



Yiou Eric, MCU-HDR
Laboratoire CIAMS
Univ Paris Sud, Université Paris Saclay
France

Rapport d'évaluation de Thèse

Candidat : Mr Tisserand Romain

Titre de la Thèse : MECANISMES BIOMECHANIQUES ET COGNITIFS DU
RATTRAPAGE DE L'EQUILIBRE : APPLICATION A UNE POPULATION AGE
AUTONOME.

Monsieur Romain Tisserand a réalisé son travail de Thèse de Doctorat sur les mécanismes biomécaniques et cognitifs du rattrapage de l'équilibre chez de jeunes adultes, des sujets âgés non chuteurs et chuteurs. Il s'agit d'un document de 235 pages comportant une bibliographie conséquente (environ 270 références), 6 annexes ainsi qu'une liste d'abréviations. **Il manque un résumé.**

Ce travail Doctoral vise à identifier des « marqueurs » posturaux, cognitifs et psychologiques du risque de chute chez la personne âgée autonome. Dans cette perspective, le candidat a effectué une batterie de tests inspirés de la littérature afin d'extraire les marqueurs les plus pertinents permettant de détecter, et éventuellement de prédire, le risque de chute. Le soucis de la faisabilité de ces tests en milieu clinique est clairement évoqué.

Le manuscrit est globalement très bien écrit et les idées sont clairement exposées, ce qui rend la lecture agréable. Les expérimentations, qui sont très nombreuses, sont toutes bien décrites et rigoureusement menées, avec des groupes de sujets conséquents, en tout cas pour des expérimentations en Biomécanique. Ce travail ouvre des perspectives cliniques très intéressantes qui sont bien développées dans la dernière partie du document. Si mon ressenti sur le travail réalisé est globalement positif, il me semble que certains aspects du manuscrit auraient pu être améliorés (état de l'art sur les ajustements posturaux et hypothèses de travail, analyse des résultats). Ce travail amène par ailleurs à se poser de nombreuses questions, ce qui est le propre d'un travail de recherche. Le candidat trouvera ci-dessous une liste de commentaires et de questions qui alimenteront la discussion lors de la soutenance et qui, je l'espère, permettront au candidat de développer de nouvelles pistes de recherche et de valoriser son travail par des publications scientifiques.

Les deux premiers chapitres de la partie 1 exposent le contexte général de la chute (chapitre 1) en rapport avec des notions fondamentales sur l'équilibre chez l'homme (chapitre 2). **Le troisième chapitre** expose la problématique et les objectifs de l'étude. A mon sens, les deux premiers chapitres sur l'état de l'art auraient mérité d'être plus « fouillés », ce qui aurait certainement permis au candidat de pouvoir argumenter et interpréter ses résultats de façon plus forte. En particulier, les mécanismes de contrôle de l'équilibre impliquant les APA et les APC ne sont décrits que sur 3 pages. Comme il est souligné dans la littérature, et également par le candidat à plusieurs reprises dans le document, le **contrôle de l'équilibre médio-latéral (ML)** est particulièrement important lors de tâches impliquant le déplacement de la base posturale, e.g. l'initiation de la marche/pas, le lever de la jambe, le lever latéral de la cuisse etc. Aussi, il aurait été judicieux de décrire de façon plus exhaustive ces mécanismes de contrôle, e.g. par le biais du modèle classique de Lyon and Day (1997) Exp Brain Res de l'initiation du pas pour évoquer (1) l'effet perturbateur associé au lever du pied et (2) le rôle stabilisateur des APA ML. Par ailleurs, il est à remarquer que les APA ML ne sont pas les seuls mécanismes impliqués dans le contrôle de l'équilibre ML lors de l'exécution d'un pas (volontaire ou protectif): une **stratégie d'augmentation de la base posturale ML**, par le biais d'un **placement plus latéral du pied oscillant au sol** a été décrite dans la littérature (e.g. Zettel et al. 2002 Exp Brain Res, Caderby et al. 2014 J Biomech etc.). Cette stratégie n'est pas évoquée dans l'état de l'art et n'est pas investiguée au cours des expérimentations. Ce point me paraît pourtant important, en particulier dans les conditions où les sujets ne génèrent pas (ou peu) d'APA ML : si cette stratégie anticipatrice n'est pas développée dans ce type de situation, on peut penser que les sujets auront plus de difficulté à retrouver leur équilibre final, avec un risque de chute accru. Le candidat évoque à plusieurs reprises cette chute du centre des masses vers la jambe oscillante; il aurait été bien de montrer la trajectoire du centre des masses et de **quantifier le risque d'instabilité à l'instant du posé du pied**, e.g. par le biais du calcul du centre des masses extrapolé ML ou autres indicateurs de la stabilité (cf. paramètres de freinage des articles récents de Do et collaborateurs). Dans la même veine, le paragraphe sur les CPA (1/2 page) est à mon sens trop succinct alors qu'il s'agit d'un point important du manuscrit. En particulier, j'invite le candidat à prendre connaissance des **articles récents** de Memari et al. **sur les CPA** associés au pas volontaire (Memari et al. 2013, 2014 Neurosc Lett), ainsi que ceux de Fourcade et al. (2014) J Biomech, et Bouisset et Zattara (1987) J Biomech, sur les CPA et les SPA (« ajustements posturaux simultanés »). Ces ajustements posturaux **qui surviennent après l'exécution du pas (i.e. après la pose du pied oscillant)** et qui servent à freiner le centre des masses, ne sont pas analysés dans la partie expérimentale et seraient à mon avis de bons « candidats » pour discriminer les C des NC, en particulier en situation où les APA ML sont réduits (ou absents). Enfin, encore à propos des APA

