

**Dr. Serge Mesure**

UMR 7287 Institut des Sciences du Mouvement E.J. Marey  
Aix Marseille Université & CNRS  
Faculté des Sciences du Sport  
163 avenue de Luminy, CP 910  
13288 Marseille cedex 9  
France



FONDATION  
**Paul Bennetot**

*La Fondation du  
Groupe Matmut*

**RAPPORT FINAL :****Le rôle des informations sensorielles comme outils de  
rééducation dans la prise en charge des patients  
dépendants hémiparétiques****STRATSENSO**

## RAPPORT FINAL :

# Le rôle des informations sensorielles comme outils de rééducation dans la prise en charge des patients dépendants hémiparétiques

STRATSENSO

## TRAUMATOLOGIE ET DEPENDANCE

### Responsable du projet :

Dr. Serge MESURE, agissant pour le compte de l'Institut des Sciences du Mouvement Etienne Jules Marey, responsable de la recherche

Institut des Sciences du Mouvement Humain Etienne Jules Marey  
UMR 7287 CNRS & Aix-Marseille Université ; Faculté des Sciences du Sport, CP  
910, avenue de Luminy, 13288 Marseille cedex 09 (FRANCE)

Tél: 33 (0) 4 91 17 04 32

fax: 33 (0) 4 91 17 22 52

E-mail: [serge.mesure@univ-amu.fr](mailto:serge.mesure@univ-amu.fr)

Site web : <http://www.staps.univ-mrs.fr/>

<http://www.ism.univ-amu.fr/>

### Lieu de recherche :

Centre de Rééducation Fonctionnelle de Valmante  
UGECAM-PACAC ; Traverse de la Gouffonne - BP 83, 13275 Marseille cedex 09  
(France)

Date de début du projet : Début du projet en Juin 2013

Date de fin du projet : Février 2015

Durée du projet : 2 an

Budget total du projet : 81 311.90 €

Contribution Paul Bennetot : 30 828.95 € soit 37.91%

Partenaires financiers : Aix Marseille Université

Centre Rééducation fonctionnelle de Valmante, Marseille UGECAM

## Acronyme : STRATSENSO

**Résumé du projet :**

**Justification de la recherche :** Les phénomènes de latéralités fonctionnelles ainsi que les stratégies posturales présentes chez l'Homme montrent une asymétrie entre les hémisphères cérébraux dans la régulation du comportement humain. Cette asymétrie est particulièrement intéressante lors d'un ictus cérébral perturbant la relation inter-hémisphérique et rendant visibles les caractéristiques fonctionnelles de chaque hémisphère. Les déficits d'organisation posturo-locomotrice, affectant un grand nombre de ces patients hémiparétiques même après rééducation, doivent être évalués en termes de spécificités hémisphériques.

**Problématiques de recherche :** Les informations proprioceptives, contribuant largement au contrôle postural, sont affectées après ictus cérébral. Cependant, il est rapporté des troubles posturaux et locomoteurs spécifiques à des lésions de l'un ou de l'autre des hémisphères cérébraux. Comme cela est sous-entendu pour les informations visuelles, il pourrait exister une sensibilité proprioceptive majorée pour l'un des hémisphères, se traduisant dans la mise en place des stratégies sensori-motrices des patients hémiparétiques.

**Objectifs de recherche :** La comparaison entre les sujets sains et les sujets pathologiques devrait grandement nous apporter les outils de compréhension de l'intégration de cette information sensorielle dans l'élaboration des stratégies posturales. Par ailleurs, cette compréhension neurophysiologique amènera une évolution positive en termes de prise en charge rééducative à tous les stades de la réhabilitation.

Type d'étude : elle se base sur différentes orientations:

- Evaluation d'une procédure diagnostique / d'un traitement
- Evolution de pratiques professionnelles et de la situation médico-économique

***Nous demandons de ce fait la finalité des financements proposés soit 9216 euros***

**Un certain nombre de difficultés sont apparus durant la réalisation de ce projet.**

La principale étant le recrutement des sujets répondant à nos critères de sélection et permettant de réaliser les situations expérimentales dans des conditions acceptables pour les sujets. Le nombre de sujets hémiparétiques sur un centre de rééducation est certes trop important mais l'hétérogénéité des patients ne permet pas un recrutement parfait de l'ensemble des patients. Notre objectif de sélectionner des sujets hémiparétiques droits et gauches rend encore plus difficile cette sélection dans le temps. Ce qui explique le retard chronologique sur l'estimation prévue initialement. Néanmoins avec un minimum de patience nos groupes se sont progressivement constitués, ce qui nous permet de finaliser notre étude.

**Le prévisionnel pour la suite du projet :** Nous souhaitons soumettre une continuité dans la réalisation de ce protocole d'étude sur la proprioception et la prise en charge des patients soit traumatiques soit neurologiques. En effet

nous souhaitons bénéficier de l'apport de nos résultats pour comprendre les processus permettant de fournir des techniques mais aussi des réflexions sur une utilisation plus pertinente et appropriée des stimulations proprioceptives dans le cadre des traitements rééducatifs de ces patients (Ligamentoplasties du genou droite et Gauche et hémiparétiques droits et gauches)

**Nous avons durant ces années de recherche valorisé le travail effectué mais aussi valorisé la fondation Paul Bennetot dans nos différentes démarches scientifiques. En voici la synthèse :**

**Bilan des Actions Effectuées ou le nom de la fondation a été mis en exerque.**

**Communication affichée :**

Duclos NC, Barthélemy J, Maynard L, Abbas D, Mesure S. (2013) *Inter-hemispheric treatment of visual cues: effects on postural control for hemiparetic patients.* Septembre, Journée Française de Biomécanique, Marseille



**Communications orales**

**1 Publications scientifiques**

Duclos NC, Maynard L, Abbas D & Mesure S (2013). Effects of aging in postural strategies during a seated auto-stabilization task. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 23, 807–813.

Duclos NC, Maynard L, Barthélemy J & Mesure S (2014b). Postural stabilization during

bilateral and unilateral vibration of ankle muscles in the sagittal and frontal planes. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 11, 130.

## **2 Présentations des travaux de thèse lors de congrès scientifiques**

### ***2.1 Communications à titre de conférencier invité***

Duclos NC. (2014). Présentation : Contrôle postural et patients hémiplegiques : l'utilisation des informations proprioceptives est-elle la même pour tous ? & Atelier pratique : La boucle sensori-motrice, une piste pour la rééducation... 6ème Journée Scientifique de l'IFMK de Vichy, Octobre, Vichy (France).

Duclos NC. (2014). Présentation : Stratégies posturales et organisation inter-hémisphérique des informations sensorielles. 2ème Forum de la Kinésithérapie en Région Centre, Septembre, Orléans (France).

### ***2.2 Communications orales lors de congrès internationaux***

Mesure S, Maynard L, Duclos NC. (2014). Proprioceptive vibration effect in old healthy subjects. ESPRM-SOFMER Congress, Mai, Marseille (France).

Duclos NC, Maynard L, Abbas D, Mesure S. (2014). Postural control and vibrations: a plan-dependent effect? ESPRM-SOFMER Congress, Mai, Marseille (France).

Duclos NC, Maynard L, Abbas D, Mesure S. (2014). Proprioception and cortical hemispheric treatment. ESPRM-SOFMER Congress, Mai, Marseille (France).

### ***2.3 Communications orales lors de congrès en France***

Duclos NC, Maynard L, Mesure S. (2013). Vibrations tendineuses unilatérales ou bilatérales dans le contrôle postural : effets potentiels ? XXVIIIe Congrès de Médecine Physique et de Réadaptation, Novembre, Reims.

Duclos NC, Mesure S. (2013). Contrôle postural : quand les vibrations nous aident à comprendre les stratégies sensori-motrices. 28e Congrès Général de la Société Française de Physique, Juillet, Marseille.

### ***2.4 Communications orales lors de journées scientifiques***

Duclos NC, Maynard L, Abbas D, Mesure S. (2014). Informations proprioceptive : une dominance hémisphérique ? 10ème journée de l'Ecole Doctorale Sciences du Mouvement Humain, Juin, Montpellier (France).

### ***2.5 Communications affichées lors de congrès internationaux :***

Duclos NC, Maynard L, Abbas D, Mesure S. (2014). Influence of proprioceptive vibrations on postural strategies for stroke patients: a hemispheric dependence. 21st International Society for Posture & Gait Research World Congress (ISPGR), Juillet, Vancouver (Canada).

Duclos NC, Maynard L, Abbas D, Mesure S (2014). Cerebral hemispheres: a proprioceptive

dependence for postural control? 21st International Society for Posture & Gait Research World Congress (ISPGR), Juillet, Vancouver (Canada).

Duclos NC, Maynard L, Mesure S (2014). Proprioceptive vibration effects on older healthy subjects. 21st International Society for Posture & Gait Research World Congress (ISPGR), Juillet, Vancouver (Canada).

