

Les mécanismes de la proprioception

Après avoir expliqué (cours 1) le sens du terme proprioception et présenté les différents récepteurs proprioceptifs, l'objectif de ce cours est de tenter d'expliquer le fonctionnement des mécanismes de rééquilibration.

Les termes clés : Anticipation / Préaction et rétroaction
Régulation / homéostasie posturale
Niveaux de contrôle moteur
Programmes moteurs automatisés

La proprioception : comment ça marche ?

Le fonctionnement de la proprioception, des mécanismes de rééquilibration implique à la fois des organes mécaniques (les FNM qui sont des mécanorécepteurs) et le système nerveux et ce dans les deux sens : pour communiquer l'information aux centres nerveux (informations afférentes : le degré et le niveau de déséquilibre) et, en retour, pour commander une nouvelle réponse motrice de rééquilibration (information efférente)...L'objectif du travail de proprioception étant d'améliorer la liaison entre ces deux systèmes et de gagner du temps sur la réponse motrice.

On peut prendre l'image d'une voiture moderne, équipée de capteurs électroniques qui renseignent le conducteur sur le comportement du véhicule, et qui permettent de réagir (par exemple si la voiture change de file involontairement sur l'autoroute, un signal est émis) ou de réguler automatiquement le comportement de la voiture (exemple : régulateur de vitesse ou freins ABS, anti bloquage système qui empêchent les roues de se bloquer en cas de freinage trop brusque).

« Les objectifs principaux du système sensori-moteur dans lequel s'inscrit la proprioception, et qui permet une communication bidirectionnelle cruciale entre les systèmes sensoriel et moteur, sont d'anticiper, maintenir ou restaurer la stabilité globale du corps d'une part (maintien postural/équilibre) et la stabilité segmentaire et articulaire d'autre part, lors du mouvement. Ainsi, les aspects proprioceptifs, le contrôle musculaire et le contrôle moteur sont liés pour ne pas dire indissociables. »

La proprioception est en substance **un mécanisme de rétroaction et de préaction** : le corps se déplace ou est déplacé, puis les informations (afférentes) correspondantes sont envoyées au cerveau, à la suite desquelles des ajustements peuvent être apportés afin d'organiser, et de contrôler le mouvement (Berthoz, 2013).

Selon Berthoz, que dans ce système sensorimoteur, **le cerveau agit comme un anticipateur biologique** faisant des prédictions sur les événements à venir. Par sa grande plasticité, il s'appuie sur des expériences récentes combinant signes moteurs ou sensoriels ou représentant la procédure nécessaire pour accomplir/ajuster un geste ou atteindre un but grâce au système musculaire. Ceci, dépendamment du retour d'informations sur le succès ou l'échec de l'action

réalisée qui précède celle à venir. La raison d'existence du cerveau étant la production de mouvements complexes (cf. travaux de Daniel Wolpert). Les informations concernant le sens kinesthésique ou l'appréciation consciente de la position des membres rapportée à la gravité, sont traitées à des niveaux du subconscient, de sorte que nous n'avons pas besoin de consacrer une activité consciente à des tâches telles que le maintien postural ou la stabilité articulaire (Baechle et Earle, 2008).

En résumé : le mécanisme de la proprioception s'inscrit dans le cadre plus général de l'évolution de la motricité processus décrit par J. Paillard, il s'agit de passer d'un stade purement réactif (comportement typique d'un débutant dans une activité sportive) à un stade à la fois réactif et prédictif (sens de l'expertise : l'expert a acquis par expérience des scénarios qui lui permettent d'anticiper et de mieux réagir aux évènements reconnus).

Voir en annexe extraits d'un article de J. Paillard...

Autre façon d'expliquer **la proprioception** : c'est un **mécanisme de régulation**, notion d'homéostasie...

Définition **homéostasie** : **processus dynamique par lequel un organisme maintient et contrôle son environnement interne en dépit des perturbations externes** (Riemann et al., 2002).