et des CPA, il aurait été pertinent de décrire le modèle d'interaction entre le centre des pressions et le centre des masses développé par Brenière et al. (1987) en rapport avec la performance motrice (vitesse maximale du centre de gravité, longueur du pas, durée de la phase pendulaire) pour renforcer les fondements biomécaniques du présent travail Doctoral, et l'interprétation des résultats.

On peut également regretter que les études portant sur l'influence de la peur de chuter sur le contrôle postural, et sur les APA en particulier (e.g. Adkin et al. 2002 Exp Brain Res, Yiou et al. 2011 Eur J Applied Physiol, Gendre et al. In press, Exp Brain Res, Zaback et al. 2015, Hum Mov Sc) ne soient pas suffisamment évoqués dans le manuscrit, alors que les résultats de ce travail Doctoral montrent clairement que ce paramètre psychologique est un facteur clef du risque de chute. La même remarque peut être formulée concernant l'effet de l'avancée en âge sur les APA (cf. Bleuse 2006 Gait Post, Hussein et al. 2013 Plos One, Kanekar and Aruin 2014 Age etc.).

Le chapitre 3 de la première partie expose la problématique. Les objectifs sont clairement définis. Mais l'élaboration d'une ou deux hypothèses générales fortes, basées sur la littérature, aurait renforcé la qualité scientifique du document. Je pense en particulier à la position du candidat sur le caractère dynamique vs. statique d'une perturbation pour discriminer les sujets chuteurs des sujets non chuteurs. La même remarque peut être formulée pour les différentes sous-parties expérimentales qui composent ce document.

Commentaires spécifiques:

Page 21, tableau 3 : dans le contexte politique actuel, je suis étonné de lire que la « race » soit comptabilisée parmi les facteurs de risque de chute (de même que le niveau d'éducation)...

Page 33 : le candidat écrit : « être en déséquilibre signifie ne plus être dans un état d'équilibre ». Cela sonne comme une Lapalissade.

Page 34 : Le candidat explique que l'« équilibre stationnaire » est employé lorsque le système est soumis à de très faibles perturbations, et propose de distinguer l'« équilibre postural » de l'« équilibre en mouvement ». Cette distinction n'est pas claire, puisque le mouvement perturbe l'équilibre postural. Par ailleurs, l'équilibre postural est mis en jeu lorsque le système est soumis à de « faibles perturbations » (j'imagine que le candidat évoque ici les perturbations végétatives), mais également lors de perturbations importantes, i.e. susceptible de déstabiliser le sujet : c'est le cas lors de l'exécution d'un pas ou d'un mouvement rapide des membres supérieurs (ce que le candidat ne mentionne pas). Où se situent les APA dans cette description de l'équilibre stationnaire et réactif? Dans la même veine, où se situent les APA et les CPA dans la figure 9 ?