Mesure S, Maynard L, Duclos N. (2014). Uni or Bilateral vibration effect during postural control for young adults. ESPRM-SOFMER Congress, Mai, Marseille (France).

Duclos NC, Dancre E, Maynard L, Mesure S (2014). Sensory perturbations and strategies of spatial exploration: the neglect syndrome. ESPRM-SOFMER Congress, Mai, Marseille (France).

### *2.6 Communications affichées lors de journées scientifiques :*

Duclos NC, Maynard L, Mesure S. (2013). Vibrations tendineuses chez les adultes jeunes: Quelles sont les stratégies posturales? 9e journée de l'Ecole Doctorale Sciences du Mouvement Humain, Mai 2013, Marseille (France).

### **Articles soumis : Un article accepté dans Brain Research avec corrections mineures et un article en soumission pour la revue Gait and Posture**

***Nous allons résumer notre réflexion ainsi que conclure sur l'ensemble des résultats de nos travaux à partir de la subvention attribuée par la fondation Paul Bennetot. En sachant que nous gardons à votre disposition les références bibliographique ainsi que le document de thèse qui explique l'ensemble de nos résultats.***

### **Rapport final :**

## **I Discussion relative notre étude**

### Résumé des résultats de l'étude

Lors des essais Contrôles initiaux, les paramètres de vitesse sont croissants entre les témoins, les patients LHG et les patients LHD. L'application de vibration tendineuse sur la cheville parétique a des conséquences posturales moindres que sur la cheville non-parétique, d'autant plus lors des sessions achilléennes. L'amplitude de déplacement postérieur est similaire entre les groupes.

Lors des vibrations achilléennes, les patients LHG montrent un déplacement médiolatéral remarquable : il est similaire entre les conditions bilatérales et non-parétiques. Les patients LHD montrent une sensibilité particulière aux vibrations tendineuses avec une augmentation de la variabilité et de la vitesse du centre des pressions importante et durable, pendant et après les vibrations.

## 1 Performances posturales de base

Les essais Contrôles nous ont permis d'estimer les capacités posturales des patients en situation stable. Il apparaît un déficit croissant entre les témoins, les patients avec une lésion de l'hémisphère gauche (LHG) et les patients avec une lésion de l'hémisphère droit (LHD) pour les paramètres de vitesse et de surface. Le paramètre de vitesse est particulièrement intéressant car il est celui qui reflète le mieux les capacités d'équilibre dynamique (ou fonctionnel) des patients hémiparétiques (Stevenson & Garland, 1996). Les trois groupes montraient un comportement visuo-dépendant, c'est-à-dire que l'absence de vision altérait significativement leur performance. Les patients LHD devenaient significativement plus instables que les témoins en condition « Sans vision ». Nos résultats montrent donc des difficultés posturales majorées lorsque l'hémisphère droit est lésé, particulièrement en l'absence de vision. Par ailleurs, la composante médio-latérale de la vitesse ( $V_{ML}$ ) des patients LHD était supérieure à celle des témoins, avec et sans vision. Il apparaît une difficulté posturale médio-latérale lorsque l'hémisphère droit est lésé.  $V_{ML}$  était le seul paramètre non affecté par l'absence de vision pour les témoins et les patients LHG. Il l'était pour les patients LHD, ce qui confirme une dépendance visuelle particulièrement marquée pour le contrôle des oscillations médio-latérales pour ces patients (Manor et al., 2010). Par ailleurs, les patients LHD sont apparus plus sensibles à la fatigue et aux post-effets spécifiques aux sessions achilléennes et fibulaires que les patients LHG malgré des pauses réalisées à la demande du patient et un ordre aléatoire entre les sessions. Ces résultats mettent en évidence, en condition stable non perturbée, que le côté de l'atteinte lésionnel : i) est associé aux niveaux de performances posturales ; ii) a un rôle déterminant dans le contrôle du plan frontal, traduisant un contrôle hémisphérique plan-dépendant ; iii) le côté lésionnel est également associé à une utilisation spécifique des différentes sources d'informations sensorielles.

D'un point de vue clinique, le délai moyen écoulé depuis l'accident vasculaire cérébral ayant entraîné la lésion était similaire (environ 10 mois) entre les groupes de patients, mélangeant des patients en phase aiguë et d'autres en phase chronique. Le comportement moyen observé comprend donc des composants déficitaires, des composants de récupération et d'autres de compensation. Dans les premiers temps suivant l'AVC, la récupération spontanée liée à des phénomènes centraux est présente (Kwakkel et al., 2004) et il est possible d'observer un continuum entre des comportements visuo-dépendants et visuo-indépendants (Yelnik et al., 2006). Au fil du temps, les patients apprennent à compenser les déficits acquis par un mécanisme de substitution (Nudo et al., 2001), qui se traduit à la fois au niveau central et dans les stratégies motrices développées. Les comportements visuo-dépendants sont alors prédominants (Bonan et al., 2004a) et apparaissent comme une stratégie de compensation (Bonan et al., 2004b). Une telle stratégie pourrait être envisagée pour les informations proprioceptives. En effet, malgré des ajustements posturaux inadaptés et désynchronisés (Marigold & Eng, 2006), la stratégie de cheville redevient prédominante dans le maintien de l'équilibre au cours de la récupération fonctionnelle des patients hémiparétiques (Rogind et al., 2005). Dans notre étude, les comportements posturaux en condition de vibration n'étaient pas associés aux délais d'AVC, excepté pour les patients LHD. Ces patients LHD les plus instables (variabilité et vitesse) lors des vibrations étaient ceux avec les délais d'AVC les plus longs (en moyenne 10 mois), ce qui est inverse à la logique de récupération au cours du temps. Pourtant, cela va dans la continuité des études prospectives qui montrent que les patients LHD ont quatre fois plus de chance de chuter lors des 6 mois suivant leur AVC que les patients LHG (Alemdaroğlu et al., 2012). Ces troubles posturaux récurrents pourraient être déterminants dans la durée de leur hospitalisation

(Campbell & Matthews, 2010) et impacter la qualité de leur prise en charge thérapeutique.

Nos deux groupes montraient une asymétrie de répartition du poids significative par rapport aux témoins. La répartition du poids corporel était similaire pour les groupes de patients, avec en moyenne plus de poids sur le pied non-parétique, ce qui est en accord avec la littérature (35/65% du poids total ; Genthon et al., 2008b). Lors du maintien de la station debout avec les pieds écartés de 10 cm de manière contrainte, les patients LHD montrent une asymétrie plus importante que les patients LHG et semblent incapables de porter une part significative de leur poids sur le membre parétique (Rode et al., 1998). Le fait de laisser libre la position des pieds semble diminuer cette différence entre les patients. Dans notre étude, certains patients (2 par groupe, soit 15% des patients ; Figure III.6) adoptaient une posture asymétrique en faveur de leur membre parétique. Cette proportion est la même que celle rapportée par Mansfield et al. (2013). Mansfield et al. (2013) imposaient une position avec un écart de 17 cm entre les pieds correspondant à la position « naturelle » moyenne proposée par McIlroy and Maki (1997), position que nos patients ont adopté de manière spontanée (17,1 (4,4) cm d'écart entre les talons). La position naturelle permet de mettre en évidence des stratégies posturales individuelles spécifiques, difficilement observables par la position standardisée pourtant largement utilisée (Genthon et al., 2008a; Bonan et al., 2013). Cependant, la surcharge du membre parétique semble être l'effet d'une stratégie apprise, sans effet bénéfique sur l'efficacité du contrôle postural en condition stable (Mansfield et al., 2013). Elle ne semble pas non plus bénéfique en condition rendue instable, comme le montre nos résultats. Par ailleurs, nos patients présentaient la caractéristique de placer le pied parétique en avant de leur pied non-parétique. Cette avancée était particulièrement importante pour les patients LHD et associée à une décharge de ce pied. Le choix de cette position instabiliserait encore davantage ce groupe de patients pour le contrôle de l'axe ML.

## 2 Posture et membre parétique

Le déplacement postérieur induit par les vibrations achilléennes était réduit par rapport à celui induit par les vibrations non-parétiques pour les deux groupes de patients. L'asymétrie de répartition du poids sur le pied parétique n'apparaît pas comme un facteur influençant la réponse posturale induite par les vibrations appliquées sur ce pied parétique. Pourtant, l'ajout d'une masse correspondant à 20% du poids du corps chez les sujets sains augmente significativement l'effet des vibrations (Ledin et al., 2004). Un écart de plus de 20% du poids peut être observé entre nos patients « extrêmes » (entre les patients qui répartissaient 15% de leur poids sur leur membre parétique et ceux qui y appliquaient plus de 55% de leur poids). Cela aurait pu s'accompagner d'un effet progressif des vibrations entre ces patients (autant pour les conditions parétiques que non-parétiques) donnant lieu à une corrélation significative. Nous n'observons pas cette corrélation, ce qui montre que d'autres mécanismes entrent en jeu dans la régulation des effets vibratoires lorsqu'un hémisphère est lésé. Ces adaptations seraient prédominantes sur l'effet mécanique associé à la répartition des charges sur le membre vibré.