Cette régulation s'opère sur deux plans qui sont complémentaires : celui du contrôle postural (maintien de la station debout) et celui du contrôle moteur (pour effectuer des mouvements)

« Produire du mouvement est une chose. L'organiser, le contrôler, l'ajuster tout en maintenant une posture adaptée en est une autre. Le mouvement s'appuie sur le contrôle postural » (Massion, 1992).

Des ajustements posturaux peuvent intervenir en amont de l'action motrice (ajustements anticipés), pendant l'action réalisée ou après la perturbation (réactions posturales) (Gahéry, 1987 : cf. Broussal-Derval et Delacourt, 2015).

La proprioception fait le lien entre la sensibilité posturale (statesthésie) et la sensibilité du mouvement (kinesthésie).

Régulation de la posture : c'est grâce à l'activité tonique des muscles (**tonus musculaire**) s'opposant à la gravité (muscles antigravitaires) et entretenue par le **réflexe myotatique**, que cette verticalisation ou réponse axiale liée à notre bipédie, peut être maintenue.

La régulation de la posture se fait de façon réflexe, c'est le résultat de l'évolution, nous n'avons pas besoin de « réfléchir » pour nous maintenir debout... Par contre, pour les gestes plus inhabituels, les gestes sportifs, intervient les différents niveaux de contrôle moteur.

Les niveaux de contrôle moteur :

Le contrôle moteur au sens large désigne l'ensemble des processus nerveux et musculaires permettant la réalisation d'une activité motrice. Il évoque ainsi l'orchestration du mouvement déterminé par la relation suivante selon Ferec (2015):

Informations proprioceptives + contrôle musculaire + intentions = contrôle moteur

« Les théories du contrôle moteur tentent de rendre compte de la manière dont les sujets produisent des comportements moteurs adaptés aux contraintes de tâches spécifiées ».

« Le contrôle moteur touche plus au domaine des neurosciences qui le définissent comme la capacité de faire des ajustements posturaux dynamiques et de diriger le corps et les membres dans le but de produire un mouvement déterminé dans une situation donnée à un instant T. »

De la sorte, pour produire une réponse musculaire appropriée, le SNC combine en général trois niveaux de contrôle moteur : le premier niveau émane du réflexe spinal qui utilise les afférences proprioceptives; le second est relatif au tronc cérébral qui coordonne les informations visuelles et vestibulaires en utilisant également la proprioception des récepteurs articulaires; le troisième rattaché au plus haut niveau du SNC (cortex moteur, ganglions de la base et cerebellum ou cervelet) est basé sur le programme cognitif qui accumule l'expérience par la répétition de mouvements et qui permet les ajustements volontaires (Dupeyron, 2012).

En résumé, il existe trois niveaux de contrôle moteur, d'intégration motrice qui correspondent à trois types de mouvement : (selon Collet)

1^{er} niveau : les réflexes

2^{ème} niveau : les programmes automatisés

3^{ème} niveau : les mouvements volontaires

1- Les réflexes :

Définition : « Réponse motrice involontaire déclenchée par un stimuli externe » Collet)

Exemples : le réflexe myotatique, le réflexe myotatique inverse, le réflexe d'inhibition réciproque...

Caractéristiques : le message nerveux s'arrête au niveau de la colonne vertébrale, la moelle épinière... Le circuit neuronal est donc très court et la volonté (le cerveau) n'intervient pas : le temps d'effection est donc très rapide (exemple : retirer sa main d'une source chaude).

- mouvement non contrôlé par la volonté
- déclenché par un stimuli externe
- pour permettre une réaction d'urgence de protection (correction de mouvement, exemple pour se rééquilibrer, stabilisation de la posture, fuir une source nociceptive...)

