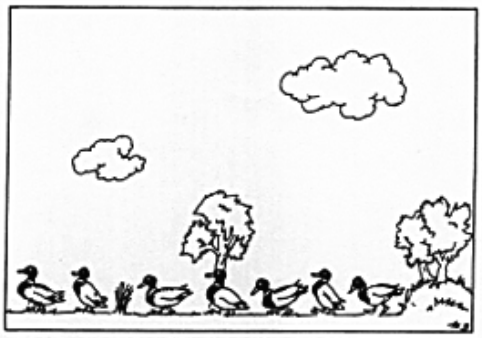
un individu donné, certains processus seraient plus facilement évocables que d'autres. La variabilité dans les hiérarchies d'évocabilité trouve son origine dans l'histoire personnelle des sujets et dans les éventuelles interactions entre cette histoire et leur patrimoine génétique. Pour un même individu, la hiérarchie d'évocabilité des processus varie avec les situations.



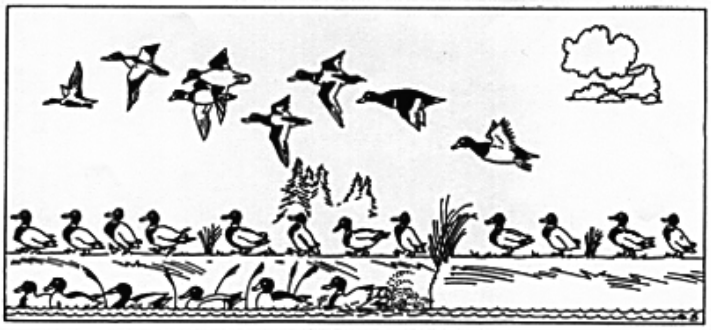
Forme générale du modèle proposé pour la vicariance. D'après Reuchlin, 1978.

Pour Ohlmann (1990), il est vraisemblable que cette concurrence entre des processus donnés ne vaut que pour résoudre une gamme de problèmes de difficulté définie, mettant en jeu des situations dites "clémentes" (*i.e.* avec des contraintes peu importantes) ou habituelles autorisant une certaine liberté au niveau du contrôle moteur dans le choix des différentes stratégies disponibles pour la réalisation d'un mouvement donné.

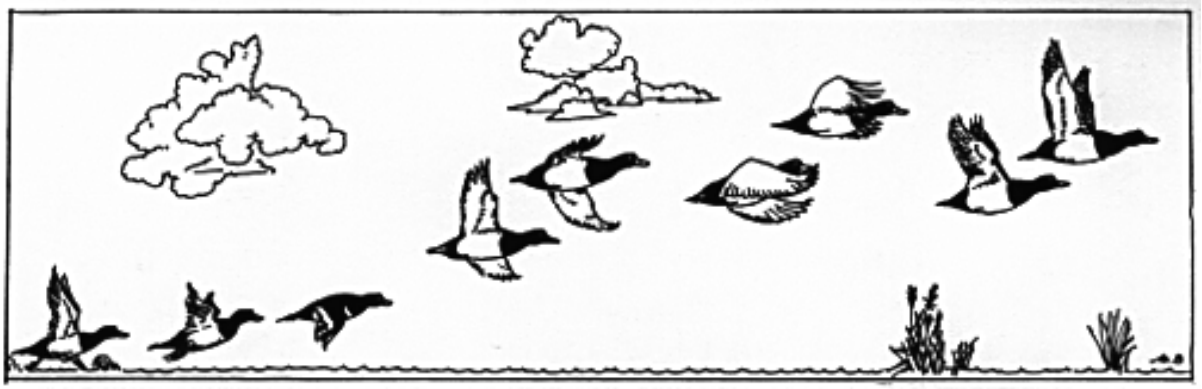
Le cerveau est donc susceptible de modifier de façon très flexible le système de référence qu'il utilise, en tolérant éventuellement une certaine marge d'écart par rapport à sa norme habituelle de fonctionnement, tout en continuant d'assurer l'exercice correct de la fonction. Cette sélection de référentiel s'opérerait de façon automatique. Chaque individu possède une sensibilité différentielle (nous sommes par exemple plus ou moins visuel) à l'égard de chacun de ces référentiels, et fait appel généralement plus facilement à un référentiel donné. Par exemple, dans des situations mettant en jeu des conflits entre la vision et la posture, on observe des différences interindividuelles quant à la perception de la verticale. Ces différences s'interpréteraient en termes de processus vicariants puisque parmi les référentiels principaux (visuel, gravitaire, égocentré), un seul des trois, suffisant et non nécessaire, serait sélectionné de manière stable par le sujet.



Une illustration possible de la notion de vicariance. Ici, le facteur qui crée les changements d'action est la distance. Les canards marchent sur une courte distance (en haut à gauche), nagent, marchent ou volent sur une distance moyenne (en haut à droite) et volent tous sur une longue distance (bas) (d'après Ohlmann, 1993).



Ces vicariances mettent en jeu ce que Gibson (1979) appelaient des affordances, c'est-à-dire des perceptions des actions que les propriétés de l'environnement permettent, ces affordances étant pilotées par l'environnement, la situation et les propriétés de l'organisme.



Approche très personnelle de la notion de vicariance (d'après Serre)

Certaines situations tendent à l'activation de processus particuliers. Il existerait, selon Reuchlin, un lien probable de causalité entre l'efficacité d'un processus et sa probabilité d'activation, le processus de vicariance étant d'autant plus efficace pour faire face à une

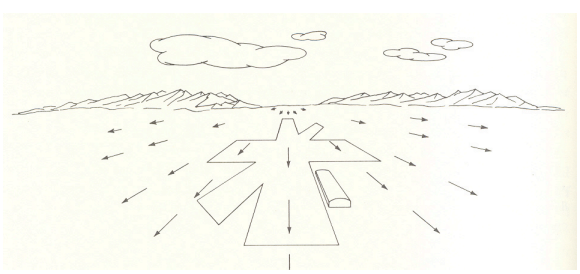
situation donnée que la résolution du problème posé fait appel de façon préférentielle au processus habituellement utilisé par le sujet.

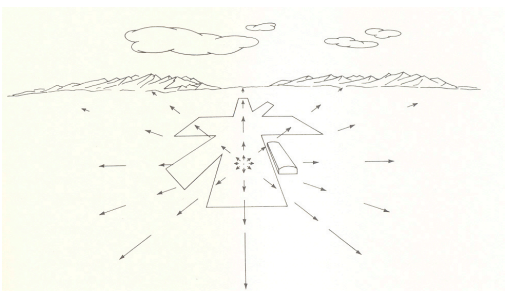
En résumé : *la notion de vicariance a été proposée par Reuchlin en 1978 dans le cadre de la psychologie différentielle. Ce n'est donc pas une notion qui appartient à la théorie écologique. Elle complète cependant la notion d'affordance. Elle correspond à la capacité de l'organisme à substituer un système sensoriel à un autre avec la même efficacité. Dans une situation particulière, un facteur donné va créer les conditions du changement. Ce terme rend compte des capacités de flexibilité du cerveau.*

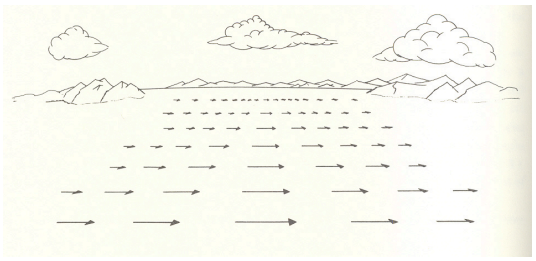
a_3) Le flux optique

Gibson s'est également intéressé à l'information contenue dans le flux optique. La perception par le sujet de son environnement est, selon cet auteur, activement stimulée par les rayons lumineux (des patrons d'énergie lumineuse) qui parviennent au sujet après réflexion sur les surfaces des différents objets de l'environnement (des gradients de différentes natures, gradient de texture, de disparité, de parallaxe, peuvent rendre compte de ces stimulations visuelles).

Chaque point de réflexion correspond à un patron d'énergie lumineuse particulier et constitue une configuration optique elle aussi particulière. L'ensemble de ces configurations optiques et leur modification, leur évolution au cours du temps définit le flux optique. Ce dernier, qui peut être caractérisé par un flux vectoriel (*cf. infra*), constitue un stimulus riche, hautement informationnel. Il nous donne par exemple des informations sur la distance séparant le sujet d'un objet particulier (une balle) ou d'un obstacle à franchir (barre ou planche du sautoir). Il fonctionne également selon un principe d'occlusion réversible, *i.e.* que ce qui est vu à un moment donné ne l'est plus à un autre moment, en fonction des placements et déplacements de l'observateur.

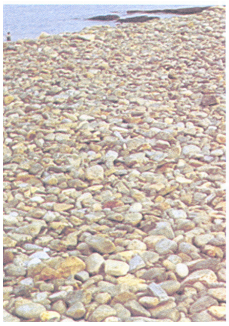


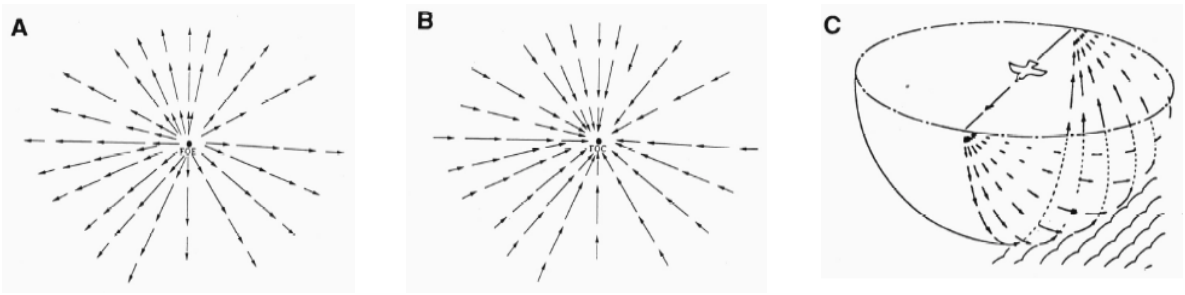




Différents flux optiques selon les actions et les déplacements des sujets (d'après Gibson, 1979).

Gradient de densité de texture. Rock, 2001

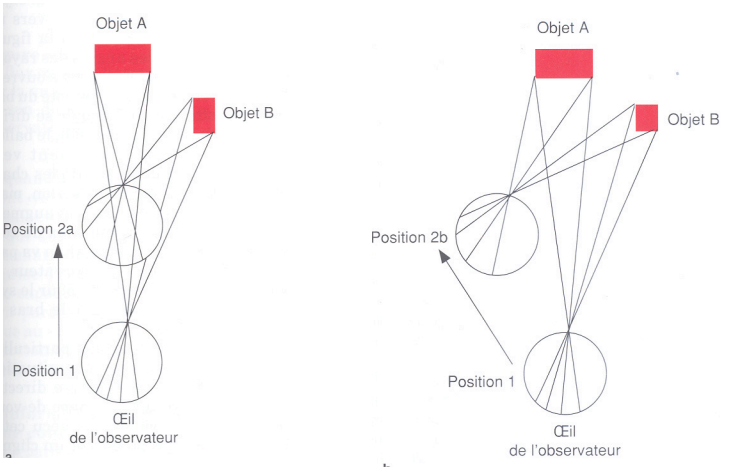




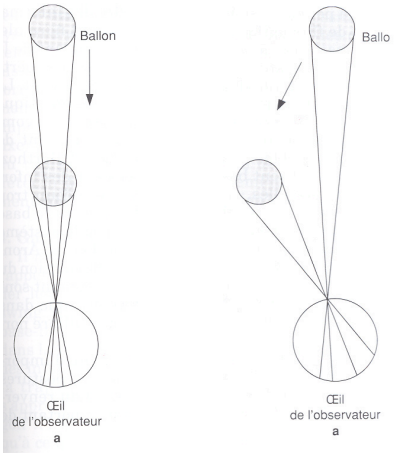
D"autres représentations des flux optiques découlant du déplacement d'un oiseau volant en ligne droite dans trois situations simples (sources Gibson 1979, Zanone, 1999).

Les illustrations ci-dessus montrent d'autres représentations des flux optiques. « Au centre des images A et B se situe le focus d'expansion du flux visuel permettant de spécifier la direction du déplacement. Dans le graphique A, il se meut en avant, si bien qu'il s'approche des éléments qui structurent le champ visuel. En conséquence, le flux visuel est en expansion. C'est un flux de ce type auquel tout conducteur et soumis, lorsque son automobile avance ou quand, dans le cas plus malheureux où cette dernière rencontre un obstacle, il va écraser son nez (ou pire) sur le pare-brise. Dans le graphique B, l'animal recule par rapport au champ, si bien que le flux est en contraction. Dans le graphique C est illustré le flux visuel résultant du vol d'un oiseau sur une surface plane, par exemple la mer. Il est à noter que tous les cas, il y a des points du flux qui sont invariants. Dans nos exemples, ils spécifient la direction dans laquelle s'effectue le déplacement de l'animal. Cela semble trivial à première vue, mais il est aisé d'imaginer l'utilité de tels points invariants : afin de maintenir le cap, il suffit de stabiliser leur position au centre du flux optique » (texte Zanone, 1999).

Les deux figures ci-dessous nous permettent de comprendre par deux exemples de quelle façon le flux optique, traduisant une modification de la structure de la perspective, permet au sujet de prendre des informations dans son environnement. Ces figures nous montrent que chaque objet de l'environnement se projette sur la rétine avec un angle ou une image (surface) particuliers. Au fur et à mesure du déplacement soit de l'objet ou de l'environnement (flux optique local) soit de l'observateur (flux optique global), cet angle et cette image (en termes d'expansion ou de réduction, l'image demeurant centrée sur la fovéa) varient de façon continue, véhiculant un flux informationnel.



Variations du flux optique lorsque le sujet se déplace (d'après Schmidt, 1993)



Variations du flux optique lorsque l'environnement se déplace (d'après Schmidt, 1993)

La vitesse du déplacement est détectée, perçue par la vitesse de variation de cet angle ou d'expansion de l'image projetés. La projection et le glissement sur la rétine des objets de l'environnement du sujet procurent à celui-ci des informations sur la direction et la vitesse de déplacement soit de l'environnement lorsque le sujet est immobile, soit du sujet lorsque celui-ci est en mouvement. Les différentes trajectoires de l'objet ou du sujet peuvent ainsi se déduire de ces informations fournies par l'environnement.

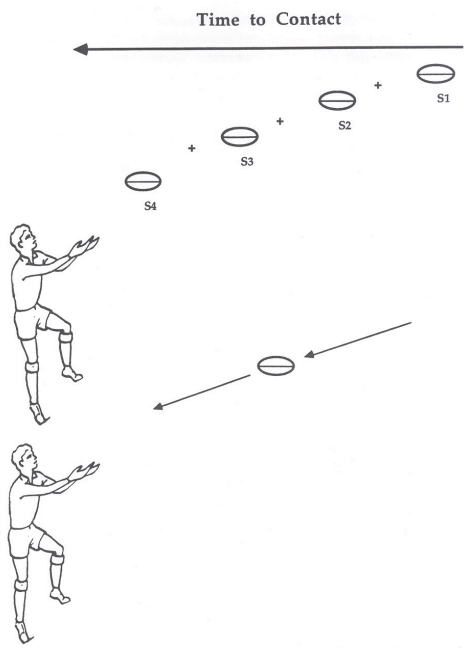
Le flux optique contient les informations dont le sujet a besoin pour contrôler son action sous forme d'invariants. Ceux-ci peuvent être de différentes natures (pour une revue plus approfondie, voir Temprado et Montagne, 2001). Les invariants structuraux informent le sujet sur la permanence des objets qui composent l'environnement (taille, position, etc.). « Prenons l'exemple d'un invariant structural particulier : la parallaxe de mouvement. Quelle que soit la nature du déplacement produit par le sujet dans l'environnement, les éléments de l'environnement les plus proches du point d'observation (du sujet) sont animés de la vitesse de déplacement

optique la plus élevée et inversement. Le sujet dispose donc directement d'un gradient de vitesses optiques associées aux différents éléments du flux qui l'informe sur les distances relatives séparant les différentes surfaces de l'environnement. La parallaxe de mouvement constitue donc un invariant qui spécifie à l'individu l'emplacement des surfaces de l'environnement les unes par rapport aux autres » (Temprado et Montagne, 2001).