L'effet minoré des vibrations parétiques du côté était attendu de par les troubles sensitifs caractéristiques du membre parétique (Connell et al., 2008). Les patients LHD montraient des troubles de la sensibilité profonde au niveau de leur cheville associés à une diminution des déplacements induits par la condition parétique. Cependant, les déplacements étaient également réduits chez les patients LHG qui ne montraient pourtant pas de troubles de la sensibilité. L'indépendance entre les troubles de la sensibilité et l'effet des vibrations a été mise en évidence lors de la marche (Lin et al., 2012). Chez les sujets jeunes, les vibrations



appliquées au niveau des membres inférieurs ont une faible influence sur la trajectoire de marche (Courtine et al., 2007), ce qui reste cohérent avec le rôle limité des informations somato-sensorielles dans le contrôle de la locomotion (Jahn et al., 2004). La sensibilité proprioceptive et l'impact des vibrations peuvent donc être dissociés dans le comportement locomoteur des patients. Au contraire les particularités du maintien postural ne peuvent expliquer le manque de relation observé entre la sensibilité et les effets vibratoires. En effet, le contrôle de la position debout est fortement dépendant des informations afférentes de la cheville et particulièrement du Triceps Sural (Gatev et al., 1999). Or, les caractéristiques de l'illusion vibratoire (et ses conséquences) traduisent l'utilisation faite par le SNC des informations afférentes (Thyrion & Roll, 2009). Nos résultats mettent donc en évidence que : i) les informations proprioceptives du membre parétique sont peu considérées pour le contrôle postural de la position bipédique ; ii) que cela est indépendant du niveau de sensibilité profonde évalué par des échelles cliniques.

Les déplacements postérieurs associés aux vibrations achilléennes unilatérales sont clairement différents, avec pour conséquence des déplacements supérieurs lors des vibrations non-parétiques par rapport à celles appliquées sur le membre parétique. Lors des vibrations fibulaires, les effets posturaux des vibrations parétiques et non-parétiques sont similaires. L'asymétrie observée par rapport à ces conditions de vibrations unilatérales peut être dépendante du niveau d'instabilité produit par la perturbation. L'intégration des informations apparait modifiée en fonction de l'intérêt qu'elles représentent pour le maintien de la stabilité. La focalisation sur les informations du membre non-parétique semble nécessaire dans les situations avec un risque de chute important. Lorsqu'un déséquilibre supplémentaire peut mener à cette chute, le SNC adopte une stratégie conservatrice en diminuant certains ajustements posturaux (Aruin et al., 1998). L'intégration par le SNC des informations du membre parétique pourrait en ce sens être limitée, du fait de l'effet imprécis et déstructuré de ce membre sur le contrôle postural (Genthon et al., 2008b). Cette absence d'informations attendues au niveau cortical expliquerait l'implication problématique de ce membre parétique lors du maintien postural, jusqu'à le rendre perturbateur. Nous avons montré dans notre 1<sup>ère</sup> étude que le déclenchement et l'arrêt des vibrations (unilatérales et bilatérales) représente une perturbation pour le système postural des sujets seniors. D'après cette 2<sup>ème</sup> étude, la régulation temporelle des perturbations unilatérales dépend de son côté d'application. Lorsque la perturbation est parétique, son effet est limité dans son amplitude et dans le temps, comme le montre l'évolution des paramètres de vitesse. Le système postural s'adapte rapidement à la perturbation parétique et son arrêt ne perturbe pas la stabilité posturale acquise. Cela pourrait traduire une pondération corticale en faveur de membre non-parétique (Sarlegna & Bernier, 2010). Cela est cohérent avec la déstabilisation induite par l'arrêt des vibrations appliquées sur le membre non-parétique (conditions non-parétiques et bilatérales). Le membre non-parétique semble servir de référence, comme cela est le cas lors de la marche (Lauzière et al., 2014).

Lors de la marche, les patients hémiparétiques augmentent leur temps de simple appui sur ce membre, profitant ainsi du support qu'il assure et les informations qu'il produit (Nardone et al., 2009). Cependant, la sensibilité centrale aux informations proprioceptives se modifie aussi pour les informations issues du membre non-parétique. Les témoins montrent un processus d'adaptation quasiment binaire : au déclenchement des vibrations, la perturbation est soit transitoire ( $P2_1$ ), soit présente jusqu'en fin de vibration. A l'inverse, les patients ne subissent plus les effets de la perturbation en cours de vibration (alors que les témoins le sont toujours, par exemple lors des vibrations bilatérales). De même, le déplacement postérieur lors des vibrations achilléennes bilatérales se stabilise plus tôt (4

secondes) pour les patients par rapport aux témoins. Il apparait donc qu'une lésion hémisphérique altère le rôle de l'information en modifiant l'intérêt qu'elle peut avoir dans l'organisation de l'activité motrice (exemple du faible effet stabilisateur des informations tactiles lors d'un toucher léger ; Cunha et al., 2012) ; mais fort probablement aussi le temps durant lequel la source d'information est prise en compte.

### 3 Comportement postural et hémisphère lésé

Les patients LHD avaient la caractéristique de toujours présenter les paramètres de variabilité et de vitesse de déplacement du centre des pressions les plus importants alors que les positions moyennes étaient similaires aux autres groupes. Lorsque l'hémisphère droit est lésé, les patients sont sensibles aux stimuli proprioceptifs mais ils semblent avoir une difficulté à les utiliser correctement. Cela est en accord avec ce qui a été montré pour les patients hémiparétiques (deux côtés de lésion confondus) lors d'un test d'adaptation à des champs de force. Des auteurs montrent que les patients sont sensibles à la modification de l'environnement mais que leur réponse motrice est inadaptée (Scheidt & Stoekmann, 2007). Dans notre étude, les patients LHD montrent des niveaux de déstabilisation plus élevés (alors que la perturbation appliquée est similaire), avant, durant et après les vibrations. Cette difficulté à intégrer et utiliser les informations proprioceptives (hémisphère droit lésé) est particulièrement visible à l'arrêt des vibrations achilléennes bilatérales. Le temps supplémentaire nécessaire à la stabilisation de ces patients traduit un trouble profond de l'utilisation des informations disponibles au travers du feedback sensoriel, comme cela a été montré lors des tâches de pointage avec ou sans vision (Haaland et al., 2004). Plus précisément, la considération de la perturbation et l'élaboration des stratégies résultantes apparaissent associées au côté lésionnel. En effet, ces auteurs constatent que lorsque la position de la cible était modifiée en cours du pointage, les patients LHG étaient déstabilisés durant les 1ères secondes puis ils atteignaient la position finale définie. A l'inverse, les patients LHD n'étaient pas initialement perturbés par le changement d'environnement, ce qui rendait leur trajectoire inadaptée. Lorsque le contrôle du mouvement nécessite une adaptation aux informations perçues (la cible est déplacée ou les informations disponibles sont modifiées), les patients LHG sont perturbés durant le début de la phase de déstabilisation sensorielle. Ils font ensuite les ajustements nécessaires (en termes de trajectoire du membre supérieur par exemple) pour atteindre la position finale définie (Haaland et al., 2004). A l'inverse, les patients LHD adoptent un comportement de plus en plus inadapté à la situation, ce qui les conduit à des positions finales erronées et variables. Nos résultats sur les observations posturales vont dans le même sens. Lorsque l'hémisphère gauche est lésé, les vibrations sont déstabilisantes mais leur effet sur le centre des pressions est progressivement inhibé. Les patients LHG semblent capables de mettre en place les compensations nécessaires dans la valeur accordée aux informations traitées au niveau central. A l'inverse, lorsque l'hémisphère droit est lésé, la perturbation s'avère peu à peu déstabilisante. Cela sous-entend une capacité de pondération sensorielle corticale différente entre les patients souffrant d'une lésion centrale. Ainsi, lorsque le contrôle du mouvement nécessite une adaptation aux informations perçues (la cible est déplacée ou les informations disponibles sont modifiées), les patients LHG sont perturbés lors de la phase de transition sensorielle. Ils font ensuite les ajustements nécessaires (en termes de trajectoire du membre supérieur par exemple) pour atteindre la position finale définie (Haaland et al., 2004). A l'inverse, les patients LHD adoptent des stratégies qu'ils n'adaptent pas à la situation, ce qui les conduit à des comportements erronés et variables. Les patients LHD montrent une difficulté d'intégration des informations sensorielles dans l'organisation de leur mouvement (déficit d'intégration) et leurs stratégies posturales adaptatives ne sont pas

efficientes.