Dans la partie 2, le candidat décrit le protocole de mesure des capacités sensori-motrices, cognitives et d'équilibration de trois groupes de sujets (jeunes adultes, âgés et chuteurs). Cette partie est globalement bien exposée. Certains aspects mériteraient cependant d'être clarifiés.

Page 59, le candidat administre le BESTest à ses sujets afin d'évaluer les « six sous-systèmes de l'équilibre ». On peut se poser la question de savoir quels sont ces « six sous-systèmes ». S'agit-il de systèmes « physiologiques » ? Par exemple, quel test permet d'investiguer la fonction vestibulaire? La sensibilité au mouvement (e.g. sens de la position au niveau de la cheville, ou encore du bassin, connue pour avoir un impact sur la stabilité au cours de la marche cf. Arvin et al. (2015) Gait and Posture) est-elle évaluée par le biais de ces tests? Comment les APA, évoqués page 60 sont-ils évalués ? Ce dernier aspect est étonnant puisque les APA sont décrits par la suite de façon très précise (partie 4). Par ailleurs, est-ce que ce test des « APA », que je parviens difficilement à distinguer du test des « contraintes biomécaniques » (qui implique une tâche d'élévation latérale d'une jambe, et donc des APA), permet d'investiguer spécifiquement les APA, et non pas le contrôle de l'équilibre statique (les participants se tenant en appui unipodal en posture finale)? Sur la base de ce test, le candidat conclue page 129 que « la capacité à programmer des APA » est déficient chez les C, ce qui me semble « prématuré » (les résultats de la partie 4 sont plus concluants sur cet aspect). Par ailleurs, la réponse des âgés à la réponse posturale réactive ne semble pas dépendante du passé de chute (cf. page 119), alors que le test réalisé dans la partie 4b révèle une différence entre C et NC.

Comment le candidat se positionne-t-il par rapport au BESTest ?

Page 78 et 80, le candidat présente les caractéristiques anthropométriques des sujets testés. Il a été montré par Brenière et collègues que la durée du processus d'initiation du pas était un invariant moteur, i.e. ne dépendait pas de la vitesse du centre de gravité et de la longueur du pas. Les pas rapides nécessitant des APA plus longs que pour un pas lent, mais une phase pendulaire plus courte. Ceci tiendrait au fait que le corps se comporte comme un pendule inversé au cours de ce processus. Cette durée ne dépendrait que des caractéristiques anthropométriques des participants (hauteur du centre de gravité, moment d'inertie, masse etc.). Cette variable est centrale dans la présente étude. Aussi, au vu des valeurs présentées aux tableaux 4 et 5 (Page 77-78), il semble envisageable que le poids et/ou la taille moyenne des sujets diffère(nt) entre les groupes. **Est-ce qu'une partie de la différence observée entre les groupes sur cette variable clef puisse être simplement attribuée à des différences anthropométriques entre groupes de sujets, plutôt qu'à des différences de contrôle moteur?**

Les participants âgés savaient-ils dans quelle catégorie ils étaient placés (C ou NC)? Il existe une littérature abondante en psychologie sociale qui tend à montrer que la catégorisation a potentiellement un impact (positif ou négatif, selon le type de catégorisation) sur le comportement.


L'expérimentation reportée **dans la partie 3** propose un « marker set » réduit pour l'analyse de l'équilibre au cours de différentes tâches posturales (maintien postural, pas volontaire et réactif). Cette partie est bien justifiée (faciliter l'analyse du mouvement du centre de gravité) et consistante, quoique les résultats ne sont pas utilisés dans la suite du document, mais seront utilisés dans les études à venir selon le candidat. Les résultats tendent à valider l'utilisation de ce modèle réduit et soulignent les limites d'utilisation du modèle « sacrum ». Le concept de « **centre des masses extrapolé** » utilisé dans cette partie aurait mérité d'être décrit de façon plus développée, e.g. dans l'état de l'art (condition de la stabilité dynamique, cf. Hof et al. 2005 J Biomech), **en lien notamment avec le rôle stabilisateur des APA ML** (cf. Caderby et al. 2014 J Biomech). Le candidat évoque la nécessité de contrôler l'équilibre dans le plan frontal, et rappelle à plusieurs reprises que ce contrôle est dégradé chez les personnes âgées. Cependant, le centre des masses extrapolé (et la marge de sécurité associée) ne sont calculés que suivant la direction antéro-postérieure. N'aurait-il pas été judicieux de calculer cette variable dans la direction médiolatérale afin de pouvoir comparer la stabilité ML entre les différents groupes ? La même remarque peut être formulée pour l'étude reportée au chapitre 3.6, portant sur la stabilité lors de la marche (seule la stabilité antéro-postérieure est investiguée par le biais du calcul de l'exposant de Lyapunov). **Pourquoi avoir utilisé deux indicateurs pour quantifier la stabilité ?** Ces deux variables (MLE et coefficient de Lyapunov) donnent-ils les mêmes informations ?