Les invariants transformationnels ou de contrôle (focus d'expansion, variable *tau*, etc.) permettent au sujet de percevoir ses déplacements par rapport à l'environnement ou de l'environnement par rapport à lui.

a_4) Le temps jusqu'au contact

Se plaçant dans la perspective proposée par Gibson, Lee (1976) a proposé l'idée que le cerveau utilise non pas la distance elle-même, mais une quantité qu'il a appelé le temps jusqu'au contact. Pour cet auteur, nous ne calculons pas les distances, mais le temps jusqu'au contact à partir d'indices prélevés dans le flux optique. Si l'on veut saisir une balle qui se dirige vers nous ou freiner à temps avant de heurter un obstacle, il est nécessaire d'évaluer la distance qui reste à parcourir avant que ne s'établisse le contact. Il s'agit dans ce cas de résoudre les problèmes complexes d'évaluation des propriétés spatio-temporelles de la trajectoire de cette balle. Il faut pour cela être à même d'anticiper la position future de la balle ou sa propre position future.

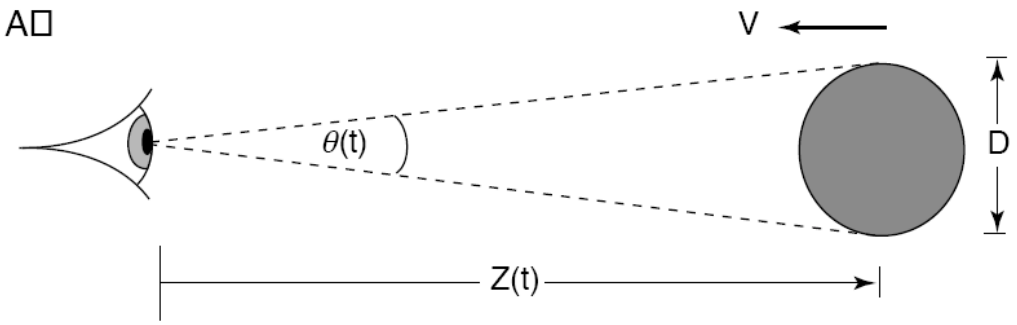


2 approches de la perception, indirecte (haut) vs directe (bas). D'après Michaels & Carello, 1981. In Williams et al., 1992.

Selon la théorie proposée par Lee et par de nombreux autres auteurs depuis, la rétine utilise certains paramètres disponibles, comme le diamètre apparent de l'objet. Pour cet auteur, il est possible pour le cerveau d'estimer le temps jusqu'au contact uniquement à partir de la dilatation (le taux d'expansion) de l'objet sur la rétine, à condition bien sûr que la vitesse soit constante. En effet, lorsqu'un objet se rapproche, la taille de cet objet grandit sur la rétine. Il se produit une dilatation de la surface apparente de cet objet qui permet d'obtenir directement une vitesse de dilatation sur la rétine.

Pour Gibson (1958), l'expansion optique d'une surface spécifie son rapprochement, du fait de l'action de l'individu et/ou du déplacement de la surface, alors que la constriction spécifie son éloignement.

Lee a proposé une variable qu'il a appelé tau (τ), avec $\tau = \theta / (d\theta / dt)$. Cet invariant optique correspond à l'inverse de la vitesse relative d'expansion des contours d'une surface de l'environnement.



Déplacement d'un objet de taille D, situé à une distance Z, se déplaçant à vitesse constante V vers le sujet. L'angle de vision ϕ *et son taux d'expansion* $d\phi / dt$ *dépendent à la fois de D et de Z. Comme* $\phi / (d\phi / dt) = - Z / (dZ / dt)$, *le rapport* $\phi / (d\phi / dt)$ *permet au sujet de déterminer le temps jusqu'au contact. D'après Tresilian, 1999.*

Lee définit tau comme étant le produit du rapport entre la distance *Z* à laquelle se situe l'objet par rapport au sujet et la vitesse *V* à laquelle l'objet se rapproche ($V = -dZ / dt$). Le rapport d'une distance sur la vitesse (soit $\tau = Z / V$) utilisée pour parcourir cette distance donne une estimation du temps jusqu'au contact (*TC*), à condition que la vitesse de l'objet demeure constante. *Tau* permet le calcul du temps jusqu'au contact de premier ordre (c'est-à-dire ne prenant pas en compte les accélérations) si l'objet et le sujet se situent tous les deux sur une même trajectoire (de collision, donc). Lee (1976) a dénommé ce temps jusqu'au contact *tau-margin*. Il a montré par ailleurs que le taux de dilatation (d'expansion) de l'image sur la rétine d'un objet se déplaçant à vitesse constante était égale à l'inverse de tau-margin ($\tau = 1 / \tau_m$).

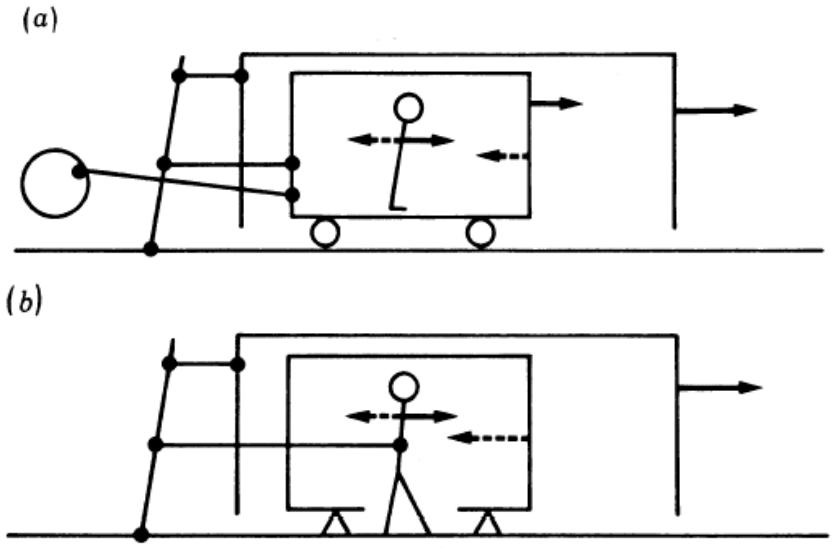
Lee a vérifié cette théorie à partir d'un très grand nombre d'expériences. Lee et Reddish (1981) ont analysé par exemple des fous de Bassan plongeant dans la mer pour attraper des poissons. (Ces grands oiseaux marins de 1,70m d'envergure doivent leur nom à l'îlot Bass Rock, en Écosse. Cet îlot est le lieu d'origine du spécimen type du fou de Bassan (*morus bassanus*, en latin), où se trouvait une colonie importante de ces oiseaux au XVIII^{e} siècle. Ce nom d'espèce a été proposé par Linné en 1758. L'histoire – à vérifier - dit que le surnom de fou leur a été donné

parce que ces oiseaux possèdent la caractéristique d'avoir déjà avalé leur proie lorsqu'ils sortent de l'eau.)

Ces oiseaux effectuent des plongées à partir de hauteurs très variées (parfois plus de 40m). Au moment où ils commencent cette plongée (à une vitesse d'environ 80 km/h), ils adoptent une posture qui leur permet de lutter de la façon la plus efficace possible contre la résistance de l'air tout en maintenant quelque capacité pour guider leur vol. Toutefois, s'ils devaient atteindre l'eau dans cette configuration qui exige que les ailes soient assez largement étendues, ils risqueraient de se blesser. Par conséquent, juste avant d'entrer dans l'eau (entre 300 et 400 ms avant l'entrée), les fous de Bassan replient leurs ailes et adoptent une autre posture aérodynamique ou plutôt aquadynamique, leur permettant d'atteindre leur proie et ce jusqu'à 13 m de profondeur.

La question posée par Lee et Reddish concerne le moment précis où ces oiseaux adoptent cette nouvelle posture. Ils ont proposé l'idée que, quelle que soit la hauteur à partir de laquelle ils ont débuté leur vol, les fous de Bassan déclenchent la fermeture de leurs ailes en utilisant la marge de tau, c'est-à-dire la grandeur optique d'augmentation de la dilatation de la surface de l'eau. L'hypothèse est donc ici que l'animal utilise un seuil critique de dilatation de l'image comme mesure du mouvement pour refermer ses ailes et non pas une mesure réelle du temps jusqu'au contact. L'étude cinématographique menée par Lee et Reddish a permis de démontrer que le moment où les oiseaux ferment leurs ailes semble bien être déterminé par cette grandeur.

Le flux optique visuel et ses modifications revêtent donc pour Lee une dimension essentielle dans la relation du sujet à son environnement. C'est l'élément essentiel, central, permettant de souligner la relation étroite, la boucle reliant la perception à l'action. Dans la perspective écologique, l'environnement et le point de vue de l'observateur (Lee propose à cet égard la notion d'information expropriospécifique) sont constamment changeants. Afin de mettre en évidence ce rôle central de la vision dans l'appréhension de son déplacement par le sujet, Lishman & Lee (1973) ont placé les sujets dans les conditions particulières (*i.e.* conflictuelles) d'une chambre induisant des mouvements perçus du flux visuel (figure ci dessous – voir la légende pour commentaires).



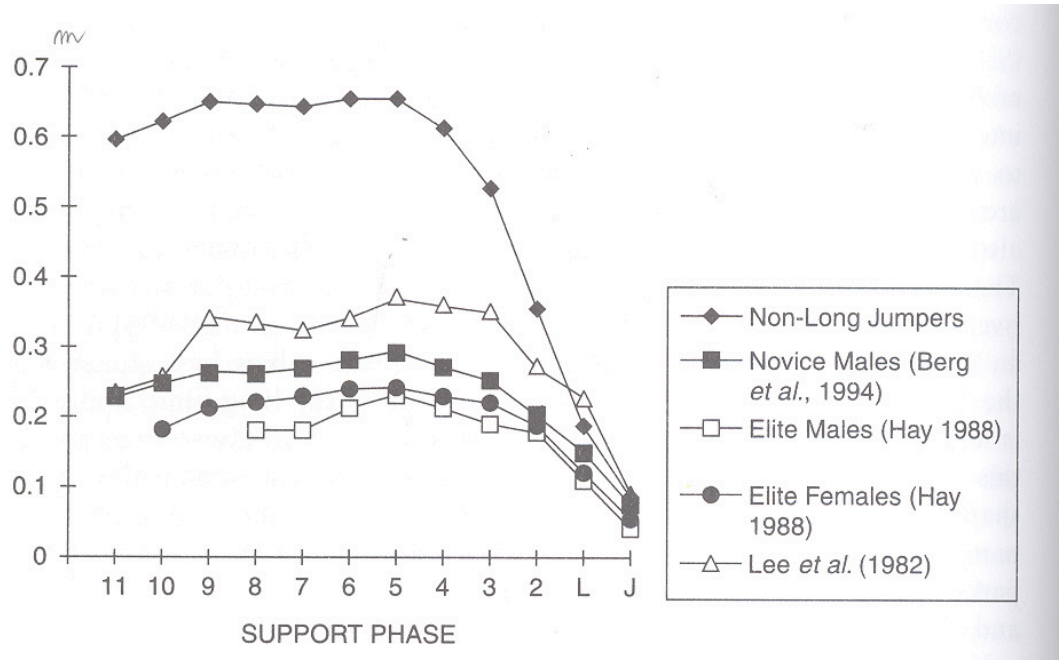
Expérimentation sur la perception visuelle par le sujet de son déplacement de façon active (a) et passive (b).Une seule direction est illustrée. Les flèches pleines indiquent le mouvement par rapport au laboratoire, les flèches en pointillé le mouvement par rapport à la pièce expérimentale elle-même. Quelle que soit la condition, 13 sujets/16 disent que eux-mêmes et le trolley se déplacent dans le sens visuellement spécifié ; ils perçoivent la pièce comme étant stationnaire. D'après Lee, 1980.

Comment la locomotion humaine est-elle visuellement contrôlée ? Si les années éloignées ont souligné le rôle déterminant du flux visuel, les travaux de ces dernières années, plus ouverts, évoquent évidemment le rôle de la prise en compte tout simplement par le sujet du but (situation dans l'espace) de son déplacement. Le rôle spécifique de chacun de ces deux facteurs a été étudiée plus récemment (Warren et al., 2001) en plongeant les sujets dans un environnement virtuel (port d'un casque permettant de modifier (*i.e.* d'enrichir) progressivement le flux visuel, « en violant les lois optiques », pour reprendre la formulation des auteurs. Si les données confirment que les lois de contrôle sous-tendant le déplacement d'un sujet vers un but donné montrent une combinaison linéaire des deux facteurs précédemment évoqués (but & flux visuel, pour mémoire), elles confirment la pondération de cette combinaison par l'amplitude du flux visuel, montrant la dépendance marquée du sujet aux conditions environnementales. Si aucun flux visuel n'est disponible, le sujet se réfère à la direction « égocentrique ». Cependant, l'ajout d'un flux optique de plus en plus riche laisse apparaître une dépendance de plus en plus marquée du sujet à ce paramètre.

Dans le domaine des activités physiques et sportives, les travaux de Lee et al. (1982) sur le contrôle d'un déplacement locomoteur ont porté sur les mécanismes de régulation développés par le sauteur en longueur (les sujets étaient trois athlètes internationaux) dans sa course d'élan à l'approche de la planche d'appel (ou d'envol). Ces auteurs ont constaté des irrégularités

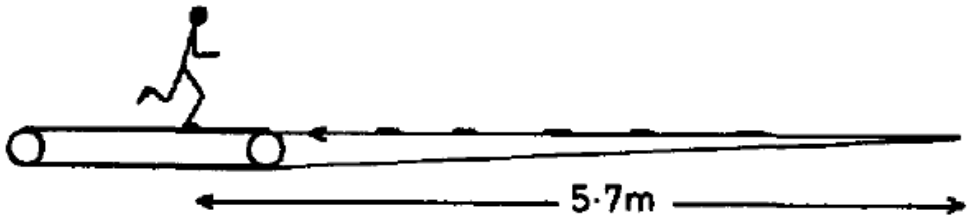
importantes (jusqu'à 35 cm pour le 5e avant-dernier appui, 8 cm pour le dernier) dans la course d'élan des sauteurs. Pour ces auteurs, cette variabilité va à l'encontre de l'existence d'un programme moteur élaboré au cours de l'entraînement et permettant à l'athlète l'obtention d'une course en quelque sorte standardisée, stéréotypée. Elle pourrait traduire les stratégies d'ajustement de l'athlète à l'abord de la phase terminale d'accélération précédant l'impulsion et l'envol. La question qui se pose alors est celle du type de contrôle mis en jeu. La mise en évidence dans cette expérimentation de corrélations marquées entre la longueur des foulées et certains paramètres cinématiques a conduit les auteurs à formuler l'hypothèse d'une régulation de ces foulées par le contrôle d'un paramètre particulier, le temps de vol (en d'autres termes, la puissance développée au moment de l'impulsion au sol). Les données, montrant de fortes corrélations (entre 0.7 et 0.99) entre le temps de vol et la longueur de la foulée, semblent confirmer cette hypothèse. L'idée avancée par Lee et ses collaborateurs, à partir des variabilités importantes constatées, est que le sujet utilise une régulation visuelle de sa course d'élan par l'utilisation de la variable tau, réglant et modulant sa course en fonction du temps qui le sépare de la planche d'appel.