L'adéquation d'une stratégie motrice adaptative à la situation nécessite que l'individu perçoive correctement son environnement, ce qui n'est pas toujours le cas chez les patients hémiparétiques (Butler & Eskes, 2014). Cela nécessite également que l'individu puisse anticiper les conséquences dynamiques de ces mouvements (Massion, 1992). Or, les caractéristiques neuro-physiologiques de l'organisation musculo-squelettique de ces patients sont modifiées (Marigold et al., 2004a; Scheidt & Stoeckmann, 2007) et asymétriques (Marigold & Eng, 2006) entre les deux hémicorps. Les conséquences et les adaptations que ces modifications doivent procurer au schéma corporel semble longues et limitées (Rousseaux et al., 2014). Cela peut expliquer les comportements posturaux observés entre nos deux groupes de patients. Cela se concrétise aussi par la difficulté de synchronisation des deux hémicorps lors de la marche (Chisholm et al., 2011). De plus, la stabilisation liée à la contrainte gravitationnelle est particulièrement difficile pour les patients LHD car l'intégration centrale de cette contrainte est biaisée. En effet, la représentation de la verticale subjective posturale est inclinée d'un angle plus important pour les patients LHD (Pérennou et al., 2008). Ces auteurs suggèrent pour ces patients une perturbation également de l'intégration des informations vestibulaires. Ainsi, la lésion de l'hémisphère droit altère profondément l'intégration des informations sensorielles disponibles, ce qui renforce les déficits de la boucle sensori-motrice nécessaire au contrôle de la posture et du mouvement, rendant les patients LHD en difficulté pour l'application de leur programme moteur adapté.

Par ailleurs, nous savons que le contrôle de l'axe ML est altéré pour les patients LHD, en l'absence de vision (Manor et al., 2010). L'augmentation systématique des composantes médio-latérales de l'ensemble des paramètres de manière spécifique aux patients LHD (lors des vibrations tendineuses achilléennes et fibulaires) montre qu'une perturbation surajoutée augmente la difficulté du contrôle du centre des pressions associée à la lésion de l'hémisphère droit. Sachant que la composante AP des paramètres enregistrés est modifiée pour les deux groupes de patients, cela signifie que l'hémisphère droit serait plus associé à un « plan dépendant ». L'intégrité de l'hémisphère droit serait donc déterminante pour le contrôle du plan frontal et des informations proprioceptives, ce qui expliquerait la combinaison des déficits. Or, le plan frontal nécessite une intégration multi-sensorielle correcte, comme le montre les déficits posturaux observés lorsque la jonction temporo-pariétale est touchée par la lésion (zone essentielle pour l'élaboration des référentiels et l'intégration combinée des sources d'informations ; Pérennou et al., 2000). L'inadaptation sensorielle induite par la lésion ne permettrait pas la régulation précise du rapport des masses entre elles, qui permet de contrôler le déplacement de son centre de pression. Un maintien postural efficient est alors rendu quasi-impossible, d'autant plus que cette régulation doit être associée à une activité musculaire précise pour minimiser les déplacements, phénomène là aussi altéré chez les patients hémiparétiques (Lindberg et al., 2012).

D'un point de vue biomécanique, la gestion du centre des pressions dans les différents plans de l'espace reste donc une préoccupation majeure pour tous les individus. En accord avec les études de Paillex & So (2003, 2005), nos résultats associés aux perturbations sensorielles proprioceptives montrent une prédominance du contrôle des forces médiolatérales plutôt que des forces antéro-postérieures. L'association entre les scores fonctionnels les plus importants et les faibles niveaux de variabilité ML pour les patients LHD met en évidence que cette instabilité apparaît comme un réel trouble lié au côté de la lésion hémisphérique. La littérature nous

confirme que pour évoluer fonctionnellement, les patients hémiparétiques doivent développer des stratégies adaptatives (Nudo, 2007). Pour les patients avec une lésion de l'hémisphère droit, cela impose un réentrainement au contrôle pertinent de l'axe médio-latéral. Cela correspond selon Hallett et al. (1996) à l'acquisition d'une nouvelle habileté motrice à l'intérieur d'un nouveau répertoire dépendant des ajustements biomécaniques et permettant une adaptation stratégique au regard des informations pertinentes du moment. Par ailleurs, la direction d'instabilité principale lors des vibrations achilléennes et fibulaires est différente (composante AP de la vitesse lors des vibrations achilléennes et pour la composante ML lors des vibrations fibulaires). L'évolution temporelle de ces instabilités est comparable quelles que soit leur direction. Ainsi, la régulation de la sensibilité proprioceptive pourrait être dépendante du positionnement de la perturbation, en plus du plan déstabilisé en lui-même. La considération de ces deux plans de déstabilisation devraient nous aider à comprendre l'organisation du traitement des afférences sensorielles et de leurs conséquences sur la gestion des stratégies d'équilibration (Henry et al., 1998; Allum et al., 2002; Grüneberg et al., 2005).

Au fil des résultats, il apparaît que le membre non-parétique contribue principalement à l'organisation des performances posturales (Marsden et al., 2005). Lors des vibrations achilléennes, le déplacement postérieur induit par les vibrations non-parétiques représente la même contribution au déplacement bilatéral entre les patients LHG et LHD (environ 75%). Cependant, pour les patients LHD, la relation entre le déplacement observé par vibration du côté non-parétique et celui observé en vibration bilatérale était quasi-linéaire. Il apparaît donc que le rôle du membre non-parétique est systématique alors qu'il peut être plus variable entre les individus du groupe LHG. Lorsque l'hémisphère droit est lésé, le membre nonparétique pourrait être considéré comme le membre postural dominant, responsable de la stabilité posturale (Hart & Gabbard, 1997). Cependant, l'utilisation non pertinente des informations proprioceptives et les troubles moteurs qui résultent de la lésion (Lindberg et al., 2012) ne lui permet pas d'être efficace. Pour ces patients LHD, l'importance du recul postérieur lors des vibrations bilatérales et du côté non-parétique est corrélée aux scores fonctionnels les plus élevés. C'est là encore le membre non-parétique qui paraît déterminant, confirmant son rôle clef dans l'élaboration des stratégies posturales des patients LHD. Une sensibilité proprioceptive et une capacité à en gérer les conséquences posturales semblent faire partie des déterminants d'une récupération fonctionnelle efficace (Bensoussan et al., 2004). L'implication dominante du membre non-parétique pour les patients LHG donne lieu à un contrôle médio-latéral spécifique lors des vibrations achilléennes unilatérales. Pour les patients LHG, les informations proprioceptives issues du membre parétique participent au contrôle du plan sagittal (puisque les vibrations achilléennes parétiques induisaient un déplacement significatif) mais apparaissent complètement négligées pour le contrôle du plan frontal. Lorsque le membre parétique est vibré, il n'induit aucun déplacement médiolatéral, contrairement à ce qui est attendu (Duclos et al., 2014b). Lorsqu'il est co-vibré avec le membre non-parétique, le pattern de déplacement adopté est exactement le même que lorsque seul le membre non-parétique est vibré. Or, d'après le modèle d'additivité des informations kinesthésiques (Kavounoudias et al., 1999; Thyron & Roll, 2009), l'amplitude de déplacement AP est bien cohérente avec une implication simultanée des informations des deux membres inférieurs (la stimulation bilatérale regroupe les effets des vibrations unilatérales). Par contre, la comparaison des

déplacements ML montre une contribution presque inexistante du membre parétique. Une analyse électromyographique permettrait d'établir si l'implication du membre parétique est limitée au point que les réactions musculaires seraient absentes lors de ces vibrations bilatérales ou simplement trop faibles pour équilibrer le déplacement médial. Pourtant, les scores moteurs du membre inférieur parétique (significativement altérés par rapport au score maximal) étaient similaires pour nos deux groupes de patients. Cette différence d'organisation relative aux vibrations pourrait reposer sur une préférence centrale en faveur du membre non-parétique pour le contrôle du plan frontal, spécifique à la lésion de l'hémisphère gauche. Cette considération particulière des informations issues du membre inférieur non-parétique peut expliquer les performances de transfert de poids réalisées par ces patients vers ce membre. En effet, les patients LHG sont capables de transférer latéralement plus de poids sur leur membre inférieur non-parétique que les patients LHD, malgré des niveaux de force comparables (Ishii et al., 2010). Comme dans notre étude, ce comportement dépendant du côté de la lésion n'affecte pas les performances vers le membre inférieur parétique. Ces auteurs expliquent ce comportement par une utilisation différente des référentiels liés à l'orientation spatiale. Les patients LHD auraient une perception de leur axe sagittal dévié, ce qui limiterait l'estimation du transfert possible (Saj et al., 2005), alors que la perception de cet axe est peu altérée chez les patients LHG (Pérennou et al., 2008). Par ailleurs, en ayant une meilleure perception de leurs efforts musculaires, les patients LHG peuvent aussi mieux juger de leur déplacement (Brière et al., 2010). Nos résultats mettent cependant en évidence que cette stratégie de surimplication du membre non-parétique est fonctionnellement inefficace puisque l'amplitude du déplacement ML lors des vibrations bilatérales est associée aux scores fonctionnels les plus bas. Cette stratégie tend à renforcer les comportements déficitaires liés à la lésion (avec une diminution du rôle postural du membre parétique), ce qui est généralement associé à un pronostic fonctionnel faible (Roby-Brami et al., 2003). La réintégration du membre parétique dans le schéma postural apparaît nécessaire pour favoriser une récupération fonctionnelle même chez les patients LHG qui montrent des performances posturales plus adaptées.