Dans cette expérimentation, le candidat cherche à déterminer de façon simple la cinématique du centre des masses à partir de marqueurs. A la lecture de cette partie, il apparaît que cette méthode nécessite de nombreuses hypothèses (e.g. page 89). De nombreuses études sur l'initiation de la marche (e.g. Brenière et al. 1987 J Mot Behav, Caderby et al. 2013 Gait Posture, Chastan et al. 2009 Brain, Michel and Do 2002 Neurosci Lett etc.) ou sur le rattrapage de l'équilibre (cf. Do et collaborateurs, Maki et McIlroy etc.) utilisent la **méthode de double intégration des forces** de réaction pour déterminer cette cinématique, ce qui ne nécessite aucune hypothèse ni de pose de marqueurs, et permet donc de gagner du temps. **Comment le candidat se positionne-t-il par rapport à ces études ?**

Le candidat compare les valeurs de déplacement du centre des masses entre un modèle de référence et deux modèles simplifiés. Je me pose la question de la pertinence de tester ce modèle en condition statique puisque le corps est, par définition, alors (quasi) immobile. Est-ce que la comparaison avec un modèle composé d'un objet totalement statique ou oscillant faiblement et de façon aléatoire n'aurait pas donné une même concordance ?

Le candidat conclut page 106 que ce type de modèle simplifié (nécessitant la pose de 13 marqueurs et l'utilisation de 8 caméras) « peut devenir un outil utile pour les cliniciens ». Est-ce réellement réaliste ?

Commentaires spécifiques.

Page 94 : statistiques. Le seuil de significativité est fixé à $\alpha = 0.01$ alors que ce seuil est fixé à 0.05 dans les autres études. Pourquoi le seuil classique de 0.05 n'est-il pas « suffisant » ? Dans la partie description, la limite de R (et du p) à partir duquel le candidat considère que deux modèles diffèrent l'un de l'autre est à mon sens assez arbitraire. Ceci se ressent d'ailleurs dans la conclusion générale (page 197) où le candidat écrit : « les coefficients observés sont « assez » faibles, indiquant que les informations sont « plutôt » différentes » 

La partie 4a présente les résultats des tests psycho-cognitifs et d'équilibre classique. Cette partie se compose de plusieurs sous-parties écrites à la manière de mini-articles (introduction, méthode, résultats et discussion).

Page 114, le candidat distingue parmi les sujets âgés, deux groupes d'âge (70-74 et 75 ans et plus). Les résultats du test TMT B (page 115) indiquent que le comportement de ces deux groupes est différent. Pourquoi ces deux groupes ne sont-ils plus distingués par la suite ? De façon plus générale, comment le candidat justifie-t-il la fourchette d'âge utilisée ? On peut se poser la question de savoir si le processus de contrôle de l'équilibre ne se détériore pas avant bien avant 70 ans (selon une étude pilote de notre laboratoire, ce processus pourrait commencer à se dégrader à partir de 45 ans). Dans la même veine, le candidat évoque dans sa conclusion page 117 qu'il est « possible que certains sujets n'aient pas été totalement bien identifiés comme des chuteurs ». Remet-il en cause ici sa façon de procéder pour définir un chuteur ? En se basant sur une autre définition du chuteur (cf. page 24 tableau 2), d'autres résultats auraient-ils été obtenus ?


Page 122 (figure 45), les résultats du test de posturographie ne permettent pas de distinguer les sujets C vs. NC. Ce résultat va dans le sens de l'hypothèse selon laquelle ce type de test statique n'est pas pertinent pour discriminer ces deux types de populations. Cependant, les résultats du BEST est montrent que lorsque les sujets doivent maintenir leur équilibre sur un pied, alors la différence de score entre C et NC devient significative (cf. test APA). Aussi, on peut se poser la question de la généralité de la conclusion du candidat quant à la pertinence des tests réalisés en statiques : n'aurait-il pas fallu tester les sujets C et NC en situation statique unipodale pour pouvoir les discriminer ? Il semble que le candidat abonde en ce sens dans sa conclusion page 124, mais pourtant ne recommande pas ce type de test pour discriminer les C des NC. Dès lors, on peut se poser la question de savoir pourquoi avoir réalisé ce type de test.