Cette stratégie particulière est-elle l'apanage des experts ? Cette question semble légitime, les sujets utilisés par Lee et al. (1982) étant des internationaux. Berg et al. (1994) ont sollicité 19 athlètes âgés de 14 à 17 ans et ont trouvé des variations dans la course d'élan comparables à celles observées par Lee (avec un pic moins élevé de 29 cm au 5e avant-dernier appui). Cependant, les sujets de Berg et al. (1994) n'étaient pas tout à fait novices dans l'activité (en effet, leurs performances moyennes observaient des valeurs comprises entre 5.23 et 6.25 m contre 5.78 et 6.54 m pour les sujets de Lee et al.). Scott et al. (1997) ont donc travaillé avec des sujets ne pratiquant pas le saut en longueur et n'ayant subi aucun entraînement dans ce domaine. L'analyse de la course de ces sujets (voir figure *infra*) montre une grande différence de son organisation. On constate en effet une très grande variabilité (environ 60 cm) entre les 11 et 4e avant-dernières foulées. Puis, cette variabilité décroît de façon à observer des valeurs semblables à celles trouvées chez Lee et al. (9 cm *vs* 8 cm pour le pied d'appel). Ces données confirment donc selon les auteurs les conclusions issues des travaux de Lee et Berg sur la nécessaire prise en compte d'une variable écologique, la variable *tau*, puisque même des sujets non entraînés montrent la même capacité à réguler en ligne leur course d'élan avant de prendre leur appel pour sauter en longueur.



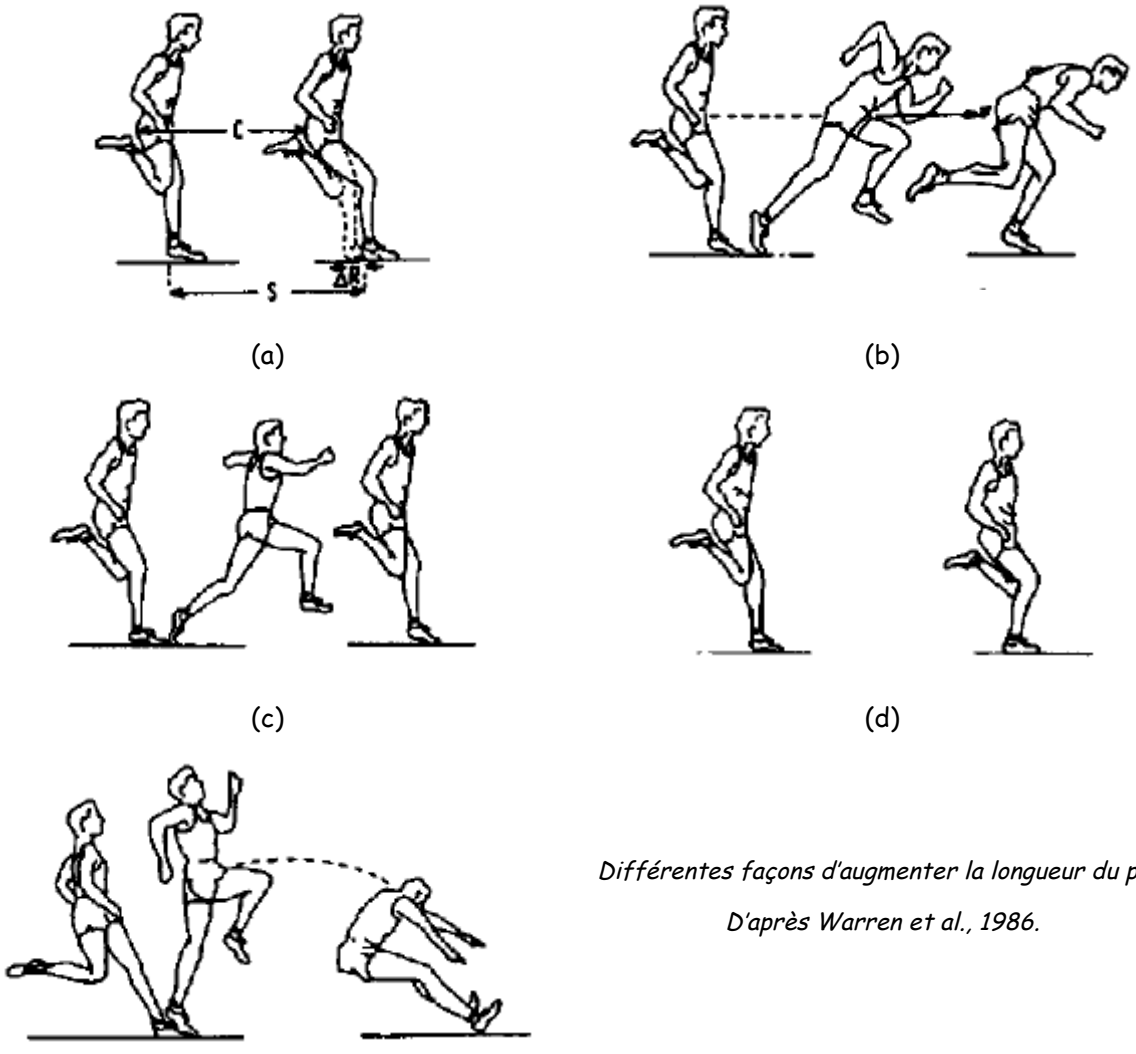
Variabilité moyenne dans la pose du pied à l'approche de la planche d'appel chez les auteurs en hauteur selon les études dont les noms des auteurs sont portés en légende. Source : Scott et al., 1997.

Ceci a été confirmé par la suite par les travaux de Warren et al. (1986) portant sur la régulation de la course en terrain irrégulier, l'irrégularité étant créée ici de façon spatiale par une disposition inégale de cibles sur un tapis roulant (cf. figure *infra*) se déplaçant à la vitesse de 4 $m.^{s-1}$:



Course sur terrain irrégulier (dispositif expérimental). D'après Warren et al., 1986.

Selon ces auteurs, il est possible de contrôler la longueur de son pas en mettant en œuvre différentes stratégies (cf. figures ci-dessous) : on peut allonger celui-ci d'une longueur ΔR (a), augmenter la composante horizontale de la vitesse de déplacement du centre de masse (b), appliquer une impulsion verticale plus importante (c), avancer ou retarder la pose du talon au sol en repliant de façon plus marquée la jambe sur la cuisse (ceci est difficile à réaliser sur plus de 2 ou 3 appuis) (d) et enfin combiner ces différents moyens (e), comme le fait le sauteur en longueur.



(a) (b)

(c) (d)

(e)

Différentes façons d'augmenter la longueur du pas.

D'après Warren et al., 1986.

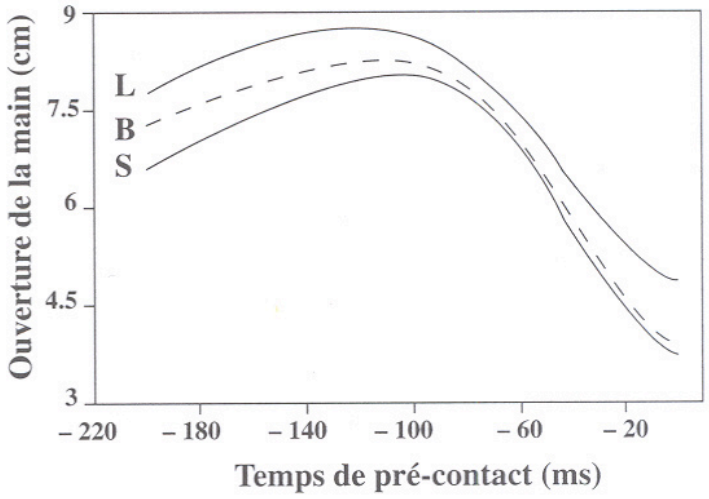
Les données de Warren et al. (1986) montrent que la régulation de sa foulée par l'athlète est produite par la variation d'un seul paramètre, le contrôle de la composante verticale de l'impulsion (corrélation forte entre la longueur du pas et la durée du temps de vol). Pour ces auteurs en effet, modifier la hauteur revient à modifier en quelque sorte en le temps de vol en allongeant sa durée, jouant avec la variable *tau*, ceci créant la possibilité d'allonger le temps de vol. Il s'agit en fait, dans les équations de ces lois de contrôle, de remplacer des valeurs géométriques (ici la distance séparant le sujet de la planche d'appel) par leur équivalent optique (la variable *tau* avec $I = mg\Delta\tau$). L'avantage d'une telle stratégie repose sur l'absence de création de couple de rotation (dans le plan sagittal) dans le cas d'une impulsion rigoureusement verticale (ce qui reste à démontrer). Ceci occasionne pour l'athlète une dépense énergétique moindre que celle nécessaire à l'adoption d'une stratégie portant sur la modification de la vitesse du centre de masse (b).

Bootsma et Van Wieringen (1990) ont également travaillé sur le rôle du flux visuel et de la variable *tau* dans l'activité tennis de table. Cette activité se caractérisée par des contraintes spatiales et temporelles fortes (contraintes signant une forte corrélation entre la perception et l'action) qui imposent au sujet de résoudre les problèmes complexes d'évaluation des propriétés spatio-temporelles de la trajectoire de la balle. Il faut notamment (Savelsbergh & Bootsma, 1994) i) s'assurer qu'on va bien entrer en contact avec l'objet ii) à la vitesse voulue iii) avec l'orientation nécessaire à la précision de l'action. Il a été montré, notamment grâce aux travaux de Tyldesley & Whiting (1975) proposant la notion de temps opérationnel, que ce qui permettait de différencier les experts des novices était une remarquable invariance du temps de mouvement chez les experts (confortant l'hypothèse cognitive, une telle constance dans la durée résultant de l'existence d'un programme moteur, construit par l'entraînement et l'expérience). Une question qui peut se poser dans l'organisation temporelle du joueur initiant sa réponse (par exemple par la réalisation d'un coup droit d'attaque) est celle du moment de cette initiation. Le sujet peut par exemple se fonder sur la permanence de son temps de mouvement, sa régularité pour construire la coïncidence spatio-temporelle entre sa raquette et la balle.

Une autre approche possible, fondant l'expérimentation de Bootsma et Van Wieringen (1990), est que l'organisation de la réponse repose sur la prise en compte de la variable *tau*. Cette expérience a porté sur 5 joueurs de très haut niveau, âgés de 18 à 24 ans, à qui il a été proposé d'atteindre le plus rapidement et le plus précisément possible une cible de 55 cm de diamètre située à 2.5 m du point de contact avec leur raquette, à une fréquence de 40 balles par min se déplaçant à une vitesse de 4m.$^{s-1}$. Les essais étaient proposés par blocs de 40 (tous les sujets ont placé la balle sur la cible avec 75 % de réussite). Les résultats montrent une corrélation négative entre l'amplitude de *tau-margin* à l'initiation du mouvement et l'accélération moyenne calculée au cours de l'exécution du geste, ceci se traduisant concrètement par une force plus importante appliquée pour la frappe à mesure du rapprochement de la balle avec le joueur, soulignant encore une fois la relation forte perception-action se traduisant, selon les autres, par une variabilité compensatoire dans la réponse fournie par le sujet. Il n'est donc pas nécessaire pour les sujets de calculer le point de rencontre de la raquette avec la balle, il leur suffit d'adapter la vitesse de leur mouvement à celle du déplacement de la balle.

Les travaux de Savelsbergh et al. (1991) soulignent également l'importance de la prise en compte de tau par le sujet. Ces auteurs ont manipulé le taux d'expansion des balles se dirigeant vers le sujet assis sur une chaise en "jouant" sur le diamètre de ces balles. Trois diamètres

étaient proposés (5.5 cm, 7.5 cm et un diamètre "intermédiaire" dans la mesure où la troisième type de balle se dégonflait au cours de son déplacement pour passer d'un diamètre de 7.5 à 5.5 cm à l'approche du sujet). Les auteurs ont mené l'analyse cinématique du patron de fermeture de la main lors de la saisie de la balle. Ils ont ainsi pu mettre en évidence par analyse vidéo à l'aide de marqueurs disposés sur le pouce et l'index une ouverture de la main adaptée aux variations de la taille de l'objet (une forte ouverture au début puis une fermeture progressive correspondant à la taille 5.5 cm. - cf. figure 34).



Variations du patron de fermeture de la main en fonction de la taille perçue de la balle. D'après Savelsbergh et al, 1991 (in Temprado & Montagne, 2001).

L'importante expérimentation (5 protocoles) menée par Peper et al. (1994) confirme également, en la précisant et l'affinant, l'utilisation d'une variable optique (ici la taille de la balle) comme une métrique dans le cas où le sujet ne dispose pas d'information sur la distance (ces deux variables sont liées optiquement – l'une permet de disposer d'une source d'information en l'absence de l'autre et réciproquement). Les résultats montrent clairement que les sujets ne peuvent prédire où une balle sera saisie mais qu'il se produit au contraire une adaptation continuelle (couplage perception-action) à la source d'information. Ce type d'information, selon les auteurs, ne spécifie pas quand il faut être où, mais comment se trouver au bon endroit au bon moment.

Le flux optique possède donc un certain nombre d'invariants permettant d'anticiper sur le mouvement d'une balle ou d'un objet que l'on souhaite attraper. Ces invariants ne sont pas seulement des paramètres simples du flux optique comme la luminance ou la fréquence spatiale, la durée des stimuli sensoriels d'origine visuelle, mais ce que Gibson (1966) a appelé des propriétés de haut niveau des patrons de stimulation visuelle.

Critique de tau et propositions de rapprochement

Un certain nombre de questions, de critiques et de propositions de rapprochement avec les théories prescriptives ont vu le jour ces dernières années. Tresilian (1999) affirme ainsi de façon provocatrice que le temps de *tau* est révolu, que cette hypothèse s'avère fausse, avant de moduler son propos en rappelant que la variable *tau*, certes prise en compte dans l'appréhension du déplacement d'un objet, par exemple, n'est certainement pas la seule (cf. également Montagne & Laurent, 1996) et représente une approche un peu linéaire, voire sommaire et limitée. Ce qui est reprochée à tau se décline selon cet auteur en différents points :

- *tau* néglige l'accélération (seuls les facteurs de premier ordre sont pris en compte, mais ils ne sont pas toujours suffisants)
- *tau* fournit l'information *via* l'œil uniquement
- cette hypothèse nécessite la sphéricité de l'objet (*e.g.* ballon de rugby - à moduler)
- problèmes de seuil de la taille de l'objet et des taux d'expansion.

Tresilian rappelle par exemple les données de Lacquaniti et al. (1993), montrant que si la balle tombe d'une hauteur <1.5 m, *tau* ne peut être utilisée, et celles de Wang & Frost (1992) qui ont trouvé chez le pigeon des neurones sensibles non pas à tau, mais à 1/ τ. Il propose enfin :

- d'adopter une définition du concept d'information beaucoup plus large que celui proposé par Gibson
- d'expliquer comment les tâches d'interception sont mesurées temporellement quand l'information fournie par *tau* s'avère insuffisante
- d'expliquer comment de multiples variables perceptuelles et des sources d'information diversifiées peuvent contribuer à l'estimation de tau
- de prendre en compte l'aspect tâche dépendant.

Fodor et Pylyshyn (1981) formulent également des critiques à l'égard des propositions et hypothèses gibsoniennes. La notion d'information demeure par exemple selon eux inexpliquée chez cet auteur. Par ailleurs, le critère écologique de "percevabilité" suffisant pour être perçu semble un peu juste. Ces auteurs proposent cependant une lecture de conciliation de l'approche écologique, en rappelant que les différences parfois évoquées par rapport à l'approche classique sont dues plutôt à des différences de terminologie.

Norman (2002) rappelle la validité dans les deux approches car elles décrivent selon lui différents aspects de la perception. Cela conduit à l'approche de la double dénomination.

L'hypothèse est que la perception consiste en deux systèmes fonctionnant plus ou moins en parallèle (voir Warren & Whang, 1987 également). Le premier (dorsal) extrait l'information visuelle principalement pour permettre à l'organisme de fonctionner dans son environnement. Il le fait plus vite que le deuxième (ventral) sans conscience et sans encombrer le système cognitif avec l'interprétation des stimuli d'entrée. Le second, le ventral (reconnaissance et identification) compare l'information visuelle à ce qui est stocké pour interpréter et donner du sens. Ces deux systèmes agissent en synergie et complémentarité.