Au cours de chaque étude, nous avons cherché à répondre à une problématique spécifique liée à l'âge, à l'effet d'une lésion hémisphérique ou encore à l'interactivité entre les sources d'informations sensorielles. A chaque fois, les questionnements sous-jacents ont trouvé leur source dans le contexte plus général du mouvement et de la posture humaine. La considération de ces trois études nous a amené à formuler plusieurs réflexions plus globales. Il nous a paru important d'y apporter quelques éléments de réponse ainsi que certaines perspectives, à la fois pour les connaissances scientifiques qu'elles peuvent apporter mais également pour leurs orientations rééducatives.

#### 4 Dominances sensorielles et contrôle postural

Les entrées sensorielles semblent être utilisées pour une évaluation continue des déstabilisations posturales (boucle sensori-motrice à rétroaction ; Peterka, 2002). Elles semblent aussi impliquées pour un ajustement discontinu (Gatev et al., 1999) ou encore pour déclencher des stratégies posturales programmées, c'est à dire des patrons d'activation musculaires (Grüneberg et al., 2005). Les synergies musculaires peuvent ainsi être guidées par une ou plusieurs entrées sensorielles choisies en

fonction de la tâche. Il n'y a probablement pas de source adéquate spécifique pour la posture ou la locomotion, mais le poids sensoriel des afférences paraît basé principalement sur la précision et le seuil bas de détection du mouvement relatif à l'environnement (Fitzpatrick & McCloskey, 1994). Le rôle de chaque source d'information sensorielle dans le mouvement humain et la capacité à utiliser ces sources varient cependant entre les individus (Isableu et al., 2010). Le quotient de Romberg (QR) est considéré comme indicateur de l'effet stabilisateur des informations visuelles dans le contrôle postural. Il est souvent utilisé pour caractériser les individus comme « visuels » ou « non-visuels » (Chiari et al., 2000). Nous pensons que le QR montrerait une relation avec les paramètres posturaux lors des vibrations car notre raisonnement initial était basé sur une hypothèse exclusive et fixe des stratégies posturales. Les sujets donnant un rôle particulier aux informations visuelles (QR élevé) peuvent choisir cette stratégie parce qu'ils ne sont pas capables d'utiliser correctement leurs informations proprioceptives (Bonan et al., 2004a; Marigold et al., 2004b). Nous pensons qu'ils seraient donc peu sensibles aux vibrations tendineuses. A l'inverse, les sujets peu sensibles aux informations visuelles utilisent d'autres sources d'information, dont les informations proprioceptives, ce qui les rendait logiquement sensibles aux vibrations tendineuses. L'élaboration des stratégies sensorielles serait en réalité beaucoup plus flexible, ce qui apparaît évident à l'introduction/suppression d'une perturbation à la situation de base. Par exemple, lorsque les individus sont debout sur un support horizontal et que ce support devient incliné, tous les individus réajustent rapidement et correctement leur orientation par rapport à la verticale (Kluzik et al., 2005). Le retour à la position initiale du support permet de distinguer d'autres stratégies d'organisation, avec des sujets favorisant le maintien de l'orientation par rapport au référentiel géocentré et d'autres, la stabilisation de la position des chevilles. Notre situation expérimentale mettait en jeu un autre élément du contrôle postural par rapport à Kluzik et al. (2005) : la situation initialement stable est devenue une situation que nous pouvons qualifier de « quasi-dynamique ». En effet, le déplacement du centre des pressions était bien plus large et rapide que lors d'une situation stable mais le sujet ne modifiait pas sa base de support (par un pas par exemple, ce qui caractérise les situations dites « dynamiques » ; Maki & McIlroy, 1997). Nos résultats montrent la faculté du sujet à privilégier et à sélectionner un référent particulier d'information en fonction de ces possibilités actuelles ou restantes. Les stratégies résultantes apparaissent grandement dépendantes des individus. Cela confirme les observations faites lors des stimulations vestibulaires, en position debout (Wardman et al., 2003) comme lors d'exploration visuo-motrice (Adair et al., 2003). Cette variabilité individuelle doit maintenant être prise en compte dans l'optique d'une prise en charge personnalisée, pour les personnes âgées ou dans le cas de pathologies. Le choix stratégique sensoriel individuel permettrait une détection plus rapide des signaux d'erreurs et donc des réactions posturales également plus rapides ou plus fines (Mesure & Lamendin, 2001). La sélectivité d'une source d'afférence sensorielle de surveillance permettrait ainsi de limiter le nombre d'informations lors du traitement au niveau central. Au delà du traitement, c'est la perception et l'utilisation de certains référentiels que les individus semblent favoriser pour contrôler leurs activités (Isableu et al., 1997). L'utilisation de la vision pour stabiliser la posture a souvent servi de base pour déterminer les individus « visuels » et « non-visuels » (Chiari et al., 2000). Plutôt qu'une dépendance vs. Indépendance à l'égard du champ visuel, certains auteurs suggèrent que les sujets présentent une maîtrise inégale des entrées visuelles, proprioceptives et/ou vestibulaires (Isableu et al., 2003; Bonan et al.,

2004a; Vaugoyeau & Azulay, 2010). Les sujets dits dépendants visuels seraient en fait des sujets négligents proprioceptifs, et les indépendants visuels des sujets dominants proprioceptifs. Ces individus seraient adaptables à beaucoup plus de conditions environnementales par une stabilité posturale accrue, étant donné la présence quasi continue de ces informations (Isableu et al., 2003). La vision a par ailleurs la caractéristique d'informer sur la situation mais elle peut également apporter des informations en réafférences (techniques de biofeedback). Cela entraîne une diminution des oscillations posturales constatée chez le sujet sain (Rougier, 2004), la personne âgée (Dault et al., 2003) et le sujet pathologique (De Nunzio et al., 2014). Ces études suggèrent un poids important de l'entrée visuelle dans le contrôle postural même si l'organisation et l'adaptation du contrôle postural dépendent aussi de l'intégrité des boucles réflexes proprioceptives, vestibulaires et visuelles. En effet, ces outils de feedbacks visuels ne permettent pas de restaurer des niveaux de performances similaires entre les différentes populations (Dault et al., 2003). Par des contrôles distincts, mais aussi interdépendants (Fitzpatrick et al., 1996; Duysens et al., 2000), ces boucles permettent d'expliquer une partie du contrôle postural. Chaque individu, sain ou pathologique, aurait donc une pertinence sensorielle particulière. Dans le cadre d'une prise en charge, cette spécificité serait à exploiter pour une efficacité de réhabilitation optimale.

## **5 Sur-stimulation et intégration corticale**

En condition de stimulation proprioceptive, nos résultats montrent un phénomène global de stabilisation qui apparaît de manière plus ou moins précoce en fonction de la disponibilité d'autres informations. En présence d'un mouvement continu comme celui observé, cette stabilisation traduit une stratégie de repondération sensorielle, nécessaire pour éviter la chute (Wardman et al., 2003). Cependant, cette repondération ne semble pas totale, ou en tout cas elle n'entraîne pas la négligence absolue des informations proprioceptives induites par les vibrations. En effet, les positions les plus reculées peuvent être atteintes après cette apparente stabilisation. La position moyenne du centre des pressions et l'amplitude de ses oscillations apparaissent comme deux éléments contrôlés indépendamment (Čapičková et al., 2006), avec une amplitude des oscillations qui continue à augmenter avec le temps de vibration. Cela peut expliquer que les positions extrêmes du CP soit visibles après sa stabilisation moyenne. Pourtant, il est peu probable que le changement de stratégie soit lié aux impératifs d'équilibre et d'orientation par rapport à la verticale. En effet, toutes les positions maximales apparaissent à des instants similaires (entre 12 et 16 secondes), quelle que soit leur amplitude et l'importance du déséquilibre. La composante temporelle apparaît là comme une variable fixe. L'adaptation, par l'intégration d'une nouvelle stratégie motrice considérée comme la plus adaptée à la situation (Ting & McKay, 2007) apparaît fortement liée au temps (Schmid et al., 2011). Ces derniers ont considéré l'adaptation du contrôle postural à une perturbation continue du support et il apparaissait une optimisation musculaire structurée temporellement. L'adaptation aux vibrations tendineuses, également fortement impactée par le temps, pourrait reposer plus sur des phénomènes centraux sensoriels. En effet, lors d'une tâche qui n'a de commun avec la nôtre que l'utilisation des vibrations tendineuses (les sujets devaient mimer l'illusion de mouvement ressentie lors de vibrations du Triceps Brachial ; Cordo et al., 2005), il apparaît une stabilisation de l'illusion également autour de 16 secondes. Les vibrations tendineuses entraîneraient donc une

saturation centrale, par les informations qu'elles émettent.