- le temps de déclenchement d'un réflexe est de l'ordre de 40 millisecondes (ms) alors que le temps de réaction simple (qui passe par le cerveau) est de l'ordre de 150 à 180 ms

Remarque : c'est ce qui justifie que si les capteurs sur les starting blocs enregistrent un temps de réaction du coureur de moins de 100 ms, c'est que le coureur a triché...

2- Les programmes moteurs automatisés : (ou automatismes)

Définition : « mouvement effectué sans contrôle psychique » Collet

Ce sont les mouvements que nous exécutons sans avoir besoin de réfléchir, qui ont été acquis du fait de l'évolution de notre espèce ou de l'apprentissage... Le circuit neuronal est un peu plus long mais s'arrête à l'étage inférieur du cerveau. Donc trois caractéristiques importantes :

- diminution de la mobilisation attentionnelle
- processus de mémorisation (c'est le programme moteur)
- temps de latence de l'ordre de 80 à 120 ms

Exemples :

- La locomotion basique : la marche, la course...
 - les gestes sportifs automatisés grâce à la répétition (exemple, le double pas du tir en course au Basket, le geste du service au Tennis...)
- 3- Les mouvements volontaires : mouvements plus complexes qui demandent un traitement de l'information par le cerveau, ce temps de traitement étant plus long (de l'ordre de 180 à 200 ms)...

Caractéristique : ce sont des mouvements conscients, initié par le néo-cortex, sur la base d'une intention qui demande un traitement central par le cerveau, traitement qui débouche sur une décision.

Exemple : réaliser un enchaînement de pas de danse pour la première fois...

L'objectif du travail proprioceptif, comme tout apprentissage moteur, est de gagner du temps de traitement de l'information et de « se libérer » de la demande attentionnelle pour effectuer un mouvement afin d'être disponible pour faire autre chose, donc si possible ne solliciter que les deux premiers niveaux du contrôle moteur :

- uniquement les réflexes pour les actions « basiques » comme le maintien de la posture
- utiliser des programmes moteurs automatisés qui nous font gagner du temps, dans le cadre de la proprioception, pour nous rééquilibrer (exemple : reprise d'appui dans un duel 1 contre 1 au Hand, reprise d'appui après un smash au Badminton)

Gagner du temps pour être plus efficace, gagner du temps pour éviter de se blesser par manque de maîtrise, manque de temps pour activer les mécanismes de rééquilibrage... par exemple, pour éviter de se faire une entorse.

La proprioception sur le plan prophylactique : le mécanisme de l'entorse

Les activités quotidiennes imposent des niveaux variables de défi (ou contraintes) au système neuromusculaire pour protéger le système squelettique, ses articulations et leurs ligaments contre les blessures. [...] Ainsi, la proprioception est utile pour prévenir les blessures dans des tâches lentes, modérément rapides et même rapides. Cependant, **le système neuromusculaire est parfois confronté à des sollicitations considérables**, en particulier lors des réceptions sur des surfaces dures voire irrégulières inhérentes à de nombreuses pratiques sportives. La survenue des pics de force d'impact appliqués aux régions distales des membres, (notamment lors du contact du pied avec le sol : 'force de réaction au sol' dont le pic survient autour de 50 ms) laissent peu de temps au système neuromusculaire pour compléter la réponse motrice dans ce que les auteurs appellent 'le temps de réponse disponible'. [...]

Biomécaniquement, cela peut placer un ligament ou un tendon en situation précaire, car plus le niveau de tension du ligament augmente, plus il se rigidifie, et plus son seuil de tolérance diminue augmentant les risques d'une lésion consécutive à une tension supplémentaire. Et quelquefois, le système neuromusculaire n'a plus le temps de développer des forces de contraction musculaire pour limiter les déplacements articulaires et les tensions ligamentaires, pouvant ainsi devenir nuisibles.

L'objectif du travail proprioceptif est donc de préparer l'organisme à réagir plus vite dans une situation de déséquilibre mettant une articulation comme la cheville en hyper allongement (comme à la réception d'un saut par exemple), à optimiser le déclenchement du réflexe myotatique...