La théorie de Gibson peut-elle s'appliquer à l'ensemble des questions posées par le contrôle moteur chez l'homme ? Temprado et Montagne (2001) rappellent que le champ d'application de la théorie proposée par Gibson porte sur "la question du contrôle visuel des actions finalisées permettant à l'individu de se déplacer efficacement dans un environnement comportant des objets fixes ou mobiles." Il en est ainsi des situations correspondant :

"- à l'initiation et à l'arrêt d'un déplacement

- au guidage du déplacement vers un but

- à l'évitement d'obstacles en cours de déplacement

- au freinage à l'approche d'un obstacle

- à l'interception et à l'évitement d'objets mobiles en cours de déplacement."

Il est donc vain, selon ces auteurs, "de vouloir appliquer les concepts de cette approche à des tâches s'inscrivant en dehors de ce champ."

En guise de remarque conclusive sur cette approche :

Peut-être peut-on réfléchir par rapport à cette théorie gibsonienne par ailleurs fort riche sous certains aspects à une critique formulée par le philosophe Pierre Jacob à l'encontre des philosophes traditionnels de la perception. Rappelant la complexité des problèmes que le système visuel doit résoudre dans une tâche perceptive (« de fait, lorsqu'il est confronté à une tâche perceptive, le système visuel doit résoudre au moins trois catégories de problèmes : premièrement, il doit réduire les nombreuses ambiguïtés et indéterminations véhiculées par l'information qui atteint la rétine. Deuxièmement, il doit découper la scène visuelle en objets individuels et les distinguer de l'arrière-plan sur lequel ils se détachent. Troisièmement, il doit rapporter à un seul et même objet les attributs visuels qui lui reviennent. »), Jacob évoque à propos de ces philosophes leur souscription « à ce qu'on peut nommer "le mythe du donné" … qui les a amenés longtemps à sous-estimer cette complexité. Selon ce mythe, le monde s'offre directement aux sens. A la différence de l'abstraction conceptuelle, de la résolution de

problèmes ou de la formulation d'hypothèses scientifiques, la perception visuelle du monde est un acte simple qui fournit un accès immédiat au monde. Il suffit d'ouvrir les yeux pour que toute la richesse du monde se dévoile miraculeusement (!).

B) L'approche dynamique

D'autres théories sur l'apprentissage et le contrôle moteur ont vu le jour par l'introduction de modèles issus de la synergétique (Haken, 1983), et des théories des systèmes dynamiques (Abraham & Shaw, 1982). Kugler, Kelso, et Turvey (1980) ont été parmi les premiers à les utiliser dans le domaine des coordinations motrices. Ces théories étudient l'évolution des systèmes au cours du temps. Chaque système est composé d'un ensemble de sous-systèmes liés entre eux par des relations de coopération, de façon à faire face aux contraintes de l'environnement et à assurer la survie du système. Ces théories, associées aux travaux de Bernstein (1967) permettent d'approcher différemment l'apprentissage moteur, en y faisant apparaître notamment la notion d'émergence, ainsi que le caractère auto organisé des coordinations motrices.

b_1) la notion d'émergence

Pour Bergé et al. (1984), il convient d'entendre par tout système dynamique un système qui évolue au cours du temps quelle que soit sa nature. Ces auteurs rappellent la distinction entre les systèmes présentant une « friction interne », au sens le plus large du terme et les systèmes sans friction, sans frottement. Les premiers, avec la présence d'un attracteur, sont dits dissipatifs dans la mesure où ce frottement entraîne une baisse continuelle de l'énergie. Les seconds, *a contrario*, sont dits conservatifs (ou hamiltoniens).

La théorie générale des systèmes dynamiques non linéaires, se fondant sur les travaux de Poincaré (1899), s'est développée à partir des années 1970. L'école russe, initiée par Bernstein (1967), a proposé une perspective dite dynamique. Les chercheurs s'inscrivant dans cette perspective dynamique soutiennent que les régularités observées des patrons de mouvement ne sont ni représentées centralement ni issues de programmes moteurs, mais émergent au contraire naturellement (*i.e.* physiquement) d'interactions complexes entre de nombreux éléments liés, intrinsèquement interdépendants, proposant des états globaux de l'ensemble des variables. Ce phénomène est analogue à la façon dont de nombreux systèmes physiques complexes s'organisent et se structurent sans aucun programme. L'ordre émerge ainsi de systèmes ouverts (il faut qu'il le soient pour que les échanges puissent avoir lieu), sans modulation ou régulation imposée de quelque façon que ce soit.

Cette création spontanée d'ordre repose cependant sur la nécessité pour le système de comprendre de nombreux éléments liés ou couplés entre eux de façon non linéaire (le comportement émergent est par nature non prévisible, non lié de façon stricte aux caractéristiques ou aux propriétés des éléments) et d'être éloigné de l'équilibre, c'est-à-dire fonctionnant de façon dissipative.

Comme le rappelle Varela (La Recherche, 1998), " ce qui est intéressant, c'est de savoir de quelle façon un système à haute dimension (*i.e.* complexe) comme le corps humain ou une situation compétitive peut s'organiser lui-même afin de produire un système à « basse »dimension. Ce problème a été à l'origine identifié par Bernstein comme le problème du nombre de degrés de libertés. Ce problème pourrait se traduire de la façon suivante : comment produire un faible nombre de solutions à un problème donné (par exemple, frapper une balle) lorsque les solutions offertes par le système sont nombreuses ? La théorie des systèmes dynamiques propose une réponse à ce problème. Selon elle, des modifications spontanées du comportement naissent de l'observation des lois naturelles et des principes physiques contraignant les éléments composant le système (il existerait ainsi un certain nombre d'équations de contrainte liant entre eux des éléments du système et permettant, par la diminution du nombre de variables indépendantes, de contrôler ce système). Considéré de cette façon, le comportement, ou le mouvement produit par le sujet, devient une propriété émergente (ou une conséquence) de la dynamique du système. On peut trouver différentes illustrations des systèmes dynamiques, comme l'interaction dynamique entre deux joueurs de squash ".

b_2) l'auto-organisation d'un système - l'auto-organisation du vivant

L'exemple du cerveau est tout à fait révélateur d'un système complexe auto organisé. L'évolution du cerveau traduit une augmentation de la complexité du système. Le système est réputé complexe, et même hyper complexe pour certains auteurs, parce que s'y joue en permanence une réorganisation, amenant tout à la fois souplesse et liberté d'action. Pour Morin (1973), "dans un sens, un système hypercomplexe est un système qui diminue ses contraintes tout en augmentant ses aptitudes organisationnelles, notamment son aptitude au changement".

Les systèmes vivants peuvent être considérés comme des systèmes auto organisateurs (et donc auto organisés). Déjà, Hebb proposait en 1949 l'idée d'autorégulation, rappelant que la mise en place de l'ensemble des connexions du système nerveux central est aussi réglée par l'activité des différents circuits. De ce point de vue, le cerveau, bénéficiant d'une redondance et d'une

fiabilité suffisantes, peut également être considéré comme un système dynamique qui s'auto organise en utilisant ces propriétés du système nerveux. Ce qui est visé au travers de cette auto organisation formalisée par l'émergence de nouvelles configurations (sensorielles, motrices), c'est la permanence de l'existence du système, sous une forme ou sous une autre. Plus le système est redondant, plus il est capable de produire des régulations fortes.

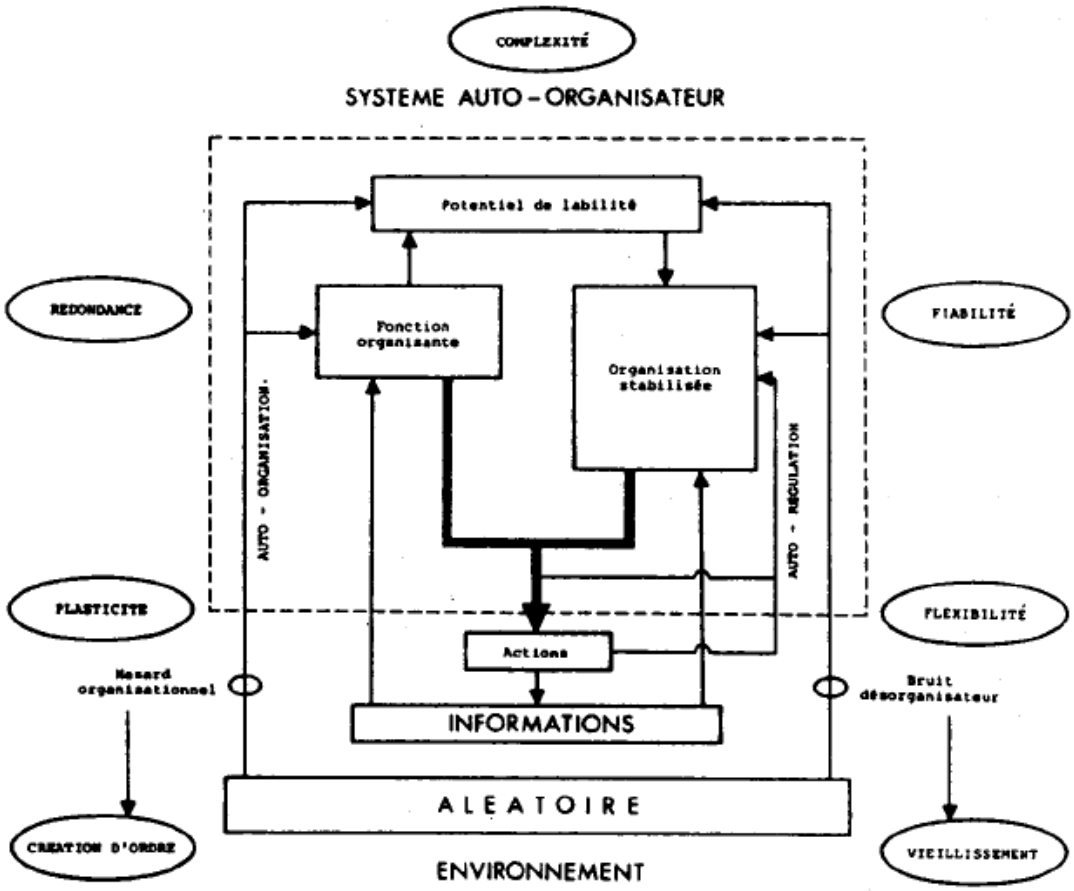


Schéma d'un système auto-organisateur. Les agressions aléatoires de l'environnement alimentent la fonction auto- organisatrice du système créatrice de complexité aux dépens du potentiel d'évolution du système représenté par ses éléments labiles susceptibles de différenciation. L'organisation stabilisée résiste à ces fluctuations aléatoires grâce à l'autorégulation cybernétique. Redondance et fiabilité constituent les deux pôles de la résistance aux influences désorganisantes du bruit. A la plasticité structurale qui conditionne la fonction organisatrice et réorganisatrice du système correspond la flexibilité des productions fonctionnelles de la machine organisée. La fonction de création d'ordre s'alimente dans les effets positifs du bruit et dans le hasard organisationnel. Le vieillissement du système résulte de l'accumulation des erreurs de fonctionnement dues aux effets négatifs du bruit désorganisateur (In Paillard, 1983, d'après J. Paillard, 1980, p. 140).

Cette redondance, cette fiabilité permettent à l'organisme de fonctionner avec continuité malgré les désordres, les agressions ou les impotences passagères. Pour Morin (1973), le désordre définit "tout phénomène qui, par rapport au système considéré, semble obéir au hasard et non au déterminisme dudit système, tout ce qui n'obéit pas à la stricte application mécanique

des forces selon les schèmes préfixés d'organisation'". Ces désordres, les contraintes de certaines situations constituent ce que Von Foerster (1960) a appelé du "bruit". Dans la théorie des communications, le bruit se définit par la survenue d'une perturbation qui altère ou brouille la transmission d'une information (pour reprendre l'expression populaire, "il y a de la friture sur la ligne"). L'organisme vivant fonctionne avec du bruit (la concurrence entre les différentes modalités sensorielles peut constituer une source de bruit) malgré le désordre. Il faut d'ailleurs rappeler la nécessité de l'existence de perturbations de façon à permettre au système de s'adapter à toute situation mettant en jeu des modes de fonctionnement différents du mode de fonctionnement habituel. Il existerait ainsi une "loi de la variété indispensable", évitant au système de se figer, lui permettant de développer ses facteurs d'adaptation et finalement de survie. C'est une idée que l'on retrouve largement dans la nécessaire variété des échanges entre l'individu et son environnement, dans les variabilités des conditions d'apprentissage mises en place de façon à développer de façon optimale ou à actualiser les potentialités du sujet. Dans certains cas, le bruit enrichit l'information, permet l'innovation et la création d'un principe d'ordre nouveau, une nouvelle stabilité, fut-elle temporaire. Cette notion de stabilité ou d'état d'équilibre d'un système est issue des théories de systèmes à structure dissipative. La genèse des structures dissipatives, dont le nom "traduit l'association entre l'idée d'ordre et l'idée de gaspillage" (Prigogine et Stengers, 1979), implique selon ces auteurs l'association indissoluble du hasard et de la nécessité. Les échanges de ces systèmes avec le monde environnant les amènent à la création d'un principe d'ordre à partir d'un désordre initial.

Comme le précise Paillard (1977), « organiser c'est mettre de l'ordre là où il n'y en avait pas ou modifier un ordre existant pour répondre à de nouvelles exigences ou normes ou à de nouveaux critères de valeurs. Organiser c'est, en fait, informer (mettre en forme) ou transformer (changer la forme existante). » "La dissipation d'énergie et de matière – généralement associée aux idées de perte de rendement et d'évolution vers le désordre – devient, loin de l'équilibre, source d'ordre ; la dissipation est à l'origine de ce que l'on pourrait bien appeler de nouveaux états de la matière." (Prigogine et Stengers, 1979). Pour reprendre la formule d'Atlan (1972, 1974) "le temps apporte avec lui un capital de nouveauté et de création". Selon cet auteur, c'est Von Foerster "qui le premier a exprimé la nécessité d'un principe d'ordre à partir du bruit pour rendre compte des propriétés les plus singulières des organismes vivants en tant que système auto-organisateurs, notamment de leur adaptabilité". Ce bruit, cette perturbation, jouent un rôle réorganisateur à partir d'une désorganisation initiale (rappel sur la notion d'entropie d'un système : tout ce qui, selon le degré de cette entropie, entraîne la

dégradation, la dégénérescence, la désorganisation d'un système). Cette réorganisation se produit à un niveau de complexité plus élevé, source d'une richesse plus grande, mettant en place des modalités de fonctionnement différentes, adaptées. "Ainsi, tout système vivant est menacé par le désordre et en même temps s'en nourrit".

En résumé : *l'auto organisation d'un système correspond à la capacité que possède ce système de créer de l'ordre à partir d'un désordre initial. Cet ordre permet notamment d'assurer la permanence de l'existence du système, le maintien d'un état d'équilibre fut-il transitoire, la possibilité de répondre aux stimulations et/ou aux perturbations extérieures.*

b_3) l'auto-organisation dans le cadre de l'approche dynamique

Le problème qui se pose est de savoir s'il est possible qu'un système biologique s'auto-organise sans faire appel à une commande centrale qui collecterait, analyserait l'information et prescrirait en quelque sorte une solution toute faite. Les théories de l'auto-organisation (Babloiantz, 1986 ; Haken, 1983, 1984 ; Prigogine et Stengers, 1979) tentent de répondre affirmativement à la question suivante : comment des systèmes complexes, composés d'un nombre presque infini d'éléments en interaction, peuvent-ils à un moment donné présenter spontanément des configurations spatiales et temporelles stables et organisées, face aux contraintes variées et variables qui s'exercent sur eux ? L'idée sous-jacente à ce questionnement est que l'organisation du système dans son ensemble (au plan macroscopique), est le fruit des interactions des composantes de ce même système les unes avec les autres (au plan microscopique). L'auto-organisation se propose donc de concevoir l'apparition de l'organisation, de l'ordre, comme un phénomène d'émergence de formes, qu'il est possible de définir comme toute structure spatio-temporelle résultant de l'interaction des composantes d'un système.