Le lieu précis de cette saturation est plus difficile à déterminer. Le fonctionnement du système nerveux central semble être fortement plastique. En fonction du contexte, différentes structures centrales seront investies, suggérant une adaptation tant dans l'intégration sensorielle de la posture que dans la construction de l'acte moteur au niveau chronologique. Lors du maintien de la station debout, pieds joints avec les yeux ouverts, le cervelet (lobe antérieur et zone vermiennes) et les zones visuelles sont principalement activées (Ouchi et al., 1999). L'intégration corticale de la posture debout non perturbée semble se baser principalement sur les afférences visuelles. Dans le cas d'un équilibre debout perturbé par des oscillations volontaires, Slobounov et al. (2005) ont enregistré des activations principalement au niveau des aires somesthésiques du pied (Aire 3 de Brodmann), des aires motrices supplémentaires (Aire 6 de Brodmann), et du cortex moteur (Aire 4 de Brodmann). Cette étude suggère une intégration centrale favorisée des informations somesthésiques dans le contrôle de l'équilibre debout perturbé. En situation de surstimulation somesthésique, ces aires sont particulièrement activées (Romaiguère et al., 2003). Les lésions hémisphériques tendent à faire diminuer le temps d'apparition des positions minimales. Cela est cohérent avec les difficultés d'intégration et de gestion d'informations additives pour une même situation posturale (Brown et al., 2002). Cependant, cet effet ne diffère pas en fonction de l'hémisphère lésé ou non-lésé, ciblé principalement par la stimulation. D'autres structures pourraient donc être impliquées dans ce phénomène adaptatif temporel. Le cervelet est forcément envisagé vu son implication dans la construction chronologique de l'acte moteur. Il est aussi un lieu d'intégration des informations proprioceptives par la voie spino-cérébelleuse (Bosco & Poppele, 2001) et fortement impliqué dans les phénomènes d'adaptation (Luauté et al., 2009).

Cependant, l'implication du cervelet dans les phénomènes de pondération sensorielle est encore discutée (Block & Bastian, 2012). La question serait de savoir si ce phénomène d'adaptation à une perturbation sensorielle est spécifique à la source d'information perturbée. Cette problématique sensorielle peut être difficile à explorer car la contrainte posturale sous-jacente est souvent prédominante et limite l'étendue de l'exploration possible. En ce sens, Wardman et al. (2003) ont cherché à caractériser les réactions posturales lors des stimulations vestibulaires galvaniques, en limitant au maximum le feedback somato-sensoriel disponible (absence de vision, support en mousse, modification des informations plantaires) et en utilisant une intensité de stimulation faible pour créer un déséquilibre lent et progressif. Leurs courbes de déplacement sont très proches des nôtres, avec différentes phases et une variabilité interindividuelle marquée. Cependant, après 8 secondes de vibration, les impératifs d'équilibre semblent devenir dominants sans permettre d'adaptation sensori-motrice, entraînant une pondération transitoire en faveur des informations proprioceptives. Les déplacements repartent en direction de la position initiale puis de nouveau vers l'anode, créant des oscillations avec une période d'environ 6 secondes (Wardman et al., 2003). Cependant, les déplacements sont principalement médio-latéraux dans ce cas, ce qui peut modifier la régulation par rapport à nos observations antéropostérieures. Des déplacements antéro-postérieures induits par stimulation galvanique unipolaire (Séverac Cauquil et al., 2000) constitueraient des situations plus comparables. Le système nerveux construit une représentation interne (ou modèle interne) du monde extérieur et du corps, ainsi que de leurs



interactions réciproques, en vue d'organiser l'action. Cette représentation permet de prédire les conséquences de l'action et d'anticiper les effets perturbateurs qui en résultent. L'aspect temporel d'organisation du maintien de l'orientation mais aussi l'intégration d'une sur-stimulation sensorielle apparaissent comme des facteurs prédéterminés et difficilement modifiables.

## 6 Spécificités hémisphériques et contrôle postural

Les structures corticales ou sous-corticales responsables des fonctions spécifiques d'orientation et de stabilisation posturales sont encore à explorer. De par la dominance de l'hémisphère droit dans l'élaboration des référentiels (Pérennou et al., 2008) et dans celles relatives aux stratégies d'exploration (Corbetta & Shulman, 2002), l'étude des déficits posturaux des patients hémiparétiques, en fonction du côté de leur lésion, nous a conduit à suggérer que la stabilité posturale pourrait être principalement assurée par l'hémisphère droit. Cette dominance hémisphérique droite en ce qui concerne le contrôle postural, démontrée au niveau comportemental, demanderait à être étayée par des approches plus directes des structures impliquées grâce à l'imagerie cérébrale. L'intégrité de la jonction occipitotemporale et de l'insula (homologue chez l'homme du cortex vestibulaire pariéto-insulaire multi-sensoriel décrit chez le singe par Grüsser et al., 1990) pourrait être déterminante (Pérennou et al., 2008). La fonction d'orientation serait par contre sous le contrôle d'un réseau plus diffus de structures corticales et/ou sous-corticales. Dans notre cas comme dans la littérature, les dominantes des tableaux cliniques lors d'une lésion hémisphérique sont considérées comme le reflet du rôle initial de l'hémisphère lésé. La perturbation de la gestion des informations proprioceptives chez les patients LHD serait donc la traduction d'un rôle prédominant de l'hémisphère droit dans la précision du mouvement réalisé et dans l'adaptation sensori-motrice (Figure 1). Cela est en accord avec les observations réalisées lors des tâches de pointage manuel, avec une perturbation de la précision de la position finale atteinte (Haaland et al., 2004). Lors d'une tâche de pointage, les patients LHG sont eux plus perturbés dans la construction de la trajectoire suivie (Haaland et al., 2004), sans déficit particulier pour la position finale. Ce constat se rapproche, dans une certaine mesure, de nos observations posturales, avec un déplacement dévié du centre des pressions lorsque l'hémisphère gauche est lésé. Cependant, cette déviation est visible lorsque le membre inférieur non-parétique gauche est vibré, c'est-à-dire lorsque les informations sont traitées principalement par l'hémisphère droit. Cette déviation caractéristique des patients avec une lésion de l'hémisphère gauche apparaît en fait liée à une prédominance de l'hémisphère droit pour l'intégration des informations sensorielles.

Par ailleurs, la réalisation d'une tâche posturale comme celle que nous proposons nécessite des capacités posturales élevées. Cela implique une progression importante par rapport aux capacités initiales généralement faibles (Cumming et al., 2011), possible grâce à une réorganisation corticale sous-jacente. La réorganisation corticale suit un mécanisme de restitution, soit par réduction de la zone de pénombre (les zones adjacentes à la lésion lésée, jusque-là inactives, reprennent leurs fonctions), soit par des phénomènes de plasticité, au niveau du fonctionnement neuronal et synaptique (Schaechter et al., 2006) et dans les représentations sensori-motrices corticales (Thickbroom et al., 2004). Le niveau de récupération motrice semble associé au niveau d'activation des aires sensori-motrices et prémotrices de l'hémisphère lésé et des aires motrices supplémentaires

bilatérales (Feydy et al., 2002). L'implication de l'hémisphère sain dépend de l'importance de la lésion initiale, entre autre au niveau du cortex moteur primaire (Feydy et al., 2002) et de l'intégrité du tractus cortico-spinal (Kwakkel et al., 2004). Un recrutement bilatéral des aires sensori-motrices pour la réalisation d'une tâche manuelle est un facteur de mauvais pronostic et ne suffit pas à restaurer un niveau de motricité correct (Ward et al., 2003). Or, il apparaît que le recrutement des aires contra lésionnelles est particulièrement important lors de la réorganisation faisant suite à une lésion de l'hémisphère droit (Zemke et al., 2003). En ce sens, les difficultés posturales des patients LHD pourraient être renforcées par un recrutement hémisphérique bilatéral inadapté (Figure 1).