En résumé :

« La proprioception, s'exprime au travers la motricité statique et dynamique, à la fois réflexe, automatique et volontaire. En effet, ce que soulignent une nouvelle fois Gasq et al. : "Le système proprioceptif permet d'apporter la plupart des solutions aux problématiques liées au mouvement, car il permet un codage permanent en trois dimensions autour de chaque articulation. Il s'agit du premier maillon du contrôle moteur, dans le sens où les informations proprioceptives existant pour chaque action, conditionnent en grande partie ce contrôle, qu'il soit réactionnel (rétrocontrôle ou « feedback » d'origine périphérique) ou anticipatoire (« feedforward control » d'origine centrale : action prédictive) ».

Synthèse : les idées clés

- rôle complémentaire des récepteurs : ils fournissent des informations complémentaires, les FNM la position et les mouvements, les OTG la force du mouvement exécuté...
- le rôle complémentaire des muscles antagonistes et agonistes : lors d'un mouvement, les muscles agonistes se contractent pour effectuer le geste et c'est donc au sein des muscles antagonistes qui s'allongent que les FNM sont activés et donc fournissent l'information, effectuent le « codage nerveux » du mouvement. Cela correspond au réflexe d'inhibition réciproque...

« Dans un mouvement, les muscles agonistes exercent la fonction d'exécution et les muscles antagonistes le codage du mouvement » Collet.

- au sein d'un FNM, le rôle complémentaire de l'innervation alpha et Gamma (notion de co-activation) : même lorsqu'un muscle n'est pas en tension, le système Gamma reste en veille et fournit l'information proprioceptive en permanence...
- le rôle complémentaire des types de réflexe : le réflexe myotatique qui régule le degré d'allongement et enclenche la réaction de rééquilibration, le réflexe d'inhibition réciproque qui permet aux muscles antigravitaires de conserver leur tonus, le réflexe myotatique inverse qui permet de réguler la force de contraction nécessaire au maintien de la posture, de la rééquilibration...
- le rôle complémentaire des niveaux de contrôle moteur : réflexe / programmes automatisés / mouvements volontaires... Selon la complexité du mouvement, les informations sont gérées à un niveau : pour les mouvements les plus simples, type réaction à un stimuli, c'est au niveau réflexe (moelle épinière), pour les mouvements habituels, répétés par entraînement, c'est au niveau des programmes automatisés (cerveau inférieur) et pour les mouvements plus élaborés, inhabituels, il y a intervention du cortex supérieur donc un temps de réponse plus long... l'objectif de la proprioception c'est donc de gagner du temps de réponse pour éviter de se blesser comme sur une entorse, d'apprendre, d'intégrer par répétition des réactions d'équilibration qui seront ensuite pré-programmées et que l'on pourra anticiper.

Citations clés :

« Ce contrôle anticipateur est permis par la présence d'un modèle interne construit à partir des expériences proprioceptives antérieures » Julia

« Le contrôle proprioceptif semble plus efficace chez les sujets qui ont pu, grâce à leur pratique sportive, construire une représentation interne de leur corps en mouvement » Collet

« Les objectifs principaux du système sensori-moteur sont d'anticiper, maintenir ou restaurer la stabilité globale du corps (maintien postural) et la stabilité segmentaire et articulaire d'autre part (mouvements). Cette homéostasie posturale et articulaire doit être maintenue au cours de tâches statiques ou dynamiques » Julia

Conclusions : en lien avec le 3^{ème} cours sur les mises en œuvre

Les objectifs des exercices de proprioception sont :

De provoquer une meilleure adaptation du système neuromusculaire en jouant sur sa plasticité et le rôle complémentaire de chaque niveau d'intégration motrice grâce à l'expérience...