Dans la **partie 4b**, le candidat investigate l'organisation biomécanique de deux types de pas : volontaire et protectif. Cette partie est bien écrite et les expériences bien menées. L'élaboration d'hypothèses fortes (e.g. page 154 concernant le pas volontaire ; ou page 135 concernant les pas protectifs : quelles hypothèses concernant l'effet attendu des perturbations longues et courtes ?) ou plus précises (cf. page 146 concernant le pas réactif : « nous émettons l'hypothèse que les premières réactions observées très tôt sont des APC plutôt que des APA et que le

système va décider de changer – ou non – de mode de contrôle s'il en a le temps ») aurait renforcé la qualité scientifique de cette partie.

Page 134, le candidat décrit les objectifs de cette partie 4b, en mettant l'accent sur l'intérêt d'étudier le contrôle réactif de l'équilibre (pas protectif) dans une perspective clinique. Ce point important est repris à plusieurs reprises dans le manuscrit. Cependant, le candidat remarque que le matériel nécessaire à ce type d'expérience est coûteux et difficile à mettre en place dans un contexte clinique. N'y a-t-il pas ici une **contradiction** ?

Dans l'étude sur le test CSRT, le candidat définit l'amplitude des APA ML comme le déplacement du centre des pressions entre le pic maximal du tracé (pic dirigé vers le pied oscillant) et l'instant du décollement du pied oscillant où le CP est situé sous le pied d'appui (cf. page 142 figure 50). Cette définition n'est pas habituelle. Cette période comprend la période de charge du pied oscillant, qui correspond aux APA classiquement décrits dans la littérature mais également la phase de décharge de la jambe oscillante qui n'est généralement pas incluse dans le calcul de l'amplitude des APA. Avec cette définition, **l'amplitude des APA doit être très sensible à l'écartement des pieds en posture initiale** (puisque plus cet écart est important, plus l'écart entre la position du CP au T0 et à l'instant du FO sera elle-même plus importante). Cela ajoute à mon avis de la variabilité inutile dans cette mesure importante et amène à se poser la question de savoir s'il n'aurait pas fallu **normaliser cette valeur d'amplitude par rapport à l'écart initial des pieds** (qui doit dépendre de la taille des individus, qui est peut-être différente d'un groupe à l'autre) ou alors être plus classique, et ne considérer que le pic de déplacement du CP vers la jambe oscillante. Est-ce qu'une différence de taille entre les groupes (cf. page 79 et 80) - et donc d'écart des pieds en posture initiale - ne pourrait pas être responsable de l'amplitude du déplacement anticipateur du CP ML plus importante chez les jeunes que chez les NC et C (tableau 24 page 143) ? Idem pour le recul du CP ? Dans la même veine, le candidat mesure la « vitesse de décharge » du CP. Pourquoi pas plutôt **la vitesse de « charge »** de la jambe oscillante, en accord avec la fonction des APA ML ?

Concernant la méthode, une annexe précisant comment le centre des pressions est calculé à partir des 4 plateformes de force aurait à mon sens été utile  par ailleurs, dans ce calcul, est-ce que le candidat a tenu compte de la distance entre la surface du plateau et l'origine de la plateforme ? En condition statique, associer ces deux points ne pose pas de problème ; par contre en dynamique, des erreurs non négligeables sur l'amplitude du CP peuvent survenir.

Selon le candidat (Page 144), « l'allongement de ces phases (phases d'APA et de swing du pas volontaire) avait été constaté dans la littérature, sans que des variables permettant d'expliquer la raison de cette allongement soient fournies ». Je ne comprends pas bien en quoi les résultats du CSTR permettent d'expliquer ces modifications de durée et comment le candidat fait la part des choses entre

déficiences cognitive (liée à la situation de TR de choix) et déficiences de programmation motrice pour expliquer ce résultat. Est-ce que l'exécution d'un simple pas (sans consigne de TR de choix) n'aurait pas été suffisante pour discriminer les groupes de sujets sur le plan moteur, et aurait permis de simplifier le protocole de CSRT (les aspects cognitifs étant évalués par le biais d'autres tests)?