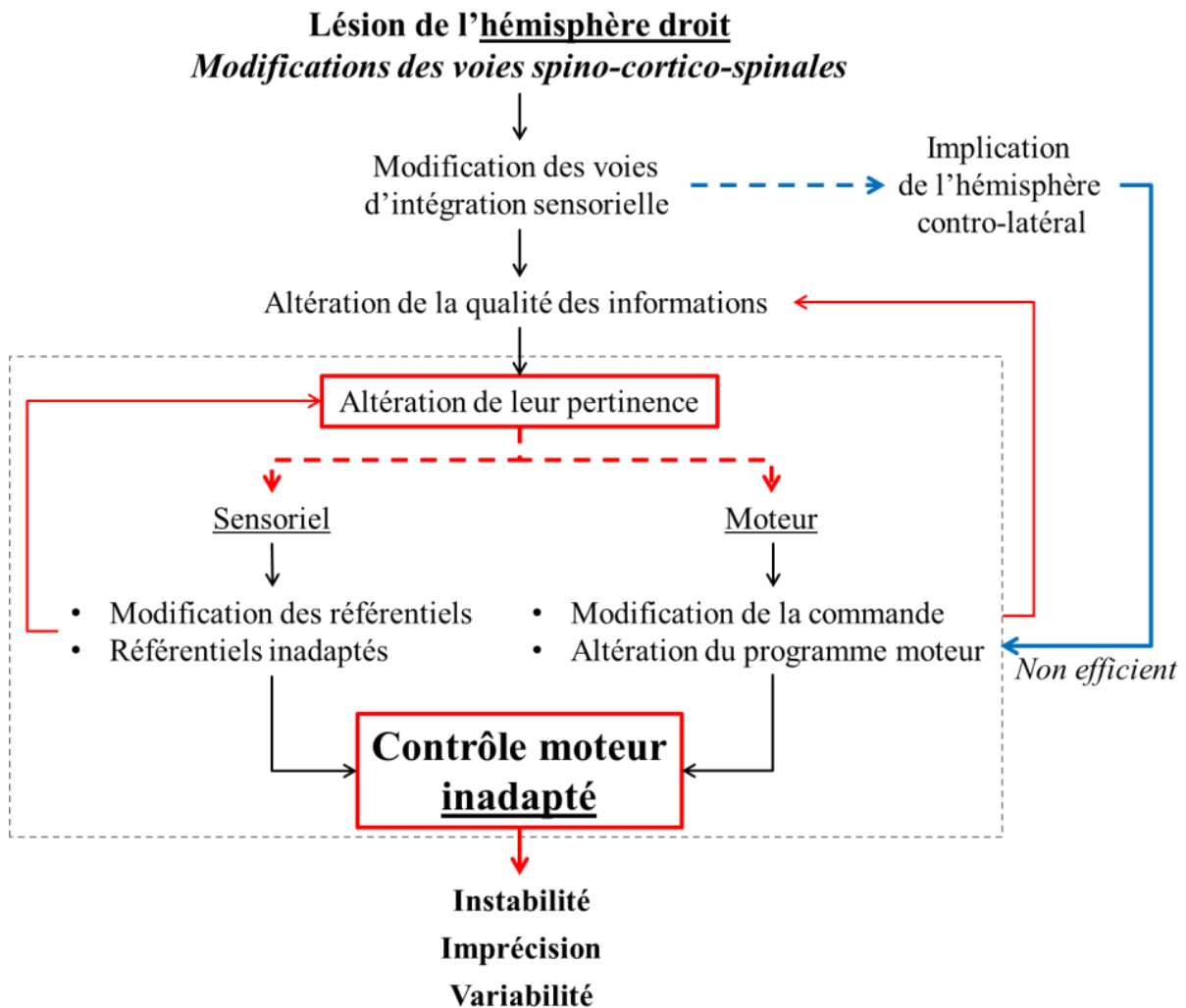


Figure.1 : Synthèse d'interprétation de la boucle sensori -motrice du contrôle postural lorsque l'hémisphère droit est lésé.

## 7 La stimulation vibratoire : un outil thérapeutique

Les comportements individuels observés dans nos études montrent que les vibrations tendineuses peuvent être un outil de diagnostic proprioceptif intéressant. Cet outil permet en effet d'objectiver l'importance donnée aux informations proprioceptives (Brumagne et al., 2004). Chez les patients hémiparétiques, la considération des informations du membre parétique est diminuée. Le fait de l'objectiver permet de rendre plus spécifique la prise en charge thérapeutique,

particulièrement chez les patients qui ont retrouvé un bon niveau fonctionnel et pour qui la « négligence » du membre parétique peut passer inaperçue. Par ailleurs, une meilleure récupération de l'équilibre semble associée à une diminution des différences inter-hémisphériques (Mihara et al., 2012). Les réseaux impliqués dans le contrôle postural dynamique apparaissent conservés lors d'une lésion hémisphérique : cortex pré-frontal, prémoteur et pariétal associatif de manière bilatérale. Cependant, l'activation du côté de l'hémisphère lésé peut être moins évidente (Mihara et al., 2012). Or, ces zones correspondent à celles activées par les vibrations tendineuses (Radovanovic et al., 2002; Romaguère et al., 2003). De plus, l'élément le plus efficace pour moduler les aspects corticaux serait les stimulations afférentes sensorielles répétées (Nudo, 2007). Les vibrations apparaissent comme un outil de stimulation corticale pertinent. Il a été observé que l'application quotidienne de vibrations au niveau de la cheville parétique de manière concomitante à une prise en charge rééducative améliore les performances posturales des patients hémiparétiques (Lee et al., 2013). D'autres études ont cherché les substrats corticaux de ces effets. Les vibrations tendineuses, en association avec une prise en charge classique, induisent une expansion des cartes corticales des zones vibrées (en surface et en volume) et une amélioration de la conduction cortico-spinale, ce qui n'est pas le cas lors d'une prise en charge seule (Marconi et al., 2011). Ces modifications corticales s'accompagnent d'une amélioration de la fonction motrice des muscles concernés mais également au-delà. En effet, les vibrations appliquées au niveau du poignet permettent d'améliorer toute la synergie musculaire proximale, avec une stabilité distale améliorée (Conrad et al., 2011). Cette amélioration de synergies musculaires pourrait être bénéfique au niveau des membres inférieurs, particulièrement pour les conditions perturbées (Marigold & Eng, 2006). Les troubles spécifiques des patients LHD dans la stabilité posturale pourraient en partie être expliqués par des troubles des synergies musculaires. Ainsi, une stimulation vibratoire des muscles de la cheville doit être une proposition de prise en charge à envisager concrètement. Cependant, l'utilisation des vibrations tendineuses ne doit pas être routinière et systématique. En effet, l'exercice repose sur une repondération centrale en défaveur des informations proprioceptives sur-stimulées, dans un cadre spatial égocentré modifié. L'entraînement à ce type de situation pourrait laisser craindre une déstructuration à long terme des relations sensori-motrices, et plus particulièrement des relations vestibulo proprioceptives.

## **8 Plan dépendant et stratégies segmentaires**

En dehors de la spécificité corticale de la stimulation, les vibrations tendineuses des muscles de la cheville apparaissent comme un outil d'entraînement intéressant de par l'amplitude de la déstabilisation qu'elles induisent et la complexité de la stratégie multisensorielle (Wardman et al., 2003) et motrice (Thompson et al., 2007) à mettre en place pour réussir la tâche. Les muscles vibrés (Courtine et al., 2007b) et le temps de vibration (Čapičiková et al., 2006) peuvent être définis en fonction de la direction que le thérapeute veut sensibiliser et de la difficulté qu'il veut induire.

Nos études renforcent l'idée que les patients hémiparétiques présentent des troubles importants de l'équilibre médio-latéral. Ils seraient dus à la distorsion des systèmes de coordonnées impliqués dans la construction du sens de la verticalité et

dans le contrôle de la stabilité posturale (Pérennou et al., 1998, 2000). Si la coordination entre les deux hémisphères (systèmes sensorimoteurs) est basée sur un échange d'informations, une telle propriété nécessite l'intégrité du cortex sensoriel polymodal et spécialement la jonction temporopariétale, impliquée dans la conversion entre la perception et l'action (Ro et al., 1998). Différentes stratégies segmentaires peuvent par ailleurs être adoptées pour permettre ce couplage perception-action. La stabilisation de la tête constitue, par exemple, un élément essentiel dans la chaîne posturale qui permet l'orientation dans l'espace (Amblard et al., 1997). Pour certains auteurs, elle constitue également le point de départ d'une organisation de type descendant de la régulation posturale en cours de locomotion (Pozzo et al., 1990). Cependant, l'ensemble du corps peut être considéré comme un emboîtement de modules distincts, composé des différents segments : tête, tronc, jambes (description biomécanique) régulés de manière autonome (Massion, 1992). Dans ce cas, différentes stratégies motrices peuvent être élaborées en ne faisant intervenir qu'un ou plusieurs de ces modules, plus ou moins indépendamment les uns des autres, afin de rétablir la posture de référence. C'est le cas pour toutes les activités d'équilibre : l'individu peut, par exemple, fléchir les genoux pour abaisser son centre de gravité (Nashner & McCollum, 1985) ou rigidifier la tête sur le tronc (Assaiante & Amblard, 1993) pour diminuer le nombre de degrés de liberté à contrôler simultanément au cours du mouvement (Mesure et al., 1999). Winter et al. (1996) ont démontré que le contrôle de l'équilibre n'est pas un simple programme moteur unique mais le résultat de deux mécanismes distincts et coordonnés entre deux groupes segmentaires : les hanches et les chevilles. Ces deux groupes doivent donc s'organiser sur des composantes anticipatrices des déstabilisations à venir. Les analyses cinématiques et électromyographiques de l'équilibre debout non perturbé ont mis en avant que l'implication de ces segments est étroitement liée au plan de contrôle. Le contrôle du plan frontal serait régulé par une stratégie de hanche du fait de ces caractéristiques anatomiques (Winter, 1995) ; alors que dans le plan sagittal, deux articulations se dissocient dans cette régulation des oscillations : principalement la cheville et aussi la hanche (Winter, 1995). En effet, selon cet axe, l'articulation de la hanche n'est pas totalement verrouillée (Aramaki et al., 2001). Les stratégies de maintien de l'équilibre debout ne sont pas pour autant figées. Elles peuvent être modulées dans le cas de perturbations exogènes de la posture (Horak & Nashner, 1986) ou dans le cas d'une modification de la position des pieds (écarts, angulation ; Day et al., 1993; Winter et al., 1996). A cela s'ajoutent de nombreuses variations intra- et inter- individuelles liées aux circonstances, présentes aussi bien au niveau sensori-moteur que perceptif.