Les théories d'auto-organisation se détachent par leur objet des disciplines plus « fermées » (comme la physique classique, la mécanique newtonienne, la thermodynamique, etc.) en ceci que les systèmes étudiés ne sont ni fermés, ni isolés de leur environnement, ni en équilibre énergétique. Les systèmes auxquels nous nous intéressons sont ouverts, en interaction avec leur milieu, traversés par un flux énergétique dans la mesure où ils reçoivent et rejettent (ou produisent ?) de l'énergie. Cette ouverture vers le milieu et ces échanges constituent des sources potentielles de déséquilibres, nécessaires au maintien de la stabilité du système. La façon dont ces systèmes répondent à ces déséquilibres se traduit par une émergence de formes nouvelles (il existerait donc une morphogenèse), plus ou moins momentanément stables.

Un exemple tout à fait classique et illustratif de cette notion d'auto-organisation est celui de la convection de Rayleigh-Bénard dite des rouleaux de Bénard (en fait, « ces instabilités convectives ont été clairement mises en évidence par le physicien français Bénard en 1900 et interprétées pour la première fois par l'anglais Lord Rayleigh en 1916 » - Bergé et al., 1984).

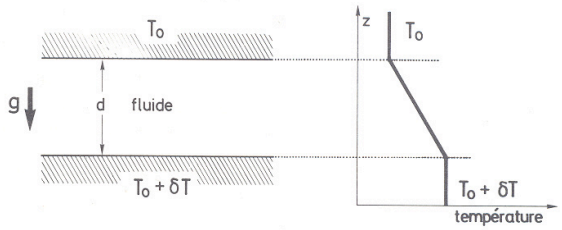


Schéma de principe d'une expérience de Rayleigh-Bénard

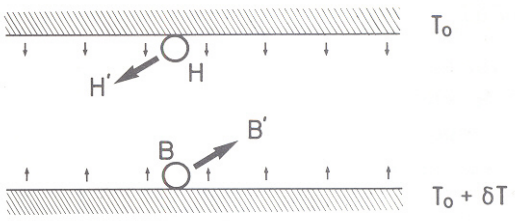
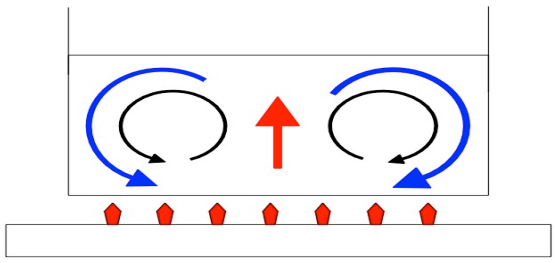


Schéma explicatif de la naissance d'un mouvement au sein d'un fluide

Source : Bergé et al., 1984.

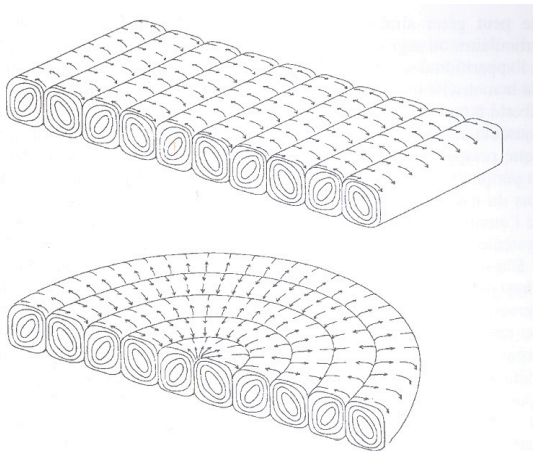
Ce phénomène se fonde sur l'action exercée par une différence de température sur un fluide dilatable placé dans le champ de la pesanteur (les premières expériences de Bénard ont été menées avec de l'huile de baleine). Cette différence de température entraîne un mouvement du fluide appelée convection thermique (Bergé et al., 1984). Le dispositif classique de cette expérience est représenté par la figure ci-dessous.

Une couche de fluide est confinée entre deux plaques rigides horizontales maintenues à température fixe, la plaque inférieure se trouvant à une température $T_0 + \Delta T$ supérieure à la température T_0 de la plaque supérieure. Cette différence de température entraîne des mouvements du fluide, « soumis à deux tendances antagonistes puisque le liquide froid, plus dense, situé à la partie supérieure tend à descendre alors qu'à la base, le liquide fluide plus chaud et moins dense tend au contraire à s'élever ». Ces mouvements sont désordonnés jusqu'à l'apparition d'une valeur critique du gradient de température ou seuil de convection. On voit alors apparaître un ordre se caractérisant par une organisation régulière de rouleaux convectif d'axes horizontaux parallèles. Ces rouleaux tournent alternativement dans un sens et dans l'autre par suite d'un effet d'engrenage mutuel (en rotation et en contre rotation). Cependant, le sens de rotation de ces rouleaux peut être inversé.

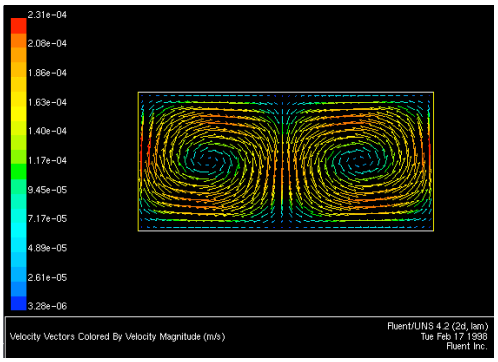


Source : http://convection.ifrance.com

Il existe en effet, comme le rappellent Bergé et al. (1984) « dans une expérience de Rayleigh-Bénard parfaite une stricte équiprobabilité d'observer l'un ou l'autre sens de rotation. » Un tel système possédant cette capacité de produire différentes configurations stables à partir des mêmes conditions initiales est dit multistable (Haken, 1988).



Rouleaux de Bénard. D'après Temprado et Montagne, 2001



Rouleaux contra rotatifs

Dans cette expérience, le paramètre de contrôle est un nombre sans dimension, le nombre de Rayleigh qui se définit par la relation :

$$Ra = \frac{\alpha g d^3 \Delta T}{\nu \kappa}$$

où représente le coefficient de dilatation thermique du fluide, *d* est l'épaisseur de la couche de fluide (la distance entre les deux plaques), T ou T l'écart de température, *g* l'accélération de la pesanteur, *v* la viscosité du fluide et *k* la diffusivité thermique.

b4) la coordination dynamique

La coordination dynamique est supposée être un processus auto-organisé, mettant en jeu un certain nombre de synergies. Cette notion de synergie, de structure coordinative, représente un élément important dans l'approche dynamique (il est utile de rappeler qu'elle possède par ailleurs une importance marquée dans d'autres approches, notamment computationnelles). L'émergence ou la mise en place au cours de l'apprentissage de ces patrons de coordination préférentiels fonctionnels, temporaires (c'est-à-dire parfois transitoires), spécifiques à la tâche réalisée par le sujet, permet le contrôle d'un nombre important de degrés de liberté du système lors de la réalisation d'une habileté motrice complexe. Il devient alors plus simple de contrôler une seule structure coordinative, regroupant différents muscles et articulations. On peut considérer, au travers de cette notion d'auto-organisation, que la complexité ou la structure d'un système se

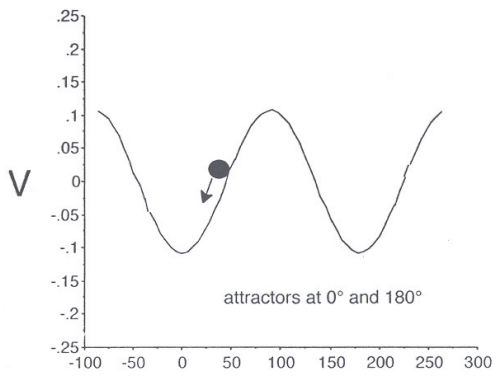
trouve considérablement réduite. Le nombre élevé d'éléments (muscles, neurones, etc.) composant le système en interdit la description singulière (*i.e.* de chaque élément). La forme résultant de la transformation du système pourrait donc être décrite par une observable simple, également appelée « variable collective » traduisant le comportement global des éléments composant le système, les différents patrons de coordination motrices stables, leur passage d'une forme ou structure à une autre à un moment donné.

Nous nous proposons d'explorer cette approche dynamique par la définition d'un certain nombre de termes originaux et de notions utilisés dans le cadre de cette approche.

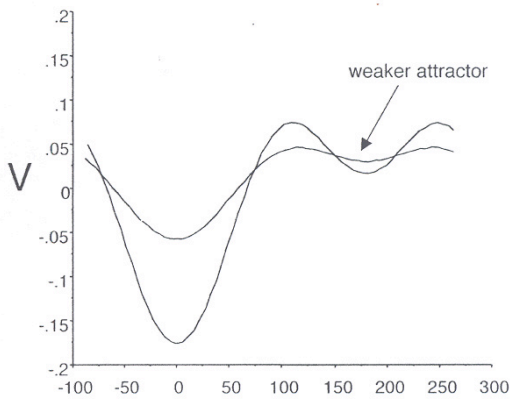
b_5) la notion d'attracteur

Si l'on observe un système dynamique quelconque dans le temps, on remarque qu'il évolue vers un attracteur. Celui-ci peut être défini comme un ensemble de points dans l'espace vers lequel le système dynamique converge à mesure que le temps approche de l'infini. Il représente une solution stable pour le système. Un attracteur a été défini de manière humoristique par Stewart (1992) comme "n'importe quoi du moment que tout y converge et s'y dépose". Comme le précisent Prigogine et Stengers (1979), "le pendule qui s'immobilise progressivement rejoint son état attracteur. Le liquide chaud dont la température rejoint progressivement celle de son environnement rejoint son état attracteur". Dans le domaine de la pratique des APS, l'état attracteur représente la traduction visible du choix préférentiel par le sujet de coordinations émergentes, spontanées, stables parmi les multiples possibles, mettant en jeu un minimum énergétique. Les coordinations spontanées du débutant en volley-ball (extension complète des membres inférieurs et supérieurs lors d'une frappe haute) s"expliquent ainsi selon certains auteurs par l'existence de ces attracteurs.

On peut tenter d'imager de façon simple cette notion d'attracteur. Les différentes illustrations font appel à un paysage particulier mettant en jeu des sommets (lieux d'états transitoires du système) et des vallées ou des puits (au fond desquels se situent les attracteurs). La dynamique ou le fonctionnement interne du système peut se traduire par le comportement d'une bille. On peut dès lors concevoir que la position de la bille au fond de la vallée ou du puits sera l'expression d'un état stable, et ce d'autant plus que le sommet est haut (ou le puits plus profond) et que la pente depuis ce sommet est marquée. L'état attracteur ou cycle limite signe donc pour un système une forte stabilité.

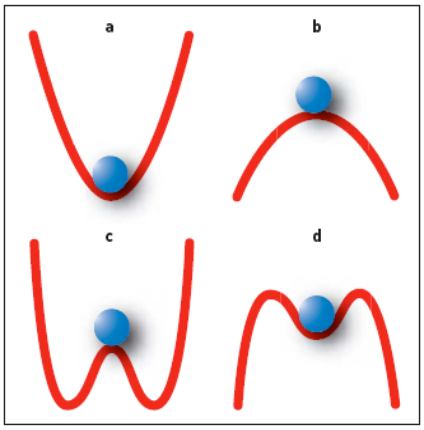


Attracteurs à 0° et à 180°.



Attracteur fort et attracteur faible

Source : Schmidt & Lee, 1999



Différents niveaux de stabilité et d'instabilité.
Source : Clefs CEA, N° 49, 2004

En résumé : *un comportement moteur choisi de façon préférentielle par un sujet peut s'expliquer, dans une perspective dynamique, par l'existence d'un attracteur. D'une façon très pratique, cet attracteur peut se traduire par la coordination réclamant un effort minimal, ou un rapport coût-bénéfice optimal (une dépense d'énergie moindre pour un rendement équivalent).*

b_6) oscillateurs, phase et anti-phase, bifurcation de phase, paramètres d'ordre

L'approche dynamique considère le comportement sous l'éclairage de la théorie des oscillateurs (dont le fonctionnement de type périodique, *i.e.* avec une amplitude et une période, est sous-tendu par l'adoption d'une fréquence donnée), et notamment les oscillateurs couplés (permettant la mise en place des coordinations inter-segmentaires). Cette notion d'oscillation est essentielle pour l'étude et la compréhension des systèmes dynamiques et des phénomènes périodiques. L'oscillateur « est l'archétype même d'un dispositif ayant un comportement dépendant du temps » (Bergé et al., 1984). Le pendule simple (une masse *m* placée dans un champ de pesanteur d'accélération *g*, suspendue en un point *O* par un fil rigide de longueur *l* et oscillant dans un plan vertical) représente une des réalisations d'oscillateur les plus connues, mais d'autres

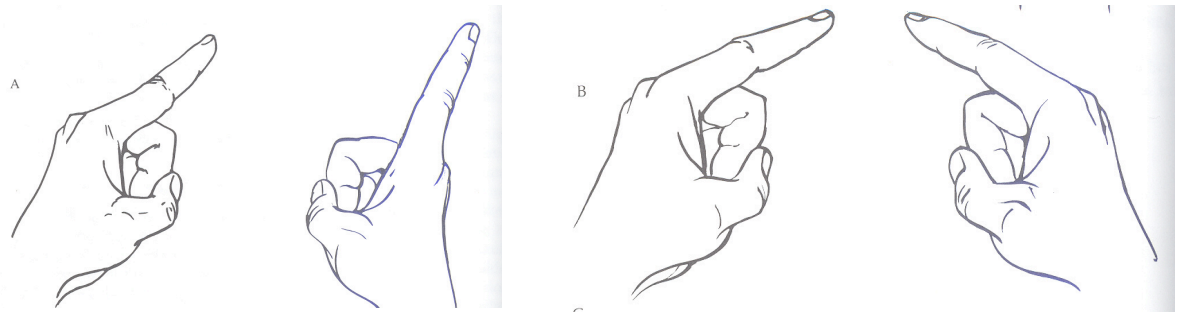
comportements périodiques existent chez le vivant, comme les rythmes biologiques, le cycle nycthéméral (terme d'origine grec avec *nux* = nuit et *héméra* = jour, signifiant littéralement nuit-jour. C'est l'espace de temps physiologique contenant un jour et une nuit), le système nerveux central, la potentialisation neuronale. Les oscillations ou vibrations surviennent parfois spontanément (*cf.* tout dispositif en rotation, de la roue à la machine à laver par exemple). Ceci peut entraîner parfois de graves conséquences (rappel de la troupe franchissant un pont au pas cadencé près de Manchester en 1831).

Ces oscillateurs ont tendance lors de fonctionnements interactifs à revenir à des états stables. Ceci peut se caractériser mathématiquement par la notion de phase. Celle-ci permet de décrire la position à un moment donné d'un oscillateur (un segment corporel par exemple). L'étude des phases a permis d'étudier l'état de stabilité d'un système. La phase, permet de faire apparaître ce que l'on appelle un paramètre d'ordre (ou une variable collective). Ces paramètres d'ordre sont des observables (un état particulier, comme dans l'expérience des rouleaux de Bénard – cf. TD) que l'on peut identifier (parfois avec difficulté) et contrôler. Ils permettent de décrire, de caractériser à un niveau macroscopique (global) sur une échelle relativement lente, l'état de coordination, les possibilités de synchronisation du système.