Comme suggéré précédemment, **il manque** à mon avis dans cette partie une **évaluation de la stabilité dynamique ML** (par le biais du centre des masses extrapolé ML et de **la marge latérale de sécurité**, largeur du pas) ainsi qu'une analyse des CPA (ajustements posturaux survenant après la pose du pied et permettant au sujet de freiner sa chute), dont on pourrait penser qu'elles permettent de discriminer les C des NC. La même remarque peut être formulée concernant l'analyse du pas proactif (partie suivante).

Les mécanismes impliqués dans la réalisation du pas protectif sont décrits page 146. Selon le candidat, « les mécanismes de contrôle des pas PRO n'ont pas été clairement identifiés, ils sont toujours l'objet de fortes hypothèses ». De nombreux travaux ont été réalisés pour identifier ces mécanismes (cf. Travaux de Do sur le rattrapage de l'équilibre dont les premières publications datent du début des années 1980, cf. également les travaux de Maki, McIlroy qui sont bien représentés dans ce mémoire). A quelles hypothèses fortes le candidat fait-il référence ici ?

Page 147, le candidat présente des tracés biomécaniques de l'évolution temporelle des forces verticales sous chaque pied. A moins d'une erreur de ma part, le candidat ne précise pas s'il s'agit d'une perturbation longue ou courte. **Le début de la perturbation est bien indiqué mais pas la fin**. Par ailleurs, est-il judicieux de regrouper dans une même variable (TPP) deux « sous-variables », APC et APA, qui correspondent à des mécanismes différents ? Aussi, on ne sait pas si le résultat important (cf. page 152) selon lequel la durée du TPP chez les C est augmentée est due à l'augmentation des CPA et/ou au APA, ce qui amène le candidat à émettre des hypothèses explicatives qui pourraient être développées, e.g. Page 152 : « les NC et les J choisissant peut-être aussi de réagir à chaque fois à l'aide d'un pas, pour réduire le risque une fois les premières perturbations identifiées. » Il aurait été intéressant de creuser cette idée, qui est reprise dans la discussion générale, en analysant les caractéristiques temporo-spatiales des CPA, qui théoriquement devraient être réduits chez les NC et J vs. C selon l'hypothèse du candidat. L'effet de la répétition de la perturbation sur ces caractéristiques pourrait également donner des éléments de réponse (réduction des APC avec la répétition de la perturbation chez les J et NC uniquement).

Par ailleurs, le candidat émet l'hypothèse que les phénomènes mécaniques observés pendant cette phase d'APC sont des phénomènes actifs, permettant au sujet de freiner la chute du sujet. Je pense qu'une **analyse EMG** des muscles de la cheville aurait permis de mieux argumenter en ce sens, et d'écarter un effet purement passif lié à la perturbation. Page 151, le candidat propose que les

phénomènes mécaniques observés pendant ces APC ont une latence trop longue (environ 100 ms) pour être réflexes. Pour conclure cela, il faudrait tenir compte du délai électromécanique qui, s'il est de l'ordre de 50 ms (ce qui me semble probable), irait au contraire **dans le sens d'un mécanisme réflexe** (la latence du réflexe H du soleus est de l'ordre de 50 ms).

Figure 53 (Page 148): Le sujet observe que le temps de réaction est plus court chez les personnes âgées que les personnes jeunes. Comment le sujet interprète-t-il ce résultat étonnant au regard de la littérature sur l'effet du vieillissement sur le TR?

Figure 54 (page 149) : je suis étonné de voir qu'en situation où le sujet ne développe pas d'APA ML (tracé vert), le centre des pressions soit situé à l'extérieur du polygone de sustentation à l'instant du décolllement du pied.

Page 152 : pourquoi la **consigne** donnée au sujet est-elle de se rattraper « sur la plus petite distance possible » ? Et pas de se rattraper « le plus naturellement possible » comme dans l'étude de Rogers et al. 2003 ? Cette consigne ne biaise-t-elle pas les résultats ?