D'un point de vue biomécanique, la gestion du centre des pressions dans les différents plans de l'espace reste donc une préoccupation majeure. La sélectivité des certaines variables (plans et/ou segments) de contrôle par le SNC répond à un principe d'économie et d'efficacité d'action. En accord avec les études de Paillex & So (2003, 2005), nos résultats montrent une prédominance du contrôle sur les forces médio-latérales plutôt que sur les forces antéropostérieures. En effet, dans nos conditions de perturbation proprioceptives, les déplacements médio-latéraux sont possibles (Duclos et al., 2014b) mais apparaissent la plupart du temps limités et donc spécifiquement contrôlés. Il apparaît ainsi une priorisation dans le contrôle des plans. Cette priorisation pourrait être relative à la difficulté que représente la tâche, en fonction de l'état de maturation du système sensori-moteur (Mckay et al., 2014) ou de son état biomécanique (par exemple, par une asymétrie de la répartition des

charges ; Brunt et al., 1995; Cheng et al., 2001). Cette priorisation apparaît être un élément du contrôle postural déterminé au niveau hémisphérique (Figure V.2). Elle devrait être associée à un contrôle segmentaire spécifique (Winter, 1995), limité au niveau anatomique le plus critique (par exemple la tête et/ou les hanches, siège du centre de gravité, en fonction de la tâche en cours). Etant donnée la stabilité frontale du CP au cours des vibrations que nous avons appliqué, nous pouvons faire l'hypothèse que les afférences proprioceptives de la cheville constituent des afférences pertinentes pour l'estimation du déplacement médio-latéral devant être contrôlé (Mouchnino et al., 2006). Ce déplacement est pourtant généré de manière prédominante au niveau des hanches, ce qui traduit une stratégie de contrôle spécifique des informations en provenance de la cheville coordonnée avec une stratégie d'organisation mécanique de mise en charge au niveau du bassin. Cela a pour but la régulation des masses (Winter et al., 1996; Bensoussan et al., 2004), contrôlée par une activité musculaire appropriée. Cette coordination semble particulièrement altérée chez les patients hémiparétiques, comme le confirme nos observations en conditions déstabilisantes (Figure 2). L'existence d'une certaine variété de typologies réactionnelles devrait être plus systématiquement prise en compte dans les pratiques rééducatives.

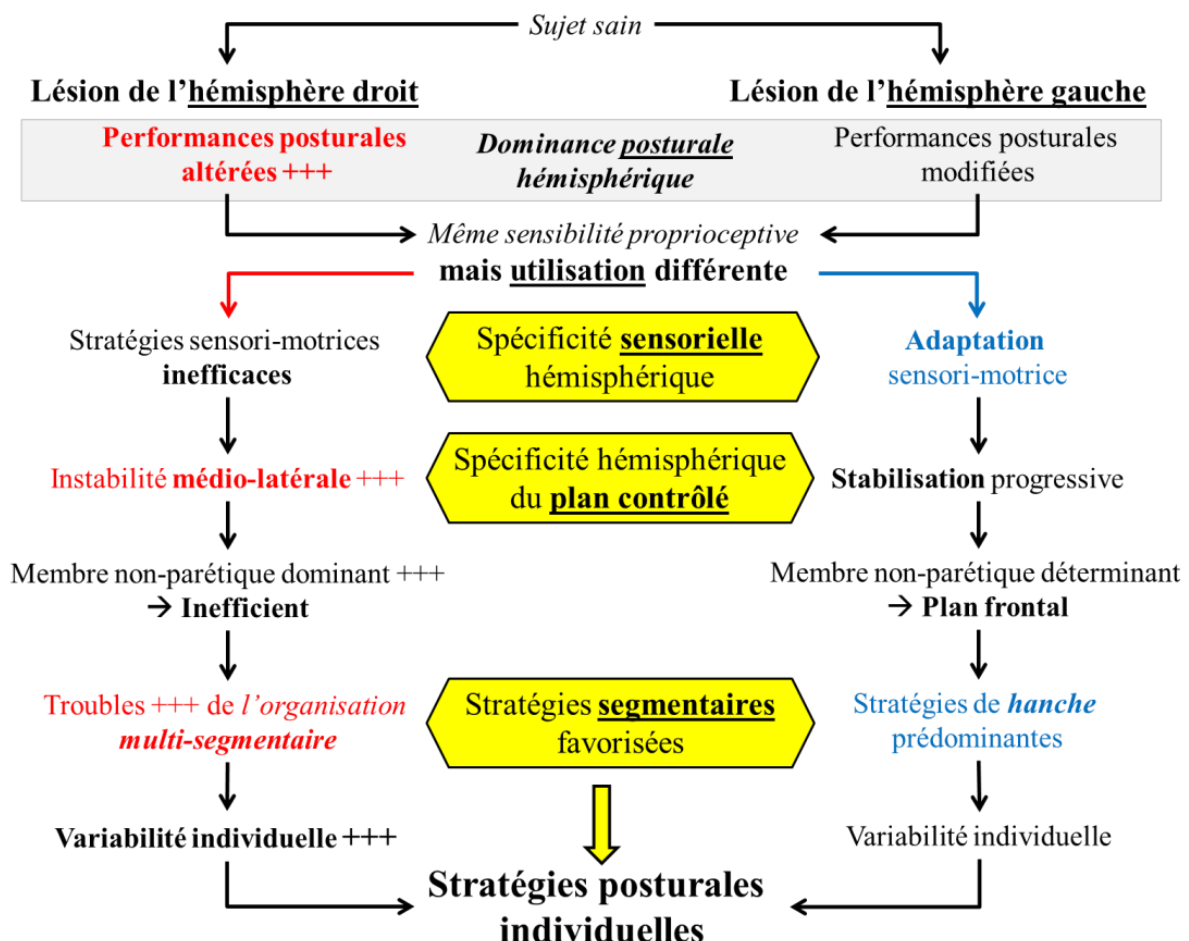


Figure .2 : Synthèse et bilan de l'asymétrie hémisphérique dans le contrôle postural

### En Conclusion

La coordination des différents espaces à l'intérieur desquels nos activités prennent place (égocentré et exocentré) nécessite la constitution d'une référence qui ne peut se concevoir sans l'interdépendance de systèmes tels que la sensorialité et la motricité. La coordination entre la sensorialité, la motricité et l'environnement (la pesanteur) nous permet d'obtenir une perception de notre corps et de son mouvement, ce qui représente l'information essentielle pour l'unification de l'espace dans lequel nos activités prennent place. Les phénomènes pathologiques peuvent s'associer à un dialogue permanent entre le système nerveux central et les effecteurs qu'il commande. Le système nerveux central doit alors nécessairement réaliser une adéquation entre ses commandes et l'état biomécanique du système, dont la performance résultante dépend du niveau de compétences possible. De la même façon, c'est en intégrant les données évolutives des effecteurs et les réafférences sensorielles qui le renseignent sur les résultats de ses actions que le système nerveux central constitue progressivement un répertoire de nouvelles stratégies appropriées aux invariants et aux caractéristiques du milieu dans lequel l'individu évolue. La lésion de l'hémisphère droit compromet grandement cette adéquation évolutive. Les stratégies comportementales semblent cependant toujours soumises aux mêmes principes d'efficacité et d'économie d'action. Si la pathologie permet l'utilisation spécifique d'afférences sensorielles de surveillance, ainsi que la mise en place de stratégies adéquates à la situation et à l'individu, nous pouvons supposer qu'une réhabilitation orientée vers ces sensibilités individuelles devraient permettre aux sujets pathologiques de restaurer des stratégies sensori-motrices relativement efficaces. La pathologie est un exemple flagrant de ces phénomènes adaptatifs. Nos résultats nous ont permis d'en observer quelques caractéristiques dont il faudra par la suite en préciser les spécificités.