C'est à Kelso et al. (1981), que l'on doit les premières études sur les coordinations chez l'homme, mettant en évidence l'existence de transitions d'un état vers un autre. Dans ce travail de coordination bimanuelle, les sujets devaient produire avec leurs deux index deux oscillations d'amplitude égale (des mouvements de va et vient avec les index des deux mains se déplaçant dans le plan frontal), en suivant le tempo dicté par un métronome, soit en phase, soit en opposition de phase (la différence de phase ou phase relative ϕ ou décalage temporel est ainsi fixée à 180° pour l'anti phase et à 0° pour la phase). Malgré les nombreuses possibilités de coordination des mouvements de leurs doigts, un accroissement graduel de la fréquence imposée par le métronome (paramètre de contrôle) n'a laissé apparaître spontanément (*i.e.* par une transition abrupte) chez les sujets, à partir d'une certaine valeur critique, que deux modes de coordination stables possibles : une coordination en phase (ϕ = 0°) se traduisant par les deux index synchrones en adduction ou en abduction, et une coordination en anti phase (ϕ = 180°) se traduisant par les deux index synchrones mais l'un en adduction et l'autre en abduction (*cf.* figure ci-dessous) par rapport à l'axe médian du corps du sujet. Ces deux modes de coordination ou patrons de coordination préférentiels peuvent être considérés comme des attracteurs du

système puisque la variable collective à tout moment va observer la forme de l'un ou l'autre de ces deux patrons.

Cependant, au delà d'une valeur limite (critique) de la fréquence d'exécution des mouvements imposée au sujet, on assiste peu à peu à une phase de transition conduisant progressivement à une coordination bi manuelle en phase, maintenue dans une large gamme de fréquence. Seule la coordination en phase (ou anti parallèle) est observée.

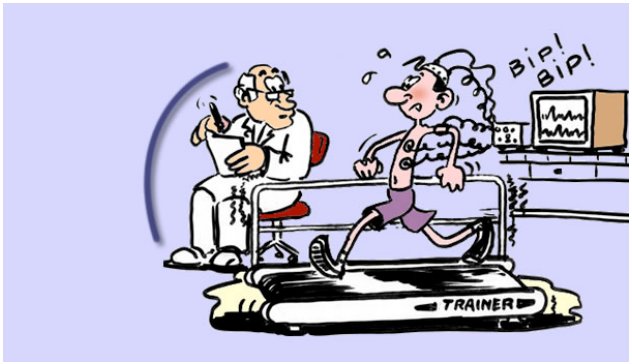


Coordination en anti phase *Coordination en phase*

Expérience de Kelso (1981). In Temprado & Montagne, 2001.

Ces travaux et d'autres (étude des mêmes auteurs portant sur des mouvements alternatifs de flexion-extension des doigts) ont permis de mettre en évidence, selon Kelso, que la différence de phase constitue le paramètre d'ordre du système. Ils ont également permis de souligner le rôle joué par ce qu'on appelle le paramètre de contrôle (la fréquence de battement du métronome ou le gradient de température) dans le maintien de la stabilité du système ou son passage à un autre état d'équilibre. Ce facteur, important dans le langage de la synergétique (Haken, 1983), est défini comme une variable n'appartenant pas au système analysé, mais dont la manipulation s'avère pertinente pour mettre en évidence la dynamique du système (et sa stabilité). Il permet de modifier le paysage des attracteurs. Ainsi, ici, dans l'expérience rapidement évoquée précédemment, l'augmentation de la fréquence de battement observée par le métronome (paramètre de contrôle) entraîne une augmentation de la fréquence (paramètre d'ordre ou variable collective) à laquelle les index se déplacent (oscillent), jusqu'à atteindre une valeur critique qui, faisant perdre au système observé sa régularité ou sa stabilité (ceci se caractérise par une augmentation de la variabilité ou des fluctuations de la variable collective), provoque une période de transition de phase se traduisant par une bifurcation de phase amenant le système vers un autre type de coordination dynamique, signant l'apparition d'un nouvel attracteur. L'augmentation ou la diminution régulière de ce paramètre de contrôle joue sur l'instabilité du

système et l'on observe souvent un changement brutal du paramètre d'ordre rappelant la non linéarité du système. Ce changement est appelé "transition de phase » ou « bifurcation ». Il est utile d'étudier cette transition d'un état à un autre, car cela permet de mieux connaître le paramètre d'ordre, dans la mesure où cette transition traduit le mouvement de la perte vers le gain de stabilité (Beek et al., 1995).



Source : http://www.volodalen.com

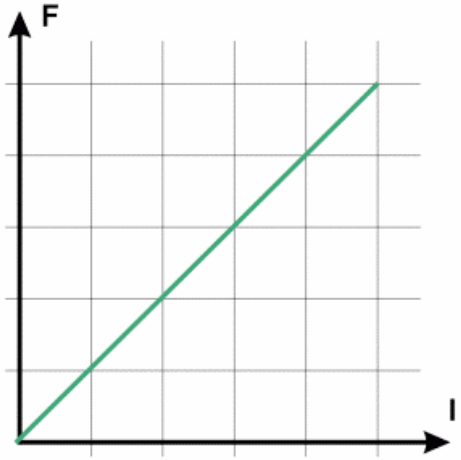
Le rôle joué par le paramètre de contrôle peut encore être mis en évidence dans l'étude de la locomotion humaine (ou quadrupédique chez le cheval par exemple). Les patrons comportementaux de la marche, du trottinement (trot) ou de la course (galop) sont considérés comme attractifs, ou comme des états stables du système.

Ces patrons locomoteurs se caractérisent par une variable collective (ou un paramètre d'ordre), une phase relative entre les différents membres. L'élévation de l'allure (le tapis roulant sur lequel se déplace le sujet ou l'animal voit sa vitesse de déroulement augmenter) donne lieu à l'émergence d'un nouveau patron moteur (passage de la marche au trottinement/trot puis à la course/galop) et, ainsi, à un nouveau patron de phase relative entre les différents segments. La perte de stabilité d'un patron donne en réalité naissance à un nouveau patron momentanément stable. (Rappel de la vicariance chez nos amis les canards).

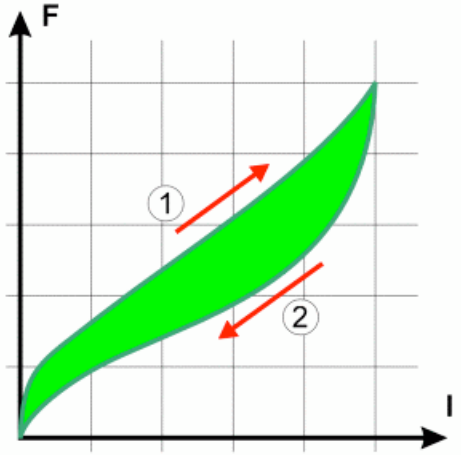
Les perturbations auxquelles sont soumis ces systèmes permettent d'observer leurs réorganisations spontanées et ce qui sous-tend leur stabilité, *i.e.* leur capacité à conserver un patron de coordination préférentiel en dépit de ces perturbations, ainsi que la dimension de leurs attracteurs. Certains états sont plus stables que d'autres (par exemple, le patron en phase ϕ = 0° est toujours plus stable que le patron en anti phase avec ϕ =180°). Certains systèmes se caractérisent par leur multistabilité, tous leurs patrons de coordination préférentiels demeurant stables pour une large gamme de paramètres de contrôle. On peut ainsi affirmer que plus un attracteur est stable, moindre sera l'effet de la perturbation. Les fluctuations sont les agents critiques des systèmes dynamiques. Elles sont en effet le résultat de forces physiques (par exemple des perturbations mécaniques), ou de forces internes au système qui peuvent être guidées par l'information dans l'environnement (c'est-à-dire les paramètres de contrôle). Les instabilités jouent ainsi un rôle induisant un mécanisme permettant de « commuter entre

différents états de coordination, par exemple en entrant ou en sortant de patrons cohérents » (Kelso, 1994).

Différentes mesures de stabilité sont possibles. Scholz et Kelso (1989) ont conduit des analyses formelles des effets de la perturbation, utilisant le temps de relâchement (ou de relaxation, c'est-à-dire le temps nécessaire au système pour retourner à état de pré-perturbation) comme mesure de la stabilité du patron de coordination. Pour une même perturbation, plus le temps de relâchement est court et plus le patron de coordination ayant subi la perturbation est stable. En accord avec les données de cette phase de transition, les résultats de ces analyses montrent que le passage de l'état le moins stable (patron de coordination en anti-phase) à l'état précédent le plus stable (patron de coordination en phase), ne s'effectue pas pour la même valeur du paramètre de contrôle, et ce plus particulièrement lorsque la fréquence critique conduisant à un patron intermédiaire est proche.



Fonctionnement linéaire.
Source pour les 2 figures : www.hp-gramatke.de



Phénomène d'hystérésis : le passage d'un état à un autre ne se produit pas au même moment selon le sens de transformation du système

Clairement énoncé, ceci signifie que le passage d'un état à un autre ne se produit pas au même moment (pour la même valeur critique) selon le sens de transformation du système (par exemple lors de l'augmentation ou de la diminution de température dans le cas des rouleaux de Bénard). Ce phénomène est connu sous le nom d'hystérésis, et rappelle s'il le fallait encore le caractère non linéaire des systèmes étudiés. Ce terme d'hystérèse ou hystérésis provient du grec *husterein*, être en retard, rester en arrière. Il définit ou caractérise en physique la persistance d'un phénomène alors que la cause qui l'a produit a disparu.

En résumé : *l'approche dynamique du contrôle moteur propose différentes notions n'apparaissant pas dans l'approche calculatoire. Il en est ainsi des notions d'émergence, d'attracteur, d'oscillateur, de mouvements réalisés en phase ou en décalage de phase. Cette approche met en jeu également des paramètres particuliers comme les paramètres d'ordre (par exemple la fréquence à laquelle le mouvement est effectué) ou de contrôle (par exemple la vitesse dont l'augmentation (c'est-à-dire l'augmentation de la contrainte) entraîne à un moment donné le passage de mouvements exécutés en phase à des mouvements exécutés en décalage de phase (ou en anti-phase). Une notion importante est celle de stabilité du système.*

C) Conclusion brève sur les approches écologique et dynamique

Comme la plupart du temps, ces approches ont vu le jour en se fondant notamment sur de fortes critiques des approches cognitives prescriptives. Il semble cependant que les oppositions ne soient plus aussi vives actuellement, chaque approche tentant d'intégrer les diverses réfutations évoquées. Quoi qu'il en soit, les approches écologique et dynamique permettent d'envisager de façon tout à fait différente les différents problèmes posés par l'apprentissage et le contrôle moteur. Elles proposent une redéfinition de la notion d'information, mise en œuvre dans une perspective différente de son acception usuelle dans les modèles calculatoires. Les conceptions proposées, faisant parfois appel à des concepts un peu abstraits et difficiles à appréhender, trouvent des applications dans de nombreux domaines (monde du travail, social, économique). Un point central rappelle l'importance du couplage perception-action dans la théorie écologique. La notion temporelle est de première importance dans ces différentes théories.

Emprunts, références, sources

Abernethy, B. (1985) Cue usage in open motor skills : a review of the available procedures. *In* D.G. Russel and B. Abernethy (Eds). *Motor memory and control*. The Otago Symposium. Dunedin : Human Performance Associates, 110-123.

Abernethy, B., & Russell, D. G. (1987a). The relationship between expertise and visual search strategy in a racquet sport. *Human Movement Science*, 6, 283-319.

Abernethy, B., & Russell, D. G. (1987b). Expert-novice differences in an applied selective attention task. *Journal of Sport Psychology*, 9, 326-345.

Adams, J. A. (1971) A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3, 111-150.

Allard, P., Bianchi, J.P. (1996) Analyse du mouvement humain par la biomécanique. Décarie éditeur, Québec, 281 pages.

Atlan, H. (1974) Le principe d'ordre à partir de bruit, l'apprentissage non dirigé et le rêve. *In* L'unité de l'homme, Tome 2 Le cerveau humain, E. Morin & M. Piattelli-Palmarini Eds, Editions du Seuil, Paris, 207-213.

Azémar, G. (1985) Vision de l'espace et anticipation. *Culture technique*, N° 13, 100-117.

Azémar, G. (1987) Vision périphérique, perception de l'espace et réussite sportive chez l'enfant et l'adolescent. *Médecine du sport*, 114-138.

Azémar, G., Ripoll, H (1982) (Coordonné par) Eléments de Neurobiologie des comportements moteurs, Editions INSEP, Paris, 326 pages.

Azémar, G. (2003) L'homme asymétrique. Gauchers et droitiers face à face. CNRS Editions, 324 pages.

Babinski, J. (1899) De l'asynergie cérébelleuse. *Revue Neurologique*, 7, 806-816.

Barlow, H. (1972) Single units and sensations: a neuron doctrin for perceptual psychology? *Perception*, 1, 371-374.

Bear, M. F., Connors, B. W. & Paradisio, M. C. (2002) Neurosciences. A la découverte du cerveau. Editions Pradel, 898 p.

Beek, P. J., Peper, C. E. & Stegeman, D. F. (1995) Dynamical models of movement coordination. *Human Movement Science*, 14, 573-608.

Béguin, P., & Clot, Y. (2004). L'action située dans le développement de l'activité, *@ctivités,* 1 (2), 27-49.

Belenk'ii, Y. Y., Gurfinkel, V. S. & Paltsev, Y. I. (1967) Element of control of voluntary movement. Biofizika, 12, 135-141.

Berg, W. P., Wade, M. G. & Greer, N. L. (1994) Visual Regulation of Gait in Bipedal Locomotion: Revisiting Lee, Lishma, and Thomson (1982). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 20, No 4, 854-863.

Bergé, P., Pomeau, Y. Vidal, C. (1984) L'ordre dans le chaos. Vers une approche déterministe de la turbulence. Editions Hermann, Paris, 353 pages.

Berthoz, A. (1978) Rôle de la proprioception dans le contrôle de la posture et du geste. *In* Du contrôle moteur à l'organisation du geste. Editions Masson, Paris, 187-224.

Berthoz, A. (1989) Coopération et substitution entre le système saccadique et les "réflexes" d'origine vestibulaire : faut-il réviser la notion de "réflexe" ? *Revue Neurologique*, 8-9, 513-526.

Berthoz, A. (1990) EPS interroge Alain Berthoz. Revue E.P.S., N° 225, 8-14.

Berthoz, A. (1991) Le problème des référentiels dans la perception et le contrôle du mouvement. *De la physiologie à la cognition,* D.G.A. Science et Défense, Dunod , 281-300.

Berthoz, A. (1992-1997) Leçons au Collège de France. Notes personnelles Yves Kerlirzin.

Berthoz, A. (1996) Les mouvements du regard : une affaire de saccades. *La Recherche*, N° 289, 58-65.

Berthoz, A. (1997) Le sens du mouvement. Editions Odile Jacob, Paris, 345 pages.

Berthoz, A. (1997) EP.S interroge Alain Berthoz. Revue EPS, N° 268, 9-14.

Berthoz, A. (1999) (Sous la direction de) Leçons sur le corps, le cerveau et l'esprit. Collection "Travaux du Collège de France", Editions Odile Jacob, 510 pages.

Berthoz, A. (2000) Le cerveau et le mouvement. *In* L'université de tous les savoirs, Tome I : Qu'est-ce que la vie ? Editions Odile Jacob, Paris, 450-462.

Berthoz, A, Vidal, P.P. (1993) relations entre les noyaux vestibulaires et le cortex cérébral. *In* Noyaux vestibulaires et vertiges, Arnette, Paris, 89-116.

Bizzi, E., Accornero, N., Chapple, W. & Hogan, N. (1984) Posture control and arm trajectory formation during arm movemtns. *The Journal of Neuroscience*, Vol. 4, No 11, 2738-2744.

Bonnet, M., Guiard, Y., Requin, J., Semjen, A. (1994) Mécanismes généraux de la motricité. *In* Traité de Psychologie expérimentale, Marc Richelle, Jean Requin, Michèle Robert éditeurs, PUF, Paris, 587-656.

Bonnet, M. (1989) La perception visuelle des formes. *In* Traité de Psychologie Cognitive 1, Perception, action, langage. Dunod, Editions Bordas, Paris, 1-82.