Page 154. Le titre du chapitre est « effet de la perturbation sur la réponse posturale ». Pourquoi ce chapitre n'est-il pas combiné au précédent, qui porte également sur le pas protectif ? L'élaboration d'hypothèses concernant les effets de la durée et de l'intensité de la perturbation (en rapport avec l'impulsion) aurait été bienvenues. Pourquoi les variables utilisées pour quantifier l'amplitude des APA sont-elles différentes de celles analysées pour le pas volontaire (e.g. recul et déplacement latéral du centre des pressions) ? Ceci aurait certainement permis de mieux pouvoir comparer le pas volontaire et le pas protectif, puisqu'il s'agit d'un des objectifs de ce travail. Par ailleurs, à moins d'une erreur de ma part, les essais où des APA substantiels ont été générés n'ont pas été dissociés des essais sans APA ou avec des APA de faible amplitude. N'aurait-il pas été intéressant de dissocier ces essais afin d'examiner les conséquences d'APA réduits (ou absents) sur les paramètres reportés (e.g. MS, vitesse du CM au FO etc.), mais aussi sur la stabilité ML, la largeur du pas etc., en fonction de l'âge et du passé de chute ? Les résultats montrent que le MS ne change pas avec l'avancée en âge et le passé de chute. Mais peut-on penser que **cette marge est moins bien tolérée chez les C vs NC et chez les J vs. âgés**, ce qui permettrait d'expliquer pourquoi le nombre d'essais où plusieurs pas sont nécessaires pour retrouver l'équilibre soit plus important?

La partie 5 du document se propose d'estimer le risque de chute d'une personne âgée autonome sur la base des résultats obtenus lors des chapitres précédents. Cette partie est bien décrite et justifiée par le besoin d'émettre un diagnostic personnalisé et fiable au clinicien sur le risque de chute. Au vu des résultats, il semble que la meilleure mesure de prédiction rétrospective du passé de chute soit la peur de chuter. Aussi, on peut se poser la question de savoir dans quelle mesure toutes les modifications biomécaniques observées dans la partie 4 ne sont-elles pas médiées par ce seul facteur psychologique ? J'invite le candidat à lire les articles

récents sur l'effet spécifique de la peur de chuter sur les APA (e.g. Yiou et al. 2011 Eur J Applied Physiol, Gendre et al. In press, Exp Brain Res). Ces études mettent en évidence une augmentation de la durée des APA et une réduction de leur amplitude en condition de peur de chuter, ce qui semble bien être le cas dans l'étude présente lorsque l'on compare les C et les NC.

Au chapitre 5 de cette partie 5, le candidat parvient à la conclusion que le modèle 2 (composé du score ABC, de la durée du CSRT et du coefficient de stabilité de marche) parvient « globalement assez bien » à discriminer les C des NC. Il semble que seuls 4 sujets aient été testés (cf. tableau 33 page 181) et que le modèle était pertinent pour chacun de ces sujets. La question de pose de savoir dans quelle mesure **ce modèle était-il valable pour l'ensemble de la population testée.**

Dans le dernier chapitre de cette partie 5, le candidat établit une conclusion générale et propose des perspectives de travail. La conclusion générale reprend de façon synthétique et claire l'interprétation des principaux résultats présentés au cours des chapitres précédents. Ces résultats et leur interprétation ont fait l'objet des commentaires dessus. Il me semble que dans les perspectives, une analyse EMG permettant de caractériser la réponse précoce à la perturbation, couplée à une analyse dynamique de cette réponse et des CPA pourraient s'avérer bénéfique à la présente étude.

Pour terminer, le candidat présente une bibliographie très fournie. Certaines références sont cependant mal reportées. Quelques exemples : le titre de l'article de Aruin et Latash 1995, le document de Bariatinsky et al. : s'agit t'il d'une Thèse de Doctorat? A quoi correspond le document de Chèze 2014 ? Il manque pages et volume des articles suivants : De Leva 1996, Dempster 1955, Madigan et al. 2005.

JUGEMENT D'ENSEMBLE

La thèse de Mr Tisserand répond largement aux objectifs d'une Thèse Doctorale et elle ne comporte pas de déficiences au plan scientifique ou dans sa présentation qui en invalideraient la démarche ou dont la correction nécessiterait la refonte de l'une ou l'autre de ses parties. Considérant la présente évaluation, j'émet un **AVIS FAVORABLE** à la soutenance de la Thèse.