Il s'agit de faire vivre des situations pour « habituer » le sujet à s'équilibrer, se rééquilibrer dans des contextes proches de sa pratique sportive si possible (exemple : mime de contre au Volley en stabilisant la réception)

Dans une optique de prévention :

- entretenir la stabilité musculo-articulaire et permettre d'anticiper un mouvement lésionnel, entraîner des réactions d'équilibration les plus rapides possibles et anticiper une instabilité qui peut être source d'une entorse par exemple..

et d'efficacité :

- être mieux coordonné dans des situations de déséquilibre (coordination inter et intra musculaire)
- être plus rapide pour se rétablir (exemple, dans les changements de direction, reprise d'appui, réception d'un saut...)
- avoir des réponses pré-programmées qui nous font gagner du temps de traitement de l'information

et pour cela, le moyens à systématiser dans les exercices:

- agir sur les processus nerveux : demander de la concentration, utiliser le stress pour lever les inhibitions (circuit de Renshaw), optimiser les réflexes...
- agir sur les structures passives qui assurent la stabilité des articulations (ligaments, capsule) mais surtout actives, les muscles : « l'accroissement de la raideur musculaire permet d'accroître la stabilité articulaire » d'où l'intérêt de coupler le travail proprio au travail excentrique et isométrique (exemple, gainage)

Bibliographie :

- « La proprioception », M. Julia, D. Hirt, S. Perrey, S. Barsi, Ed. SAURAMPS MEDICAL, 2012
- « Mouvement et cerveau » Christian Collet, Ed. De Boeck
- Jacques Paillard : « Réactif et prédictif, deux modes de gestion de la motricité »,
- Gilles Péninou et Patrick Colné « La posture debout », Ed. MASSON, 2018
- Jean Pierre Roll : « Physiologie de la kinesthèse. La proprioception musculaire : sixième sens, ou sens premier ? » Ed. Persee, 2003

Annexes :

Extrait de l'article de Jacques Paillard : « Réactif et prédictif, deux modes de gestion de la motricité », 1990

« L'étude du système nerveux a longtemps été dominée par une conception de son fonctionnement qui l'identifiait à une machine à réagir; capable de répondre automatiquement aux sollicitations de son environnement par la mobilisation coordonnée d'instruments moteurs préadaptés (cf. le modèle réflexologique classique de la Physiologie Sherringtonienne et le schéma S-R de la Psychologie behaviouriste). La progression des Neurosciences contemporaines incite à mettre aujourd'hui l'accent sur la capacité du système nerveux à extraire les invariances et les régularités dans le chaos d'informations que collectent les organes des sens. Elle invite, par suite, à prendre en considération à côté des capacités de la "machine réactive" ses propriétés de "machine prédictive". D'où un intérêt nouveau, au moins de la part des neurobiologistes, pour la conception de l'existence, dans les mémoires du système, d'une représentation interne d'un modèle d'environnement prévisible (Craik, 1943). C'est sur la base d'une telle représentation que le système acquiert le pouvoir de gérer ses instruments moteurs de manière prédictive. Grâce à ses possibilités d'anticipation ou d'extrapolation à plus ou moins court terme, il devient capable d'élaborer des projets d'action et de planifier leur exécution en fonction des conséquences prévisibles de leur réalisation effective en actes. »

« On peut aussi mentionner les intéressantes recherches de l'équipe de Jean Massion dont on connaît la contribution à l'élucidation des régulations posturales en "feedforward" (Massion, 1984). Cette équipe a étudié les processus d'anticipation associés aux mouvements intentionnels dans le fameux protocole du "garçon de café" où le plateau portant les consommations se trouve inévitablement déséquilibré lorsqu'un consommateur prend l'initiative d'en retirer lui-même la carafe malgré la prévision que peut en faire le garçon, alors que le plateau reste parfaitement stable lorsque son allègement consécutif au soulèvement de la carafe résulte de l'initiative du garçon lui-même. Ce modèle de régulation anticipatrice donne actuellement lieu à des analyses quantitatives précises. »