Bootsma, R. J. & Van Wieringen, P. C. W. (1990) Timing an Attack Forehand Drive in Table Tennis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 16, No 1, 21-29.

Bootsma, R. J. & Oudejans, R. D. (1993) Visual Information About Time-to-Collision Between Two Objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 19, No 5, 1041-1052.

Bouisset, S. (1981) Postures et mouvements. Un précis de physiologie du travail. Notions d'ergonomie. J. Scherrer et coll. Editeurs, 2e édition, Massion, Paris, 29-105.

Bouisset, S. (1991) Relation entre support postural et mouvement intentionnel : approche biomécanique. *Archives Internationales de Biochimie et Biophysiologie*, 99, 5, A77-A92.

Bouisset, S. (2005) EP.S interroge Simon Bouisset, Biomécanicien du mouvement. Revue EPS, N°316, pp. 5-10.

Bouisset, S. & Zattara, M. (1981) A sequence of postural movements precedes voluntary movement. Neuroscience Letters, 22, 263-270.

Bouisset, S., Maton, B. (1996) Muscles, posture et mouvement. Bases et application de la méthode électromyographique. Hermann Editeurs, Paris, 735 pages.

Boussaoud, D. (1998) Un immense chantier neuronal. *La Recherche*, N° 309.

Boy, G. & Morel, M. (2004) Affordances et esthétique des interfaces. Revue Alliage, Editions du Seuil, 11 pages.

Brandt, T., Dieterich, M. & Danek, A. (1994) Vestibular cortex lesions affect the perception of verticality. *Ann Neurol*, 35, 403-412.

Bryson, A. E., & Ho, Y. C. (1975) Applied Optimal Control, Wiley, New-York.

Biryukova, E. & Bril, B. (2OO2) Bernstein et le geste technique. Technologies, Idéologies, Pratiques : Revue d'Anthropologie des Connaissances, Vol. XIV, n°2, 49-68.

Cadopi, M. (1990) Les invariants dans le contrôle des actions morphocinétiques. *In* Pratiques sportives et modélisation du geste, coordonné par Vincent Nougier et Jean-Pierre Blanchi, Collection Grenoble Science, UFRAPS de Grenoble, 143-162.

Chandler, R.F., Clauser, C.E., Mc Conville, J.T., Reynolds, H.M. & Young, J.W. (1975) Investigation of inertial properties of the human body, AMRL Technical Report, Wright Patterson Air Force Base, OH, 74-137: Aerospace Medical Research Laboratories, Aerospace Medical Division (NTID N° AD-AO16485).

Clark, B. & Graybiel, A. (1964) Perception of the postural vertical following prolonged bodily tilt in normals and subjects with labyrinthine defects. *Acta Otolaryngol*, 58, 143-8.

Clément, G. & Rézette, D. (1985) Motor behavior underlying the control of the upside-down vertical posture. *Experimental Brain Research*, 59, 478-484.

Cordo, P. J., Nashner, L. M., (1982) Properties of postural adjustements associated with rapid arm movements. *Journal of Physiology*, 47, 287-302.

Crenna, P., Frigo, C., Massion, J., Pedotti, A. (1987) Forward and backward axial synergies in man. *Experimental Brain Research*, 65, 538-548.

Debû, B. (2001) L'apprentissage moteur. *Ann. Kinésithér.*, t. 28, n°5, 196-204.

Découverte (Revue du Palais de la Découverte) 2006, N° 341, octobre, 92 pages.

Delorme, A. (1994) Mécanismes généraux de la perception. *In* Traité de Psychologie expérimentale, Marc Richelle, Jean Requin, Michèle Robert éditeurs, PUF, Paris, 161-218.

Dempster, W. T. (1955) Space requirements of the seated operator: geometrical, kinematic and mechanical aspects of the body with special reference to the limbs. WADC technical report 55-159, Wrigft air development center, 254 pages.

Duchenne de Boulogne (1867) Physiologie des mouvements, Editions Baillière, Paris.

Dunbar, D.C., Vieilledent, S., Kerlirzin, Y., Hallgrímsson, B. & Berthoz, A. Dissociation of distance and direction during locomotor trajectory formation by humans performing sequential jumps. *Non publié.*

Dubois, D., Klumpp, N. & Morel, M.A. (2002) Geste, mouvement, action. Analyse lexicale et sémantique des concepts. *In* Le geste technique, réflexions méthodologiques et anthropologiques. Sous la direction de Blandine Bril et Valentine Roux, Editions Erès, Technologies, idéologies/pratiques, 13-28.

Durey, A. (1997) Physique pour les sciences du sport – STAPS. Masson, Paris, 248 pages.

Enoka, R. M. (1988) Neuromechanical basis of kinesiology. Second Edition. Human Kinetics, 466 pages.

Eustache, F. & Faure, S. (2000) Manuel de neuropsychologie. Editions Dunod, Paris 2ème édition, 236 p.

Feldman, A. G. (1966) Functional tuning of the nervous system during control of movement or maintenance of a steady posture. III Mechanographic analysis of the execution by man of the simplest motor task. Biophysics, 11, 766-776.

Fisher (1972) Body Image. *In* D. Sills (Ed.), *International Encyclopedia of the Social Sciences*, New-York: Collier-Macmillan, Vol. 2, 113-116.

Fitts, P. M. (1954) The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 47, No 6, 381-391.

Flash, T., Hogan, N. (1985) The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model. *The Journal of Neuroscience*, Vol. 5, No 7, 1688-1703.

Flash, T., Hogan, N. (1995) Optimization Principles in Motor Control. *In* The Handbook of Brain Theroy and Neural Netwotks, Michael A. Arbib Editor, The MIT Press, 682-685.

Fodor, J. A. & Pylyshyn, Z. W. (1981) How direct is visual perception? Some reflections on Gibson's "Ecological Approach". *Cognition*, 9, 139-196.

Gahery, Y. & Massion, J. (1981) Coordination between posture and movement. *Trends in Neurosciences*, 4, 199-202.

Gallagher, S (1986) Body Image and Body schema: A Conceptual Clarification. *The Journal of Mind and Behavior*, Vol 7, N° 4, 541-554.

Gelfand, I. M., Gurfinkel, V. S., Tsetlin, M. L.& Shik,M. L. (1966) Problems in analysis of movements. *In*: Models of the Structural Functional Organization of Certain Biological Systems (Amer. translation, 1971), M.I.T. Press, Cambridge. Gelfand I.M., Gurfinkel V.S., Fomin S.V. and Tsetlin M.L. (Eds), 330-345.

Gaver, William W. (1991) Technology Affordances. *In*: Robertson, Scott P., Olson, Gary M., Olson, Judith S. (ed.): Proceedings of the ACM CHI 91 Human Factors in Computing Systems Conference. April 28 - June 5, 1991, New Orleans, Louisiana, 79-84.

Gagey, P.M. (1993) Huit leçons de posturologie. Paris, Association française de posturologie.

Gibson, J. J. (1975). Events are perceivable but time is not. *In* J. T. Fraser & N. Laurence (Eds.), The study of time II, 295-301. New York: Springer-Verlag.

Gibson, J. J. (1977). The theory of affordances, *In* R. E. Shaw & J. Bransford (Eds.), Perceiving, Acting, and Knowing. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Gibson, J.J. (1979) The ecological approach to visual perception. Lawrence Erlbaum Associates Publishers, Hillsdale, New jersey, 332 p.

Gibson, J. J. (1982) A preliminary Description and Classification of Affordances, *In* E.S. Reed & R. Jones (Eds), Reasons for realism, Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 403-406.

Goodale, M. A. (1997) Visual routes to perception and action in the cerebral cortex, in *Handbook of Neuropsychology* (Vol. 11) (Boller, F. and Grafman, J., eds), Elsevier, 91–109.

Goodale, M.A. (1998) Visuomotor control: Where does vision end and action begin? *Current Biology*, 8, R489-R491.

Goodale, M. A., Milner, A. D., Jakobson, L. S., & Carey, D. P. (1991). A neurological dissociation between perceiving objects and grasping them. *Nature*, 349 (6305), 154-156.

Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, 15 (1), 20-25.

Goodale, M. A., Humphrey, G. K. (1998) The objects of action and perception, *Cognition*, 67, 181–207.

Grèzes, J. & Decety, J. (2002) Does visual perception of object afford action, Evidence from a neuroimaging study. *Neuropsychologia*, 40, 212-222.

Haken, H. (1983) Synergetics: An introduction. 3rd Edition Berlin, Heidelberg, New York Springer.

Haken, H. (1984) Laser light dynamics. Amsterdam: North-Holland.

Haken, H., Kelso, J. A. S. & Bunz, H. (1985) Theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51, 347-356.

Hazan, Z. (1986) Optimized movement trajectories and joint stiffness in unperturbed, inertially loaded movements. *Biological Cybernetics*, 53, 373-382.

Hecaen, H. (1978) Les apraxies idéomotrices. Essai de dissociation. *In* Du contrôle moteur à l'organisation du geste. H. Hecaen & M. Jeannerod, Eds. Editions Masson, Paris, 343-358.

Head, H. & Holmes, G. (1911) Sensory disturbances from cerebral lesions. *Brain*, 34, 102-245.

Head, H. (1920) Studies in Neurology. Hodder and Stoughton, London, T2.

Hebb, D. O. (1949) The Organization of Behavior: A Neurophysiological Theory. Wiley, New York.

Hess, W. R. (1943) Teleokinetisches und ereimastisches kraftsystem in der Biomotorik. *Helv. Physiol. Pharmacol.* Acta, 14 D, 65-72.

Hogan, N. (1984) An organizing principle for a class of voluntary movements. *The Journal of Neuroscience*, Vol. 4, No 11, 2745-2754.

Horak, F. B., Nashner, L. M. (1986) Central programming of postural movements: adaptation to altered support-surface configurations. *Journal of Neurophysiology*, 55, 1369-1381.

Horak, F. B., Mc Pherson, J. M. (1995) Postural orientation and equilibrium. *Handbook of Physiology.* New York: Oxford University Press.

Horcholle-Bossavit, G (1994-1995) Cours DEA Biomécanique & Physiologie du mouvement. Paris XI Orsay.

Imbert, M., De Schonen, S. (1994) Vision. *In* Traité de Psychologie expérimentale, Marc Richelle, Jean Requin, Michèle Robert éditeurs, PUF, Paris, 345-432.

Jacob, P. (1998) Voir n'est pas toujours voir. *La Recherche*, N° 309.

Jeannerod, M. (1975) Les deux mécanismes de la vision. *La Recherche*, N° 41, 61-89.

Jeannerod, M. (1983) Le cerveau machine. Physiologie de la volonté. Editions Fayard, Le temps des sciences, Paris, 226 pages.

Jeannerod, M. (1998) La double commande d'une pince de haute précision. *La Recherche*, N° 309.

Kawato (1996) Trajectory formation in arm movements: minimization principles and procedures. *In* N. Zelaznik (Ed.), Advances in motor learning and control. Champaign, IL, Human Kinetics Publishers, 225-259.

Keele, S. W. (1968) Movement control in skilled performance. *Psychological Bulletin*, Vol. 70, N°6, Part 1, 387-403.

Keele, S. W. & Posner, M. I. (1968) Processing of visual feddback in rapid movements. *Journal of Experimental Psychology*, 77, 155-158.

Lacour, M. (1998) Contrôle postural et stratégies sensorielles. *In* Posture et équilibre, Sauramps médical, 123-135.

Lacquaniti, F., Terzuolo, C. & Viviani, P. (1983) The law relatying the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, 54, 115-130.

Lee, D. N. (1980) The Optic Flow Field: The Foundation of Vision. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London.* Series B, Biological Sciences, Vol. 290, No 1038, 169-178.

Lee, D. N., Lishman, J. R. & Thomson, J. A. (1982) Regulation of Gait in Long-Jumping. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8, 448-459.

Lee, W. A. (1984) Neuromotor synergies as a basis for coordinated intenttional action. *Journal of Motor Behavior*, Vol. 16, N°2, 135-170.

Mace, W. M. (2000) Discussion: The roots of Emerging Ecological Psychology. *Ecological Psychology*, 12 (4), 345-352.

Mc Pherson, J. (1988) The neural organization of postural control - Do muscle synergies exist? Posture and gait: Development, adaptation and modulation. B. Amblard, A. Berthoz and F. Clarac (Eds). Elsevier Science Publishers B.V. (Biomedical Division), 381-390.

Mc Pherson, J. (1991) How flexible are muscle synergies? Motor Control: Concepts and Issues. D.R. Humphrey and H.J. Freund (Eds). John Wiley and Sons Ltd, 33-47.

Mannoni, L. (1999) Etienne-Jules Marey, la mémoire de l'œil. Gabriele Mazzotta Editeur (Milan), Cinémathèque française, Paris, 418 pages.

Marey, E.J. (1894) Des mouvements que certains animaux exécutent pour retomber sur leurs pieds lorsqu'ils sont précipités d'un lieu élevé. Compte-rendu des séances de l'Académie des Sciences, séances des 29 octobre et 5 novembre, t. 118, 4 pages.

Massion, J. (1984a) Fonctions motrices. Encyclopédie Médico-chirurgicale, Neurologie, 17002 D^{10}, 11, 28 pages.
Massion (1984b) Postural change accompanying voluntary movements. Normal and pathological aspects, *Human Neurobiology*, 2, 261-267.

Massion, J. (1990) De la posture au mouvement. *In* Pratiques sportives et modélisation du geste, coordonné par Vincent Nougier et Jean-Pierre Blanchi, Collection Grenoble Science, UFRAPS de Grenoble, 195-213.

Massion, J. (1992) Movement, Posture and Equilibrium: Interaction and Coordination. *Progress in Neurobiology*, Vol 38, 35-56.

Massion, J. (1997) Cerveau et motricité. Presses Universitaires de France, Pratiques Corporelles, 187 pages.

Massion, J., Viallet, F. (1990) Posture, coordination, mouvement. *Revue Neurologique*, 146, 10, 536-542.

Massion, J., Gurfinkel, V. S., Lipshits, M., Obadia, A. & Popov, K. (1992) Stratégie et Synergie : deux niveaux de contrôle de l'équilibre au cours du mouvement. Effets de la microgravité. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 314, Série III, 87-92.

Merleau-Ponty, M. (1945) Phénoménologie de la perception. NRF, Editions Gallimard, 531 pages.

Milner, D. & Goodale, M (1995) The visual brain in action, Oxford: Oxford University Press.

Mittelstaedt, H. (1983) A new solution to the problem of the subjective vertical *Naturwissenschaften*, 70, 272-281.

Nelson, W. L. (1983) Physical principles for economies of skilled movements. *Biological Cybernetics*, 46, 135-147.

Ninio, J (1998) Comment le cerveau donne forme à l'image. *La Recherche*, N° 305.

Norman, D.A. (1999) Affordances, Conventions and Design. Interactions, 6 (3), pp. 38-41.

Nougier, V. (1989) L'orientation de l'attention visuelle en sport. Thèse de Doctorat, Université de Paris X (Spécialité Sciences de la Vie et de la Santé, Mention STAPS), 265 pages.

Ohlmann, T. (1988) La perception de la verticale. Variabilité interindividuelle dans la dépendance à l'égard des référentiels spatiaux. Thèse de Doctorat d'Etat ès Lettres, Paris VIII Vincennes, 428 pages.

Ohlmann, T. (1990) Les systèmes perceptifs spatiaux vicariants. *In* M. Reuchlin, J. Lautrey, C. Marendaz, T. Ohlmann (Eds), Cognition : l'individuel et l'universel. Presses Universitaires de France, Paris, 21-58.

Ohlmann, T. (1993) Processus vicariants et théorie neutraliste de l'évolution : une nécessaire convergence. Communication présentée aux XXIVème Journées d'Etudes de l'Association de Psychologie Scientifique de Langue Française, Aix-en –Provence, 26 pages.

Ohlmann, T., Marendaz, C. (1991) Vicariances et affordances, deux outils pour l'ergonomie cognitive. *De la physiologie à la cognition,* D.G.A. Science et Défense, Dunod, 372-391.

Orion (Association), (1999) Le Système Tonique Postural. Notions générales destinées au corps médical. Connaissances fondamentales cliniques et thérapeutiques, 44 pages.

Pailhous, J., Bonnard, M. (1989) Programmation et contrôle du mouvement. *In* Traité de Psychologie Cognitive 1, Perception, action, langage. Dunod, Editions Bordas, Paris, 129-197.

Paillard, J. (1955) Réflexes et régulations d'origine proprioceptive chez l'homme. Etude neurophysiologique et psychophysiologique. Librairie Arnette, Paris, 289 pages.

Paillard, J. (1971) Les déterminants moteurs de l'organisation spatiale. *Cahiers de Psychologie*, 14, 261-316.

Paillard, J. (1975) L'acte moteur comme facteur d'adaptation et de progrès évolutif. Colloque International Sports et Progrès de l'Homme, FSGT, 16 pages.

Paillard, J. (1976 a) Tonus, posture et mouvement. *In* Traité de Physiologie, C. Kayser Editeur, Tome III, Chapitre 6, Flammarion, Paris, 521-728.

Paillard, J. (1976 b) Quelques problèmes de Psychophysiologie appliqués à L'Education Physique. Annales de l'I N S E P, n° 10, 21-32.

Paillard, J. (1977) La machine organisée et la machine organisante. Conceptions récentes sur la neurobiologie des fonctions motrices. Revue de l'Education Physique Belge, XVII, 19-48.

Paillard, J. (1980) Le corps situé et le corps identifié. Une approche psychophysiologique de la notion de schéma corporel. *Rev. Méd. Suisse Romande*, 100, 129-141.

Paillard, J. (1982) Le pilotage du moteur musculaire. *In* Neurobiologie des comportements moteurs, coordonné par Ripoll, H. & Azémar, G., Editions INSEP, Paris, pp. 9-35.

Paillard, J. (1983) Les sciences du système nerveux et le formalisme du hasard organisationnel. *In* P. Dumouchel & J.P. Dupuy (eds), L'auto-organisation, de la Physique au Politique. Paris, Seuil, 219-237.

Paillard, J. (1984) Espace et structures d'espace. *Comportements*, n°1, 7-19.

Paillard, J. (1986) Itinéraire pour une psychophysiologie de l'action. Editions ACTIO, Joinville le Pont, 230 pages.

Paillard, J. (1987) Vers une psychobiologie de l'intentionnalité. *In* Recherches en APS 2, M. Laurent & P. Therme Eds, 163-194.

Paillard, J. (1988) Posture and locomotion: old problems and new concepts. *In* Posture and Gait: Development, adaptation and modulation. B. Amblard, A. Berthoz and F. Clarac, Editors, Elsevier Science Poublications, V-XI.

Paillard, J. (1990) Réactif et prédictif : deux modes de gestion de la motricité. *In* Pratiques sportives et modélisation du geste, coordonné par Vincent Nougier et Jean-Pierre Blanchi, Collection Grenoble Science, UFRAPS de Grenoble, 13-56.

Pavard, B., Berthoz, A., Lestienne, F. (1976) Rôle de la vision périphérique dans l'évaluation du mouvement linéaire. Interaction visuo-vestibulaire et effets posturaux. *Le travail humain*, 39, 1, 115-138.

Pedotti, A., Crenna, P., Deat, A., Frigo, C. & Massion, J. (1989) Postural synergies in axial movements: short and long-term adaptation. *Experimental Brain Research*, 74, 3-10.

Perrin, C., Conraux, C., Collard, C., Freyss, G., Sauvage, J.P. (1987) L'équilibre en pesanteur et impesanteur. Editions Arnette, Paris, 413 pages.

Perrin, P., Vitte, E., Pozzo, T. (1991) Equilibration dans les sports acrobatiques. *Cinésiologie*, xxx, 277-285.

Perrin, P., Lestienne, F. (1994) Mécanismes de l'équilibration humaine. Monographies De Bois-Larris, Editions Masson, Paris, 163 pages.

Pozzo, T. (1988) Application de la stabilométrie à l'étude des mécanismes moteurs d'une figure acrobatique : l'appui tendu renversé. *Science & Sports*, 3, 173-180.

Pozzo, T. (1989) Etude du contrôle sensorimoteur d'un équilibre de luxe, l'appui tendu renversé. Mémoire pour le diplôme de l'INSEP, Paris, 71 pages.

Pozzo, T. (1990) Contribution de l'orientation du regard et de la stabilisation céphalique au contrôle de la posture et du mouvement. Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6, Spécialité Sciences de la vie, 122 pages.

Pozzo, T. & Clément, G. (1988) Application de la stabilométrie à l'étude des mécanismes moteurs d'une figure acrobatique : l'appui tendu renversé. *Science & Sports*, 3, 173-180.

Pozzo, T., Berthoz, A., Lefort, L. (1990) Head stabilization during various locomotor tasks in humans: I Normal subjects. *Experimental Brain Research*, 82, 97-106.

Pozzo, T., Berthoz, A., Lefort, L., Vitte, E. (1991) Head stabilization during various locomotor tasks in humans: II Patients with vestibular deficits. *Experimental Brain Research*, 85, 208-217.

Pozzo, T., Berthoz, A., Lefort, L. (1992) Head kinematics during complex movements. The Head-Neck Sensory Motor System, A. Berthoz, P.P. Vidal and W. Graaf (Eds). Oxford University Press, 587-590.

Pozzo, T., Berthoz, A., Popov, C. (1994) The effect of gravity on the coordination between posture and movement. Vestibular and neural front. K. Taguchi, M. Igarashi and S. Mori (Eds). Elsevier Science, B.V., 589-601.

Prigogine, I., Stengers, I. (1979) La nouvelle alliance. Editions Gallimard, Folio essais, 439 pages.

Pulaski, P. D., Zee, D. S. & Robinson, D. A. (1981) The behavior of the vestibulo-ocular reflex at high velocities of head rotation. *Brain Research*, 222, 159-165.

Reuchlin, M. (1977) Psychologie. Presses Universitaires de France, Fondamental. 678 pages.

Reuchlin, M. (1978) Processus vicariants et différences interindividuelles. *Journal de Psychologie*, 2, 133-145.

Requin, J. (1980) (Sous la direction de) Anticipation et comportement. Editions du CNRS, Paris, 640 pages.

Rigal, J.P. (1985) Les fondements de la motricité, contrôle des actes moteurs. *Motricité Humaine*, 307-337.

Ripoll, H., Azémar, G. (1987) (Coordonné par) Neurosciences du Sport. Traitement des informations, prises de décision et réalisation de l'action en sport. Editions INSEP, Paris, 412 pages.

Roll, J. P. (1994) Sensibilités cutanées et musculaires. *In* Traité de Psychologie expérimentale, Marc Richelle, Jean Requin, Michèle Robert éditeurs, PUF, Paris, 483-542.

Rock, Irvin (2001) La perception. De Boeck Université, 267 p.

Roll, J. P. & Roll, R. (1988) From eye to foot: a proprioceptive chain involved in postural control. *In* Posture and Gait: Development, adaptation and modulation. B. Amblard, A. Berthoz, F. Clarac (Eds) Elsevier, Amsterdam, 155-164.

Rosenbaum, D. A. (1991) Human Motor Control. Academic Press, 411 pages.

Rosenbaum, D. A. (1996) Three approaches to the degrees of freedom problem in reaching. *In* Hand and Brain, Neurophysiology and Psychology of Hand Movements. Wing, A., Haggard, P. Flanagan, J. R. Eds. Academic Press, San Diego, 169-185.

Rossetti, Y., Rode, G., Boisson, D., Pisella, L., Pélisson, D. (1999) Tromper le cerveau pour le guérir. *La Recherche*, N° 324.

Rossetti, Y. & Pisella, L. (2000a) L'ego Lego® : déconstruire ou reconstruire le cerveau-esprit ? *Intellectica*, 2, 31, pp. 137-173.

Rossetti, Y. & Pisella, L. (2000b) Neuropsychologie des relations perception/action. *In* Percevoir, s'orienter et agir dans l'espace. Approche pluridisciplinaire des relations perception-action. Yann Coello & Jacques Honoré Eds, Editions Solal, pp. 205-235.

Rousseu, C. & Crémieux, J. (2003) L'asymétrie dans la perception visuelle de la verticalité est-elle constante chez un individu ? *In* Posture et équilibre, Physiologie, Techniques, Pathologies. Solal éditeur, Marseille, 117-128.

Savelsbergh, G. J. P., Whiting, H. T. A & Bootsma, R. J. (1991) "Grasping Tau". *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance,* 31, 1655-1663.

Savelsbergh, G. J. P. & Bootsma, R. J. (1994) Perception –action coupling in hitting and catching. *International Journal of Sport Psychology*, 25, 331-343.

Science et Vie (1998) Le cerveau et le mouvement. Hors série, n°204, 156 pages.

Schmidt, R.A. (1975) A Schema Theory of Discrete Motor Skill Learning. *Psychological Review*, Vol. 82, N°4, 225-260.

Schmidt, R.A. (1991). Motor learning principles for physical therapy. *In* Foundation for Physical Therapy. Contemporary Management of Motor Control Problems: Proceedings of the II-STEP Conference. Alexandria, VA: Foundation for Physical Therapy.

Schmidt, R.A. (1999) Apprentissage moteur et performance. Editions Vigot, Collection Sport + Enseignement, Paris, 339 pages.

Schmidt, R. A. & Lee, T. D. (1999) Motor control and learning. A behavioral emphasis. Human kinetics, 493 pages.

Schmidt, R. A. (2003) Motor Schema Theory After 27 Years: Reflections and Implications for a New Theory. *Research Quaterly for Exercise and Sport*, Vol. 74, N°4, 366-375.

Scott, M. A., Li, F. X. & Davids, K. (1997) Expertise and the regulation of gait in the approach phase of the long jump. *Journal of Sports Science*, 15 (6), 597-605.

Sherrington, C. S. (1906) The integrative action of the nervous system. Scribner.

Sherwood, D. E. & Lee, T. D. (2003) Schema Theory: Critical Review and Implications for the Role of Cognition in a New Theory of Motor Learning. *Research Quaterly for Exercise and Sport*, Vol. 74, N°4, 3676-382.

Signoret, J.L. & North, P. (1979) Les apraxies gestuelles, Paris, Masson.

Simonet, P. (1985) Apprentissages moteurs. Processus et procédés d'acquisition. Editions Vigot, Collection Sport + Enseignement, Paris, 219 pages.

Sperry, R.W. (1950) Neural basis of the spontaneous optokinetic response produced by visual inversion. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 43, 482-489.

Temprado, J. J., Montagne, G. (2001) Les coordinations perceptivo-motrices. Editions Armand Colin, Collection Dynamiques, 175 pages.

Thomas, A. (1940) Equilibre et équilibration. Masson et Compagnie, Editeurs, Paris, 564 pages.

Tortora, G.J., Grabowski, S.R. (1994) Principes d'anatomie et de physiologie. Deuxième édition française, De Boeck Université, Anjou (Québec), 1204 pages.

Tresilian, J. R. (1999) Visually timed action:time-out for 'tau'? *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 3, No 8, 301-310.

Turvey, M. T., Fitch, H. L., & Tuller, B. (1982). The Bernstein perspective: I. The problems of degrees of freedom and context-conditioned variability. In J.A.S.Kelso (Ed.), *Human motor behavior - An introduction* (pp. 239-252). Hillsdale, London: Lawrence Erlbaum Associates.

Tyldesley, D. A., & Whiting, H. T. A. (1975). *Operational timing. Journal of Human Movement Studies*, 1, 172-177.

Uno, Y., Kawato, M. & Suzuki, R. (1989) Formation and Control of Optimal Trajectory in Human Multijoint Arm Movement. *Biological Cybernetics*, 61, 89-101.

Vereijken, B. (1991) The dynamics of skill acquisition. Amsterdam: Free University.

Vidal, P. P., Gouny, M. & Berthoz, A. (1978) Rôle de la vision dans le déclenchement de réactions posturales rapides. Arch. Ital. Biol., 116, 281-291.

Vieilledent, S. (2000) Contribution à l'étude de la géométrie des trajets locomoteurs chez l'homme. Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6, Spécialité Sciences Cognitives, 209 pages.

Viviani, P. (1994) Les habiletés motrices. *In* Traité de Psychologie expérimentale, Marc Richelle, Jean Requin, Michèle Robert éditeurs, PUF, Paris, 777-858.

Viviani, P. & Stucchi, N. (1992) Biological movements look uniform: Evidence of motor-perceptual interactions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 3, 603-623.

Vital-Durand, F. (1978) Plasticité du développement des conduites sensorimotrices du chaton. *In* Du contrôle moteur à l'organisation du geste. H. Hecaen & M. Jeannerod, Eds. Editions Masson, Paris, 168-183.

Von Bertalanffy, L. (1972) Théorie générale des systèmes. Editions Dunod, 298 pages.

Von Holst, E. (1954) Relations between the central nervoius system and the peripheral organs. *British Journal of Animal Behavior*, 2, 89-94.

Von Holst, E. & Mittelstaedt, H. (1954) Das Reafferenzprinzip (Wechselwirkungen zwischen zentralnervensystem und peripherie). Naturwissenchaften, 37, 464-476.

Wadman, Denier van der Gon, Geuze & Mol (1979)

Wann J. P., Nimmo-Smith, I. & Wing, A. M. (1988) Relation between velocity and curvature in movement: Equivalence and divergence a power law and a minimum-jerk model. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14, 4, 622-637.

Warren, W. H. (1984) Perceiving affordances: Visual guidance of stair climbing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10, 683-703.

Warren W. H., Kay, B. A., Zosh, W. D., Duchon, A. P. & Sahuc, S. (2001) Optic flow is used to control human walking. *Nature Neuroscience*, Vol. 4 No 2, 213-216.

Warren W. H., Young, D. S. & Lee, D. N. (1986) Visual Control of Step Length During Running Over Irregular Terrain. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 12, No. 3, 259-266.

Warren, W. H., & Whang, S. (1987) Visual Guidance of Walking Through Apertures: Bodyscaled information and affordances. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 13, 371-383.

Weil-Barais, A. (1993) Percevoir. *In* L'homme cognitif, PUF, Paris, 91-108.

Weil-Barais, A. (1993) Voir. *In* L'homme cognitif, PUF, Paris, 127-156.

Welford, A.T. (1977) La charge mentale de travail comme fonction des exigences de la capacité de la stratégie et de l'habileté. *Le travail humain*, 40, 2, 283-304.

Wiener, N. (1948) Cybernetics - Control and Communication in the Animal and the Machine, MIT Press, Cambridge. Mass.

Williams, A. M., Davids, K., Burwitz, L. and Williams, J. G. (1992) Perception and Action in Sport. *Journal of Human Movement Studies*, 22, 147-204.

Winter, D. A. (1990) Biomechanics and motor control of human movement. Second Edition. Wiley Intercsience, 277 pages.

Witkin, H.A. (1949) Perception of body position and of the position of the visual field. *Psychological monographs: General and Applied,* 63, 1-46.

Zanone, P.G. (1999) Une approche écologique-dynamique de la coordination. *In* Précis de rééducation de la motricité manuelle. Sous la direction de J.M. Albaret & R. Sopelsa, Editions Solal.

Zattara, M. & Bouisset, S. (1986) Chronometric analysis of the posturo-kinetic programming of voluntary movement. Journal of Motor Behavior, Vol. 18, N°2, 215-223.

Sites :

http://www.artemis.jussieu.fr/hermes/hermes/actes

http://www.college-de-france.fr

www.spatiald.wpafg.af.mil/Overview.aspx

http://convection.ifrance.com

http://www.volodalen.com

www.hp-gramatke.de
http://jacquespaillard.apinc.org

http://www.activites.org/v1n2/beguin.fr.pdf